

Oettle, Michaela

Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik. Eine Delphi-Studie

Berlin : Logos Verlag 2021, v, 344 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 315) - (Dissertation, Pädagogische Hochschule Freiburg im Breisgau, 2021)



Quellenangabe/ Reference:

Oettle, Michaela: Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik. Eine Delphi-Studie. Berlin : Logos Verlag 2021, v, 344 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 315) - (Dissertation, Pädagogische Hochschule Freiburg im Breisgau, 2021) - URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-334209 - DOI: 10.25656/01:33420; 10.30819/5305

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-334209>

<https://doi.org/10.25656/01:33420>

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

M. Hopf, H. Niedderer, M. Ropohl, E. Sumfleth [Hrsg.]

315

Michaela Oettle

Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik

Eine Delphi-Studie



logos

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

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

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

Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

Studien zum Physik- und Chemielernen

Band 315

Michaela Oettle

Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik

Eine Delphi-Studie

Logos Verlag Berlin



Studien zum Physik- und Chemielernen

Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und 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 2021

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-5305-0

ISSN 1614-8967

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

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

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

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



Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik - eine Delphi-Studie

von der Pädagogischen Hochschule Freiburg
zur Erlangung des Grades einer
Doktorin der Philosophie
(Dr. phil.)

genehmigte Dissertation von
Michaela Oettle

aus Freiburg

Promotionsfach: Physik

Erstgutachterin: Prof. Dr. Silke Mikelskis-Seifert

Zweitgutachter: Prof. Dr. Markus Schumacher

Inhaltsverzeichnis

I	Einleitung	1
II	Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand	9
1	Fachwissen von Lehrkräften - Einbettung, Definition, Modellierung	11
1.1	Wissen als Teil professioneller Kompetenz	12
1.2	Konzeptualisierung des Professionswissens von Lehrkräften	16
1.3	Fachwissensmodellierung	21
1.3.1	Inhaltsbereich	24
1.3.2	Wissensarten	26
1.3.3	Wissensstufen	28
1.3.4	Weitere Dimensionen	30
1.4	Modellierung von Fachwissen in dieser Arbeit	31
2	Die <i>Big Ideas</i> der Teilchenphysik - eine Einführung	37
2.1	Vorstrukturierung und Auswahl der <i>Big Ideas</i>	38
2.2	Die <i>Big Ideas</i> aus dem Zweig „Erkenntnisse & Wissensstand“	43
2.2.1	Die Struktur der Materie als kurzer historischer Abriss	44
2.2.2	Elementarteilchen und zusammengesetzte Teilchen	51
2.2.2.1	Überblick	52
2.2.2.2	Fermionen	53
2.2.2.3	Bosonen	56
2.2.2.4	Antiteilchen und Antimaterie	58
2.2.2.5	Zusammengesetzte Teilchen	60
2.2.3	Fundamentale Wechselwirkungen	62
2.2.3.1	Allgemeine phänomenologische Betrachtungen	62
2.2.3.2	Die vier Wechselwirkungen und ihre Charakteristika	67
2.2.3.3	Feynman-Darstellung	71
2.2.3.4	Experimente zur Untersuchung von Wechselwirkungen	74
2.2.4	Symmetrien und Erhaltungsgrößen	80
2.2.5	Quantenfeldtheorien und das Standardmodell	83
2.2.5.1	Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson	87
2.2.6	Teilchenphysik in der Kosmologie	89
2.2.7	Offene Fragen der Teilchenphysik	92
3	Forschungsfragen	95

III	Empirische Untersuchung	99
4	Forschungsdesign und Durchführung der Untersuchungen	101
4.1	Planung von Delphi-Methodik und Expertiseauswahl	102
4.1.1	Anzahl und Art der Befragungsrunden	106
4.1.2	Gewährleistung der Anonymität	107
4.1.3	Auswahl der Expertinnen und Experten	108
4.1.3.1	Lehrkräfte als Expertinnen und Experten	111
4.2	Das Forschungsdesign im Überblick	112
4.3	Konstruktion der Erhebungsinstrumente	120
4.3.1	Das Programm <i>SoSci Survey</i>	120
4.3.2	Befragungsrunde 1: Strukturierung des Themenfelds	122
4.3.3	Befragungsrunde 2: Inhaltsvalidierung der Strukturierung . . .	126
4.3.4	Befragungsrunde 3: Konsensfindung	129
4.4	Datenerhebungen und Stichproben	136
5	Auswertung und sukzessive Ergebnisbildung	151
5.1	Auswertung Runde 1: Themenfeldstrukturierung	151
5.1.1	Konstruktion eines Kategorienmodells	157
5.1.2	Modellentwurf für die Fachwissensdimension <i>Inhaltsbereich</i> . .	164
5.2	Auswertung Runde 2: Inhaltsvalidierung	172
5.2.1	Zustimmung des Expertisegremiums	176
5.2.2	Optimierung des Kategorienmodells	187
5.2.3	Ergebnis: Das inhaltlich validierte Modell	195
5.3	Auswertung Runde 3: Konsensfindung	197
5.3.1	Relevanzeinschätzungen der Unterkategorien	201
5.3.2	Zusammenfassung von Unterkategorien	205
5.3.3	Vorstellung der 11 neuen Hauptkategorien	208
5.3.4	Bildung von Relevanzgruppen unter Hauptkategorien	209
5.3.4.1	Relevanzgruppen des Expertisegremiums	211
5.3.4.2	Relevanzgruppen des Lehrkräftegremiums	217
5.3.4.3	Relevanzgruppenvergleich: Expertise vs. Lehrkräfte . .	220
5.3.5	Relevanzunterschiede zwischen Personengruppen	222
5.3.5.1	Unterschiede zwischen Expertise und Lehrkräften . .	224
5.3.5.2	Berufsgruppenunterschiede im Expertisegremium . .	228
5.3.5.3	Landesbedingte Unterschiede im Expertisegremium .	231

5.3.5.4	Landesbedingte Unterschiede im Lehrkräftegremium	232
5.3.6	Finale Modellierungsergebnisse der Dimension <i>Inhaltsbereich</i>	235
5.3.6.1	Empfehlung für Lehrkräfteprogramme und Standards	237
5.4	Modellierung von <i>Wissensarten</i> für inhaltliche Subfacetten	238
5.4.1	Deklaratives teilchenphysikalisches Fachwissen	241
5.4.2	Prozedurales teilchenphysikalisches Fachwissen	242
5.4.3	Konditionales teilchenphysikalisches Fachwissen	249
5.4.4	Finale Modellierungsergebnisse der Dimension <i>Wissensarten</i>	251
5.4.4.1	Weitere Empfehlung für Programme und Standards	253
IV	Zusammenfassung	255
V	Anhang	273
A	Fachwissenschaftliche Kategorien in den Befragungsrunden	275
A.1	Runde 2: Kategorienbeschreibungen	276
A.2	Runde 3: Kategorienbeschreibungen	280
B	Auswertungsdokumentation	285
B.1	Runde 1: Kodierleitfaden	285
B.2	Runde 2: Kodierleitfaden	297
B.3	Runde 2: Code-Matrix-Browser der Subkategorien	309
B.4	Runde 3: Reliabilitätsanalysen	314
B.5	Runde 3: Faktorenanalysen	317
B.6	Runde 3: Varianzanalysen	321
	Literatur	329
	Danksagungen	343

Teil I

Einleitung

Einleitung

„Der Spaß fängt erst an, wenn man die Regeln kennt. Im Universum aber sind wir momentan noch dabei, die Spielanleitung zu lesen.“

Richard P. Feynman

Die Teilchenphysik als Forschungsbereich der modernen Physik widmet sich der Untersuchung von subatomaren Strukturen wie den elementaren Bausteinen der Materie. Mithilfe möglichst einfacher, theoretischer Modelle und deren experimenteller Überprüfung versuchen Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker, nicht nur alle Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen untereinander zu beschreiben, sondern bislang ungeklärte Fragen zum Ursprung und zu der Entwicklung unseres Universums zu beantworten. Wie der Physiker Richard Feynman auch für die heutige Situation noch treffend verdeutlichte, sieht sich die Menschheit trotz großer Erfolge speziell im letzten Jahrhundert noch weit davon entfernt, alle Vorgänge im Universum begreifen und sich eventuell zunutze machen zu können. So stellt die letzte, besonders aufsehenerregende, Entdeckung der Teilchenphysik - die Entdeckung des sogenannten Higgs-Bosons als neues Elementarteilchen 2012 - aus Forschungssicht nur einen weiteren Meilenstein hin zu einem umfassenderen Verständnis der fundamentalen Vorgänge im Universum dar. Trotz der ihr eigenen Unabgeschlossenheit, besitzt die Teilchenphysik als Grundlagenforschungsbereich aufgrund der fundamentalen Bedeutung der von ihr untersuchten Fragen neben einem begleitenden medialen Interesse insbesondere eine hohe gesellschaftliche Relevanz. Letztere wird dadurch verstärkt, dass sich eine Vielzahl an bedeutenden Anwendungen wie beispielsweise medizinische Anwendungen zur Krebsbehandlung oder auch die Erfindung des *World Wide Web* auf grundlegende Entwicklungen der Teilchenphysikforschung zurückführen lassen.

Während der Forschungsbereich Teilchenphysik demnach eine große, noch nicht abgeschlossene, Erfolgsgeschichte aufweist, hält das Thema auch in vorsichtigen Schritten Einzug in den deutschen Schulunterricht in Form von Bildungsstandards und Lehrplänen für das Schulfach Physik. So legt die Kultusministerkonferenz „Grundlegende Merkmale der Struktur der Materie und beispielhafte Untersuchungsmethoden[:] Atome, Kerne, Quarks, ausgewählte Elementarteilchen, Untersuchungsmethoden (Spektren, hochenergetische Strahlung, Detektoren)“ als fachliche Inhalte

im Sachgebiet Materie für die Gestaltung der Abiturprüfung fest (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2004, S.5). Auf den Bildungsstandards aufbauend, finden sich Elemente der Teilchenphysik zum aktuellen Stand im Schuljahr 2019/20 in den (Rahmen-) Lehrplänen bzw. Bildungsplänen von 11 Bundesländern für die gymnasiale Oberstufe im Fach Physik explizit im Pflicht- bzw. Wahlbereich. Verglichen mit anderen physikalischen Inhaltsbereichen stellt sich die Ausformulierung von Standards für teilchenphysikalische Themen in den Lehrplänen jedoch in den meisten Fällen als unzureichend dar und geht in vielen Bundesländern nicht über die reine Benennung des Begriffs „Elementarteilchen“ hinaus. Pioniersarbeit leistet hier das Land Nordrhein-Westfalen, welches im Inhaltsfeld „Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik“ für den Leistungskurs Physik unter anderem den „Aufbau der Materie im Kleinsten nach dem sogenannten Standardmodell“ ansetzt. Weiterführend wird im Curriculum auch der inhaltliche Schwerpunkt „Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen“ mit einem möglichen Kontext „Forschung an Teilchenbeschleunigern“ beschrieben sowie die Basiskonzepte Wechselwirkung, Energie und Struktur der Materie für den Teilbereich Elementarteilchenphysik ausformuliert (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014, S.21 und S.38).

Wie die genannten Beispiele verdeutlichen, lässt sich ein genereller Wunsch bzw. das generelle Vorhaben konstatieren, das Thema Teilchenphysik in den Schulunterricht zu integrieren, und es bestehen bereits gewisse Lehrverpflichtungen. Während einerseits auch Praxiserfahrungen eine Faszination der Lernenden für die Teilchenphysik zeigen, stellt das Thema andererseits aufgrund seiner Abstraktheit und Komplexität - insbesondere verglichen mit anderen physikalischen Domänen - große Herausforderungen an die Lehrenden. Die Situation wird dadurch verschärft, dass die Teilchenphysik für viele Lehrkräfte kein expliziter Gegenstand ihrer universitären Ausbildung war. Um folglich die dringend benötigten Lehrkräftefortbildungs- bzw. -ausbildungsprogramme zum Thema Teilchenphysik konstruieren und einsetzen zu können, muss unter anderem zunächst das Fachwissen beschrieben werden, welches Lehrkräfte als normative Zielsetzung in derartigen Programmen erlangen sollten. Solch ein spezielles Fachwissen wurde bisher weder beschrieben noch untersucht und lässt sich aufgrund der allgemeinen Domänenspezifität von Fachwissen nicht aus den Ergebnissen von anderen physikalischen Domänen übertragen.

Forschungsanliegen der Arbeit

Im Kontext des umrissenen Spannungsfelds beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Modellierung des Fachwissens, das Lehrkräfte speziell für den Unterricht teilchenphysikalischer Themen benötigen. Hierbei soll auf möglichst detailgetreue Weise der für Lehrkräfte relevante Ausschnitt desjenigen Fachwissens beschrieben werden, das auch Teilchenphysikforschende als die Expertinnen und Experten in ihrem Forschungsgebiet besitzen. Für die Modellierung wird zunächst theoretisch ein Strukturmodell zugrunde gelegt, welches das Fachwissen einer Lehrkraft als Produkt der Dimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* auffasst. Die beiden Dimensionen werden im vorgestellten Projekt getrennt modelliert durch die Identifikation bzw. Abgrenzung sowie durch die möglichst präzise Beschreibung von jeweiligen Subfacetten.

Die Frage nach den relevanten teilchenphysikalischen *Inhaltsbereichen* soll empirisch mithilfe einer Delphi-Studie beantwortet werden. In der Delphi-Studie wird die Expertise aller Personengruppen zusammengeführt, die in verschiedenen Kontexten mit Teilchenphysik und dem Schulunterricht Erfahrung besitzen. Die Modellierung der Dimension *Wissensarten* wird aufbauend auf den Ergebnissen der Delphi-Studie durchgeführt. Theoriegeleitet werden die etablierten teilchenphysikalischen Inhaltsbereiche noch einmal spezifisch für die Wissensarten deklaratives, prozedurales und konditionales Wissen präzisiert.

Auf Basis der Ergebnisse der Fachwissensmodellierung in der vorliegenden Arbeit können Empfehlungen zur strukturellen und inhaltlichen Konzeption von Bildungsprogrammen für (angehende) Lehrkräfte ausgesprochen werden. Darüber hinaus eignet sich das beschriebene Fachwissen ebenfalls als Diskussionsgrundlage für die zukünftige Definition von elaborierteren Bildungsstandards für die Teilchenphysik.

Aufbau der Arbeit

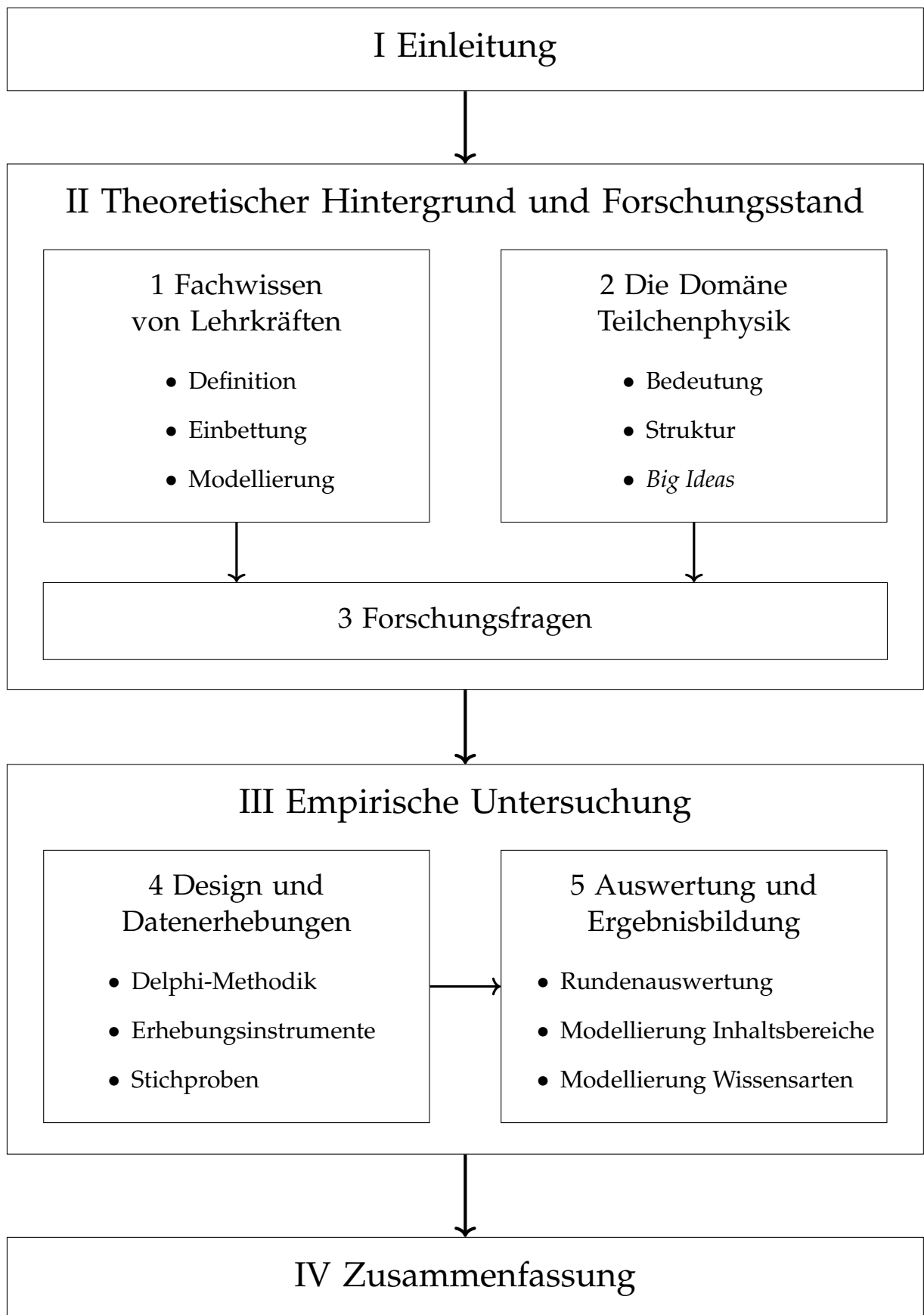
Die Arbeit ist in die vier Teile Einleitung, theoretischer Hintergrund, empirische Untersuchung und Zusammenfassung gegliedert (siehe Abbildung auf Seite 7).

In Teil II werden als theoretischer Hintergrund die relevanten Forschungsstände anhand der bestehenden Literatur in den Blick genommen. In Kapitel 1 wird zunächst das Konzept des Fachwissens von Lehrkräften definiert und gleichzeitig eingebettet

in die übergeordneten Modelle zur professionellen Kompetenz sowie zum Professionswissen. Anschließend wird der erziehungswissenschaftliche Forschungsstand zur Struktur des Fachwissens von Lehrkräften vorgestellt, wobei der Fokus auf Befunden zur Modellierung des Fachwissens von Physiklehrkräften liegt. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung des Modellierungsansatzes ab, der dieser Arbeit zugrunde liegt. In Kapitel 2 wird ein einführender Überblick über Bedeutung und Struktur der Domäne Teilchenphysik als wissenschaftliches Forschungsgebiet gegeben. Es werden weiterhin die aus fachwissenschaftlicher Perspektive bedeutendsten Theorien und Errungenschaften dieses Teilgebiets der modernen Physik beleuchtet. Das Kapitel dient zur Beschreibung der teilchenphysikalischen Grundlagen, die im Hinblick auf Verständnis und Einordnung der in den Erhebungsphasen dieser Arbeit auftauchenden Themen notwendig sind. Die beiden theoretischen Perspektiven zum Fachwissen von Lehrkräften und zur Teilchenphysik integrierend, werden die Ziele der vorliegenden Arbeit in Kapitel 3 in konkrete Forschungsfragen überführt.

Teil III umfasst die empirischen Umsetzungen des vorgestellten Dissertationsprojekts, mithilfe derer die Forschungsfragen beantwortet werden sollen. In Kapitel 4 werden nach einer Einführung in die Delphi-Methodik sowohl Details aus der Planungsphase wie auch aus der Durchführungsphase der Datenerhebungen berichtet. Hierbei werden insbesondere die in drei Befragungsrunden eingesetzten Instrumente sowie demographische Merkmale des ausgewählten Gremiums an Expertinnen und Experten vorgestellt, die an der Delphi-Studie teilgenommen haben. Im Fokus von Kapitel 5 stehen die Analyseschritte und Zwischenergebnisse, welche im Delphi-Forschungsdesign sukzessiv zur abschließend ebenfalls präsentierten Darstellung der finalen Modellierungsergebnisse beigetragen haben.

Ein Fazit der erzielten Modellierungsergebnisse in Form einer Zusammenfassung mit Diskussion sowie eines Ausblicks auf anknüpfende Studien beschließen die Arbeit in Teil IV.



Teil II

Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand

1

Fachwissen von Lehrkräften - Einbettung, Definition, Modellierung

Die Frage nach dem Professionswissen von Lehrkräften steht bereits seit längerer Zeit im Fokus der Lehrkräftebildungsforschung. Professionswissen bezeichnet aus Sicht der Expertiseforschung dasjenige Wissen, über welches Menschen zur erfolgreichen Bewältigung ihrer beruflichen Aufgaben verfügen müssen (Bromme, 1992). Im Fall einer Lehrkraft kann Erfolg über einen positiven, den Erwartungen entsprechenden Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler gemessen werden. Der positive Einfluss des Professionswissens einer Lehrkraft auf diesen Lernzuwachs wurde bislang in zahlreichen Studien bestätigt (vgl. Baumert & Kunter, 2011; Bromme, 1997; Helmke, 2009; [und speziell für das Fach Physik][Fischer2012).

Neben pädagogisch-psychologischem und fachdidaktischem Wissen gilt das Fachwissen als eine zentrale Komponente des Professionswissens einer Lehrkraft (vgl. Baumert & Kunter, 2006; Borko & Putnam, 1996; Bromme, 1997; Shulman, 1986).

Im folgenden Kapitel wird das Konstrukt *Fachwissen* vor dem Hintergrund des erziehungswissenschaftlichen Forschungsstands in den Blick genommen und - ausgehend von übergeordneten Konzepten - mit steigender Präzision beschrieben. Nach einer Einführung zum Konzept des *Professionswissens* im Rahmen allgemeiner Modelle zur *Kompetenz* von Lehrkräften (Kapitel 1.1) werden bekannte Ansätze zur Konzeptualisierung des Professionswissens diskutiert (Kapitel 1.2). Es folgt eine genaue Betrachtung verschiedener Modellierungsvorschläge für das Fachwissen als eines der zentralen, wiederkehrenden Elemente des Professionswissens (Kapitel 1.3). Modellierungsansätze zum Fachwissen von Physiklehrkräften stehen dabei im Vordergrund. Kapitel 1.4 fokussiert auf die Fachwissensmodellierung: Wie wird sie in dieser Arbeit definiert? Wie lässt sich daraus der Ansatzpunkt für das weitere methodische Vorgehen entwickeln?

1.1 Wissen als Teil professioneller Kompetenz

Menschen, die in der Bildungspolitik und -wissenschaft in Deutschland tätig sind, sehen sich aktuell mit der Aufgabe konfrontiert, wie Lehrkräftebildung neu gestaltet werden kann, um wirksamer zu sein. Lehrkräftebildung ist dann wirksam, wenn sie Lehrkräfte hervorbringt, die in der Lage sind, qualitativ zu unterrichten und effektiv Lernen bei Schülerinnen und Schülern anzubahnen. Ausgelöst wurde die Diskussion um eine wirksame Lehrkräftebildung zunächst durch die unerwartet schlechten Ergebnisse der deutschen Schülerinnen und Schüler bei der internationalen Schulleistungsuntersuchung PISA im Jahr 2000 (vgl. Artelt et al., 2001). Zusätzliche Bedeutung erhielt die Beschäftigung mit der Wirksamkeit durch die in unserem Land durchgeführten und noch anstehenden Umstrukturierungsmaßnahmen der Lehrkräftebildung als Folge der Bologna-Erklärung von 1999 zur Vereinheitlichung der Studiengänge- und Abschlüsse in Europa (Hohls, Schröder & Siegrist, 2005).

Im Zentrum der wissenschaftlichen Debatte steht die Frage, welches Wissen, welche Eigenschaften und welche Fähigkeiten solch eine „gute“ Lehrkraft besitzen und wie sie handeln sollte. Zusammengefasst werden diese Voraussetzungen vor allem im deutschsprachigen Raum unter dem Begriff der *Professionellen (Handlungs-) Kompetenzen*, die im weiteren Verlauf des Kapitels diskutiert werden.

Die Diskussion darüber, welches *Wissen* Lehrkräfte zur Ausübung ihres Berufs benötigen, existiert indes bereits länger. Prägend für diese Forschungsfrage sind die konzeptionellen Arbeiten von Shulman (1986, 1987). Er fordert, dass Lehrende zusätzlich zu den bis dato etablierten Wissensbereichen des *knowledge about the subject matter* (Wissen über ein fachliches Thema) und dem *general pedagogical knowledge* (allgemein-pädagogisches Wissen) über weitere Wissensdomänen verfügen müssen. Bahnbrechend ist Shulmans Einführung des *pedagogical content knowledge* (PCK, dt. meist fachdidaktisches Wissen), das er definiert als

„the particular form of content knowledge that embodies the aspects of content most germane to its teachability (...) [It includes] the ways of representing and formulating the subject that make it comprehensible to others.“ (Shulman, 1986, S. 7)

Die Wissensdomäne PCK umfasst demnach ein dem Lehrberuf eigenes Repertoire an Methoden und Strategien zur Darstellung und Formulierung von Inhalten, die ein Verstehen auf Lernendenseite ermöglichen. Heute wird vielfach retrospektiv argumentiert, dass sich mit diesem neuen Blick auf konkret für den Unterricht benötigte

Fertigkeiten auch die Ausrichtung der Forschung zum Wissen von Lehrkräften veränderte (z.B. Fischer, Borowski & Tepner, 2012). Zuvor standen die persönlichen Eigenschaften bzw. mitgebrachten Voraussetzungen im Fokus des Interesses. Diese Forschungsperspektive wird unter dem Begriff des *Persönlichkeitsparadigmas* zusammengefasst (vgl. Bromme, 1997). Shulman initiierte eine Verschiebung des Fokus auf die Analyse dessen, was tatsächlich an Wissen und Können für den Unterricht erforderlich ist; man spricht vom *Expertenparadigma*, da als normativer Maßstab das Wissen und Können erfolgreich unterrichtender Lehrkräfte herangezogen werden. In diesem Zusammenhang wurde der aus der Expertiseforschung bekannte Begriff des *Professionswissens* als das zur Bewältigung der beruflichen Aufgaben benötigte Wissen von Bromme (1992) speziell für den Lehrberuf beschrieben (siehe Kapitel 1.2 dieser Arbeit). Ebenfalls bezogen auf den Lehrberuf nehmen Klieme und Leutner (2006) an, dass das Professionswissen als Leistungsdisposition vom Kontext bzw. der Domäne abhängig ist, in der unterrichtet wird, und sich prinzipiell von Personen angeeignet und auch weitergegeben werden kann.

Heutzutage wird das professionelle Wissen einer Lehrkraft in allumfassendere Kompetenzmodelle eingeordnet, welche über das reine Wissen hinaus wieder persönlichkeitsnahe Aspekte wie z.B. persönliche Überzeugungen zum Lehren und Lernen und auch handlungsnahe Fertigkeiten mit einschließen. Weinert (2001) führte den Begriff der *Kompetenz* im Kontext von Leistungsmessungen an Schulen ein und definiert ihn folgendermaßen:

„[Kompetenzen sind] die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können.“ (Weinert, 2001, S. 27)

Es handelt sich demnach insbesondere um Fähigkeiten und Fertigkeiten, die sich in realen Situationen bei eingesetzten Handlungsweisen zum erfolgreichen Problemlösen manifestieren. Um den handlungsnahen Aspekt von Kompetenzen zu verdeutlichen, verwendet Weinert den Begriff der *Handlungskompetenz*.

Den Gedanken aufgreifend, wird auch in der Lehrkräftebildungsforschung versucht, output-orientierte Kompetenzen von Lehrkräften - in diesem Fall nicht als Voraussetzung zum Problemlösen, sondern für erfolgreiches Unterrichten - zu beschreiben und zu untersuchen. Um das jeweilige Verständnis des Kompetenzbegriffs

zu verdeutlichen, um dessen Struktur zu beschreiben und für systematische Kompetenzmessungen operationalisieren zu können, verwenden viele Autorinnen und Autoren Kompetenzmodelle, die unterschiedliche Bereiche umfassen (vgl. Baumert & Kunter, 2006; Gess-Newsome, 2015; Leuders, Nückles, Mikelskis-Seifert & Philipp, 2015b; Krauss, Lindl, Schilcher & Tepner, 2017; und speziell für das Fach Physik Sorge, Kröger & Neumann, 2017). Je nach Zweck und Inhalt der postulierten und mitunter empirisch zu prüfenden Strukturmodelle werden dabei verschiedene, teilweise nur marginal veränderte, Definitionen ähnlicher Kompetenzfelder verwendet. Das Professionswissen bildet hier keine Ausnahme und wird nachfolgend am Beispiel verschiedener Kompetenzmodelle beschrieben.

Für ihr *Modell professioneller Handlungskompetenz* schließen sich Baumert und Kunter (2006) zunächst der Definition von Handlungskompetenz nach Weinert (2001, siehe oben) an. Das Novum der Arbeit von Baumert und Kunter für den deutschsprachigen Raum¹ besteht darin, pragmatische Anforderungsanalysen an die Hauptaufgaben im Lehrberuf mit einem allgemein-gültigen, theoretisch hergeleiteten Professionswissensmodell zu verbinden. Innerhalb des resultierenden Modells setzt sich professionelle Handlungskompetenz aus den vier in Abb. 1.1 dargestellten Kompetenzfeldern *Professionswissen*, *Überzeugungen und Werthaltungen*, *Motivationale Orientierungen* und *Selbstregulative Fähigkeiten* zusammen. Das Modell diene unter anderem als theoretisches Fundament für die COACTIV-Studie zur Erfassung des Professionswissens von Mathematiklehrkräften (Kunter, Baumert, Blum & Neubrand, 2011) und für das interdisziplinäre Projekt FALKO zur Erforschung fachspezifischer Lehrerkompetenzen (Krauss et al., 2017, siehe Kapitel 1.3).

Im Rahmen des von Baumert und Kunter vorgeschlagenen Modells wird das Kompetenzfeld *Professionswissen* definiert durch die deklarativen, prozeduralen und konditionalen Wissensbereiche, in denen es sich manifestiert (siehe Kapitel 1.2). Im Kontext allgemeiner Kompetenzmodelle lässt sich das Professionswissen somit sowohl dem *Wissen*, als auch dem *Können* von Lehrkräften zuordnen und wird streng abgegrenzt von Werthaltungen und Überzeugungen.

Teile der Autorenschaft weichen die Trennung jedoch auf. So erweitern Leuders, Nückles, Mikelskis-Seifert und Philipp (2015a) das Konzept des *fachbezogenen Wissens* als Teil des Professionswissens von Lehrkräften um diejenige Form von persönlichen Überzeugungen, die sich auf Entstehung und Struktur von Wissen innerhalb einer Wissenschaftsdomäne beziehen, sprich den *epistemologischen Überzeugungen*.

¹ Im anglo-amerikanischen Raum existierten bereits entsprechende Ansätze, auf die sich Baumert und Kunter auch beziehen (siehe z.B. Bransford, Darling-Hammond & LePage, 2005).

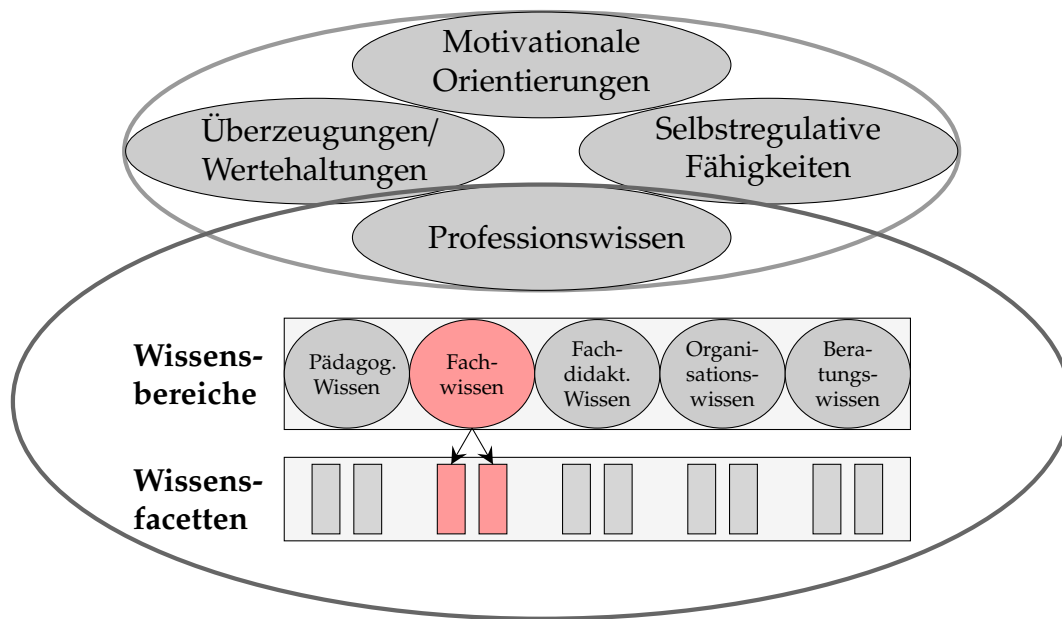


Abbildung 1.1: Das Modell professioneller Handlungskompetenz (vgl. Baumert & Kunter, 2006, S. 482)

In jüngster Zeit entsteht zunehmend Kritik an Kompetenzdefinitionen, die ausschließlich kognitive Voraussetzungen von Lehrkräften beschreiben. Hierzu zählt ungeachtet der Bezeichnung als *Handlungskompetenz* auch das Modell von Baumert und Kunter. Neuere Arbeiten versuchen neben kognitiven Dispositionen nicht nur handlungsnahen Fertigkeiten, sondern direkt unterrichtliche *Performanz* in Kompetenzmodellen zu integrieren und zu messen (z.B. Blömeke, Gustafsson & Shavelson, 2015; Gess-Newsome, 2015; und speziell für das Fach Physik Vogelsang, 2014). Die Performanz von (angehenden) Lehrkräften wird dabei beispielsweise im Projekt *ProfiLe-P+* in den Tätigkeitsfeldern *Unterrichtsplanung*, *Unterrichtsreflexion* und *Erklären* modelliert und beobachtet (Vogelsang et al., 2016). Der Übergang zwischen Dispositionen und Performanz wird in den beschriebenen Modellen mehr oder weniger fließend modelliert und in vielen Fällen liegen noch keine Ergebnisse zum Wirkungszusammenhang vor.

Es stellt sich nun die Frage, bei welcher Form der beschriebenen Kompetenzmodelle sich die vorliegende Arbeit theoretisch verorten lässt. Fokussiert wird im Rahmen des Projekts auf die Modellierung des teilchenphysikalischen Fachwissens als Teil des Professionswissens. Fachwissen wird nach dem weit verbreiteten Konsens vorwiegend der von Fenstermacher (1994) gegebenen Definition von *theoretisch-formalem Wissen* zugeordnet und nicht dem *praktischen Wissen und Können* (vgl. z.B. Bau-

mert & Kunter, 2006). Es wird daher für die folgende Arbeit und im Speziellen für die anschließende Diskussion zur Konzeptualisierung des Professionswissens ein Schwerpunkt auf theoretisch-formale Auffassungen des Professionswissen als kognitive Disposition ähnlich der Konzeption von Baumert und Kunter (2006) gelegt. Zusammenhänge zu beobachtbaren unterrichtlichen Tätigkeiten lassen sich erst beschreiben, nachdem die Struktur des bei Lehrkräften vorausgesetzten Fachwissens in Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde.

1.2 Konzeptualisierung des Professionswissens von Lehrkräften

Einer der bis heute meist zitierten Ansätze zur Konzeptualisierung des professionellen Wissens von Lehrkräften wurde von Shulman (1987) entwickelt. Er forderte, dass die Grundlage des Wissens von Lehrkräften mindestens sieben relevante Dimensionen umfasst: (I) *content knowledge* (Fachwissen), (II) *general pedagogical knowledge* (allgemein-pädagogisches Wissen), (III) *curriculum knowledge* (Wissen über das Schulcurriculum), (IV) *pedagogical content knowledge* (fachdidaktisches Wissen), (V) *knowledge of learners and their characteristics* (Wissen über die Lernenden), (VI) *knowledge of educational context* (Wissen über den schulischen Kontext) und (VII) *knowledge of educational ends, purposes and values* (Wissen über Zweck, Ziele und Werte von Unterricht). Dagegen leitet Bromme (1997) aus der diskutierten Anforderungsanalyse an den Lehrberuf die fünf Dimensionen des (I) *Fachlichen Wissens*, des (II) *Curricularen Wissens*, der (III) *Philosophie des Schulfachs* (Wissen über Nutzen für Bildung und weitere Lebensbereiche), des (IV) *Pädagogischen Wissens* sowie des (V) *fachspezifischen pädagogischen Wissens* (vergleichbar mit fachdidaktischem Wissen) für das Professionswissen ab. In jüngerer Zeit ergänzten Baumert und Kunter (2006) die drei Komponenten des (I) *Generischen Pädagogischen Wissens*, des (II) *Fachwissens* und des (III) *Fachdidaktischen Wissens* um die beiden Bereiche des (IV) *Organisationswissens* als Wissen über die Funktion und Ablauf des Schulsystems und des (V) *Beratungswissens* als Wissen über adressatenspezifische Beratung aller Akteure im Schulkontext (siehe Abbildung 1.1).

Wie diese Beispiele illustrieren, existiert keine einheitliche Auffassung zur Konzeptualisierung des professionellen Wissens von Lehrkräften. Als kleinster gemeinsamer Nenner werden jedoch in jeglicher Übersichtsliteratur die *drei Kerndimensionen* des *allgemein-pädagogischen Wissens* (APW), des *Fachwissens* (FW) und des *fachdidakti-*

schen Wissens (FDW) berücksichtigt (z.B. Abell, 2007; Baumert & Kunter, 2006; Borko & Putnam, 1996; Lipowsky, 2006; und explizit für die Naturwissenschaften Tepner et al., 2012). Weitestgehend unabhängig von diesen Forschungsergebnissen findet sich die Dreiteilung nebenbei bemerkt auch in der Struktur der Lehramtsausbildung an den deutschen Hochschulen wieder.

Die drei Dimensionen werden nachfolgend in knapper Form definiert, ihre Rollen im Hinblick auf die beruflichen Aufgaben einer Lehrkraft hervorgehoben und für APW und FDW werden die aktuell relevanten Modellierungsansätze zur Identifikation von Subfacetten gegeben. Eine ausführliche Diskussion zur Modellierung des Fachwissens (FW) findet sich in Kapitel 1.3.

Allgemein-pädagogisches Wissen (APW)

Shulman (1986) definiert *pedagogical knowledge of teaching* (unterrichtsbezogenes pädagogisches Wissen) als Wissen über diejenigen allgemeinen Grundlagen einer Lehrkraft, die u.a. die *Organisation von Unterricht* und die *Klassenführung* betreffen. Weiter gefasst verstehen Baumert und Kunter (2006) *allgemein-pädagogische Kompetenzen* als dasjenige pädagogische Wissen und Können, das alle Lehrkräfte unabhängig vom Schulfach, in dem sie unterrichten, besitzen müssen. Sie identifizieren (I) *Unterrichtsführung und Orchestrierung von Lerngelegenheiten*, (II) *konzeptuelles bildungswissenschaftliches Grundlagenwissen*, (III) *allgemein-didaktisches Konzeptions- und Planungswissen* sowie (IV) *fächerübergreifende Prinzipien des Diagnostizierens, Prüfens und Bewertens* als Teile der allgemein-pädagogischen Kompetenzen. Nach Voss, Kunter und Baumert (2011) spielt das APW der Lehrkräfte vor allem bei der Erschaffung lernförderlicher Unterrichtsumgebungen unabhängig von der Fachspezifität eine Rolle.

Die Ansätze zur Modellierung von Subfacetten innerhalb des APW sind mannigfaltig. Besonders einflussreich sind bis heute die Konzeptionen von Borko und Putnam (1996), die folgende Komponenten beschreiben: (I) *Wissen über Klassenführung*, (II) *Instruktionsstrategien zur Durchführung von Unterricht und zur Schaffung von Lerngelegenheiten* sowie (III) *Wissen über die Lernenden, wie sie lernen und wie das Lernen durch Unterricht gefördert werden kann*. Baumert und Kunter (2006) unterteilen die vier zuvor genannten Bereiche ebenfalls weiter in mehrere Unterfacetten ein, merken jedoch an, dass diese Facetten einen unterschiedlich starken Bezug zum tatsächlichen Unterrichtsgeschehen besitzen und daher zum Teil nicht direkt beobachtet bzw. gemessen werden können. Ein Modellierungsansatz, der durch seinen direkten Unterrichtsbezug zur Operationalisierung im Rahmen von Testentwicklungen verwendet

werden kann, beruht auf der Arbeit von Voss et al. (2011). Hier werden die Subfacetten Wissen über *Klassenführung*, über *Lehrmethoden*, über *Leistungsbeurteilung*, über *Lernprozesse* und über *Dispositionen der Lernenden* identifiziert. Zusammenfassend stellt das APW eine zentrale Dimension des Professionswissens einer Lehrkraft dar, das sich durch Wissen über Strategien und Methoden zur Durchführung eines fachunabhängig lernförderlichen Unterrichts auszeichnet.

Fachwissen (FW)

Trivialerweise lässt sich feststellen, dass eine Person Fachwissen besitzt, sobald sie über *Wissen* bezüglich eines *Fachs* verfügt. Der Begriff *Fach* kann sich dabei neben dem Bezug auf eine wissenschaftliche Forschungsdomäne auch auf ein Schulfach beziehen, welches im Schulkontext die Domäne repräsentiert. Demnach besitzen sowohl Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler als auch Lehrkräfte Fachwissen, wobei sich das Wissen der beiden Professionen überschneidet, jedoch in Art und Umfang voneinander abweicht.

Es erscheint logisch, dass das Fachwissen einer Lehrkraft zumindest den stofflichen Inhalt des Schulfachs vollständig abdecken muss, damit die Person in angemessener Weise Unterricht vorbereiten und durchführen kann. Bezogen auf das Fach Physik argumentieren Woitkowski und Borowski (2017) überdies, dass Lehrkräfte zusätzlich zu einer Beherrschung des Schulstoffs über weiteres Fachwissen verfügen müssen. In Anbetracht der unzureichenden Befundlage zur alleinigen Wirkung des physikalischen Fachwissens einer Lehrkraft auf die Leistung der Schülerinnen und Schüler (Cauet, 2016), lassen Woitkowski und Borowski jedoch frei, wie viel und welche Form des zusätzlichen Wissens wirklich von Vorteil ist. Es konnte indes bereits gezeigt werden, dass ein hohes Maß an *fachbezogenem Wissen* (Fachwissen kombiniert mit fachdidaktischem Wissen) mit einem Leistungszuwachs der betreffenden Schülerinnen und Schüler zusammenhängt (Hill, Rowan & Ball, 2005). Auf dieser Basis erachten auch Baumert und Kunter (2006) ein fundiertes Fachwissen wenn auch nicht als hinreichende, so doch als notwendige Voraussetzung für die Gestaltung eines qualitätsvollen Unterrichts.

Riese und Reinhold (2010) charakterisieren das Fachwissen speziell von Physiklehrkräften in Anlehnung an die Konzeptionen der COACTIV-Studie (Krauss et al., 2008). Sie weisen darauf hin, dass zusätzlich zu einem Repertoire an physikalischen Inhalten und Konzepten für den Unterricht auch Wissen über Bedingungen und Verknüpfungen dieser Inhalte relevant ist. Letzteres kann nach Ansicht der

Autoren nur von einem höheren fachlichen Niveau aus erreicht werden, das einen Überblick erlaubt. Grossman, Schoenfeld und Lee (2005) fordern darüber hinaus ein erweitertes Fachwissen, das Lehrkräfte auf längerfristige Sicht befähigt, kommende Entwicklungen der wissenschaftlichen Domäne zu verstehen und in ihren Unterricht zu integrieren. Ein ähnlicher Grundsatz findet sich auch in den von der Kultusministerkonferenz entwickelten Standards für die Lehrerbildung im Fach Physik, die Folgendes statuieren:

„[Die angehenden Lehrkräfte sollten] über anschlussfähiges physikalisches Fachwissen [verfügen], das es ihnen ermöglicht, Unterrichtskonzepte und -medien fachlich zu gestalten, inhaltlich zu bewerten, neuere physikalische Forschung in Übersichtsdarstellungen zu verfolgen und neue Themen in den Unterricht einzubringen.“ (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2017, S.50)

Neben der reinen Menge an Wissen über Fakten und Konzepten einer Domäne, charakterisiert Shulman (1986) Fachwissen auch bezüglich der Art der Wissensorganisation. In Anlehnung an Schwab (1978) postuliert er, dass das Fachwissen von Lehrkräften derart organisiert sein muss, dass sowohl alle grundlegenden Konzepte in einem Gesamtbild integriert sind (*substantive structure*) als auch Wissen darüber vorhanden ist, wie ein Konzept generiert wurde und unter welchen Umständen es Gültigkeit besitzt (*syntactic structure*).

Weiterführende Modellierungen des Fachwissens in Subfacetten, die über eine Unterteilung in semantische und syntaktische Strukturen hinausgehen - und wie sie durch die rot gefärbten Bereiche in Abbildung 1.1 angedeutet werden - sind ausführlicher Untersuchungsgegenstand von Kapitel 1.3.

Fachdidaktisches Wissen (FDW)

Das fachdidaktische Wissen (FDW, engl. urspr. *pedagogical content knowledge*, PCK) als dritte zentrale Dimension des Professionswissens von Lehrkräften wurde, wie bereits erwähnt, von Shulman (1986) eingeführt. Er beschrieb PCK als ein dem Lehrberuf eigenes Wissen über Methoden und Strategien zur adressatenspezifischen Darstellung und Formulierung von Inhalten und fasste das Konstrukt zunächst als Komponente des Fachwissens auf. In einer Weiterentwicklung des Konstrukts charakterisiert Shulman (1987) PCK als den Kern des Professionsverständnisses von Lehrkräften und setzt dafür einen eigenständigen Wissensbereich an, der sich jedoch aus dem

Fachwissen und dem allgemein-pädagogischen Wissen speist. Seitdem wurde *PCK* bzw. *FDW* in zahlreichen konzeptionellen und experimentellen Arbeiten als ein gesonderter Wissensbereich von Lehrkräften aufgefasst (vgl. Baumert & Kunter, 2006; Borko & Putnam, 1996; Depaepe, Verschaffel & Kelchtermans, 2013; Riese & Reinhold, 2012).

Für die Modellierung von *FDW* nehmen Baumert und Kunter (2006) eine Aufteilung in die drei Subfacetten (I) *Wissen über didaktisches und diagnostisches Potenzial von Aufgaben*, (II) *Wissen über Schülerkognitionen und fachliche Fehlvorstellungen* und (III) *Wissen über Repräsentations- und Erklärungsmöglichkeiten* an. Die darauf aufbauenden Studien *COACTIV* (Kunter et al., 2011) und *FALKO* (Krauss et al., 2017) legen im Rahmen ihrer Testkonstruktionen den Fokus auf die beiden letztgenannten Facetten.

Für die Naturwissenschaften besteht bislang keine finale Einigkeit über die Modellierung des *FDW* im Rahmen umfassenderer Professionswissensmodelle (Leuders et al., 2015a; Riese et al., 2015). So werden z.B. im Verbundprojekt *ProfiLe-P* (Riese et al., 2015), aufbauend auf der Arbeit von Gramzow, Riese und Reinhold (2013), die Facetten des (I) *Wissen über Instruktionsstrategien*, (II) *Wissen über Schülervorstellungen*, (III) *Wissen über Experimente* und (IV) *Wissen über fachdidaktische Konzepte* innerhalb des physikdidaktischen Wissens identifiziert. Dem gegenüber nimmt das Kooperationsprojekt *ProMatNat* (Leuders et al., 2015a), aufbauend auf den Konzeptionen von Borko und Putnam (1996), eine Modellierung in folgende Facetten vor: (I) *Wissen über Struktur und Bedeutung der Fachinhalte*, (II) *Wissen über das Curriculum*, (III) *Wissen über inhaltspezifische Lernprozesse und Schülervorstellungen* sowie (IV) *Wissen über Instruktionsmethoden und Repräsentationen*.

Es ist anzumerken, dass insbesondere im anglo-amerikanischen Raum und für das Fach Mathematik vielfach keine A-priori-Trennung von Fachwissen und *FDW* erfolgt (Krauss et al., 2011). Begründet durch einen gemeinsamen Fachbezug wird vielmehr in der Tradition von Shulman (1986) ein Konstrukt des *fachbezogenen Wissens* angenommen, welches beide Wissensbereiche miteinschließt. Im Rahmen dieser Arbeit soll kein Urteil über die Sinnhaftigkeit einer Nicht-Trennung der Dimensionen getroffen werden und Modellierungen zum fachbezogenen Wissen werden gemeinsam mit denjenigen zum Fachwissens im nächsten Unterkapitel diskutiert.

Generell werden die drei Komponenten allgemein-pädagogisches, fachdidaktisches und Fachwissen vor allem im deutschsprachigen Raum heute als unterschiedliche Wissensbereiche aufgefasst, die jedoch durchaus miteinander korrelieren (Kirschner, 2013; Kirschner, Borowski, Fischer, Gess-Newsome & von Aufschnaiter, 2016).

Insbesondere heben Baumert und Kunter (2006) die Abhängigkeit eines flexiblen fachdidaktischen Handlungsrepertoires von einem breiten und tiefen Fachwissens der Lehrkraft hervor. Auch empirisch konnte mehrfach gezeigt werden, dass physikalisches Fachwissen als eine Voraussetzung für physikdidaktisches Wissen angesehen werden kann (Kirschner et al., 2016; Riese & Reinhold, 2010; Riese & Reinhold, 2012). Es lohnt demnach im Folgenden der genauere Blick auf das Konstrukt Fachwissen.

1.3 Fachwissensmodellierung

Wie Riese (2009) feststellt, lassen sich Kompetenzstrukturen im Allgemeinen und die Struktur des Professionswissens von Lehrkräften im Besonderen mithilfe unterschiedlicher Herangehensweisen beschreiben und untersuchen (vgl. auch Klieme et al., 2003; Schaper, Fuchs, Wüsten, Sandmann & Neuhaus, 2009; Terhart, 2002). Bei der Wahl eines *normativ-deduktiven Ansatzes* wird in der Regel aus der Theorie bzw. aus den betreffenden festgelegten Standards ein möglichst ausdifferenziertes Rahmenmodell abgeleitet. Auf Basis dieses Modells können im Anschluss mehr oder weniger systematisch Testitems für die einzelnen Kompetenzfacetten bzw. Wissensbereiche erstellt werden. Hierbei handelt es sich um ein Vorgehen, das auf eine Modellprüfung abzielt.

Dahingegen werden bei Verwendung eines *empirisch-induktiven Ansatzes* vor einer Testentwicklung wenige A-priori-Annahmen über die Feinstruktur von Kompetenzen bzw. Wissensbereichen aufgestellt. Subfacetten werden hierbei mithilfe statistischer Methoden aus den Daten herauskristallisiert und dienen als Bausteine bei der Konstruktion eines Strukturmodells.

Für die strukturbildende Modellierung des Fachwissens in der vorliegenden Arbeit erscheint ein normativ-deduktives Vorgehen geeignet. Bei dieser Untersuchung der Fachwissensstruktur können statt auf statistischer Ebene stärker auf inhaltlicher Ebene Unterschiede zwischen Wissensfacetten beschrieben werden. Ein empirisch-induktives Vorgehen erscheint dagegen wenig zielführend, da etwaige statistische Ergebnisse zu Unterschieden zwischen Testitems nicht sicher inhaltlich interpretiert bzw. zugeordnet werden könnten. Für eine solche Zuordnung existiert bislang noch zu wenig Wissen über die Struktur des Fachwissens speziell in der Teilchenphysik (siehe unten).

Unabhängig von der Vorgehensweise bei der Entwicklung, sind alle strukturbildenden Modelle zum Professionswissens von Lehrkräften zunächst einmal gekenn-

zeichnet durch die in Kapitel 1.2 diskutierte Konzeptualisierung in verschiedene Wissensdimensionen. Der Logik des vorliegenden Theoriekapitels folgend, soll nun ein genauerer Blick auf detailliertere Modellierungen des Fachwissens von Lehrkräften geworfen werden. Charakterisierend für die vorhandenen Modellierungen ist die parallele Anwendung verschiedener Klassifikationsweisen, im Rahmen derer jeweils weitere Subfacetten identifiziert werden. Zu den Klassifikationsweisen zählen Unterteilungen in verschiedene *Inhaltsbereiche*, in verschiedene *Wissensarten*, in verschiedene *Wissensstufen* sowie weitere vor allem zur Konstruktion von Testaufgaben verwendete schwierigkeiterzeugende Aspekte wie *kognitive Aktivität* oder *Komplexität*.

In den folgenden Abschnitten werden die genannten Klassifikationsweisen am Beispiel wegweisender Studien aus den Bereichen der Mathematik sowie der Naturwissenschaften diskutiert. Ein Fokus liegt dabei auf den in Abbildung 1.2 dargestellten Fachwissensmodellen, welche im Rahmen der folgenden vier Projekte explizit das *physikalische Fachwissen* in den Blick nehmen:

- Im Projekt **ProwiN** (Tepner et al., 2012) wird das Professionswissen von Lehrkräften in den naturwissenschaftlichen Fächern untersucht. Das Fachwissen wird dabei in erster Linie in den Subdimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* modelliert, wobei die konstruierten Testitems unsystematisch Fachwissen auf Schulniveau und auf erweitertem Schulniveau erfassen (siehe Abbildung 1.2a). Als ein Projektziel konnte für das Fach Physik eine vierdimensionale Struktur für das Professionswissen aufgeklärt werden (Kirschner, 2013), welche die Dimensionen *FW*, *FDW*, *APW_d* (deklaratives allgemein-pädagogisches Wissen) und *APW_{pk}* (prozedural-konditionales allgemein-pädagogisches Wissen) umfasst (siehe Erläuterung in Abschnitt 1.3.2).
- In der **Paderborner Arbeitsgruppe** zielt Woitkowski (2015) auf die Entwicklung eines Kompetenzstrukturmodells des fachlichen Wissens in der Physik ab und nimmt dabei sowohl Lehramts- als auch Physikfachstudierende in den Blick. In Erweiterung an das *Paderborner Instrument* (Riese, 2009) wird das physikalische Fachwissen bei Woitkowski in differenzierterem Maß untersucht. Das Teilmodell *Nutzung von Fachwissen* sieht dabei eine dreidimensionale Struktur (*Inhaltsbereich*, *Fachstufen*, *Hierarchische Komplexität*) mit jeweils mehreren Subfacetten vor (Abbildung 1.2b). Die Unterstruktur in den drei Subdimensionen konnte jedoch in keinem Fall empirisch gegenüber eindimensionalen Konstrukten bestätigt werden (Woitkowski & Riese, 2017).

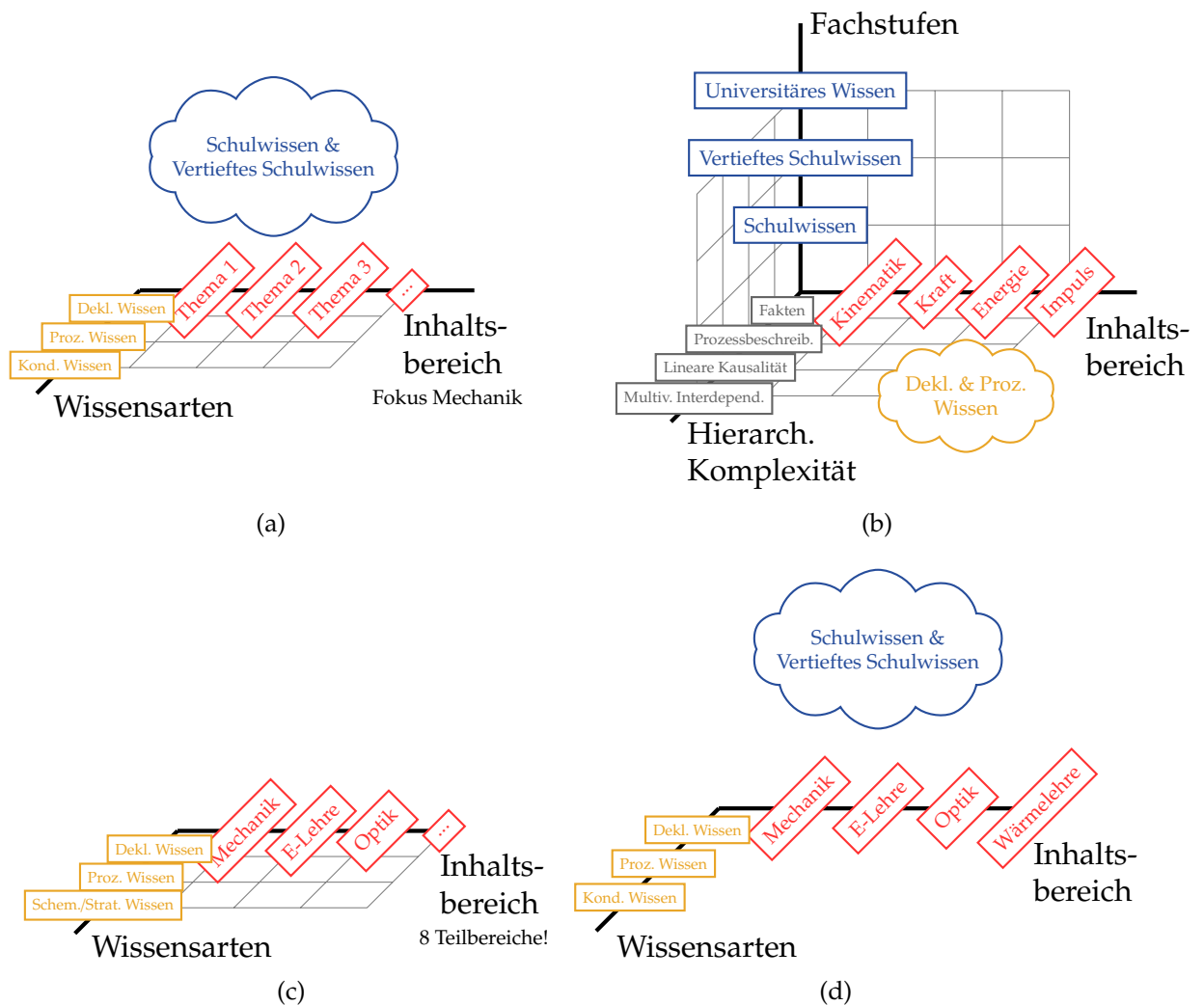


Abbildung 1.2: Modelle zum physikalischen Fachwissen: a) Projekt *ProwiN* (Tepner et al., 2012), b) Modell *Nutzung von Fachwissen* (vgl. Woitkowski, 2015, S.122), c) Projekt *KiL* (Kröger, Euler, Neumann & Petersen, 2012) und d) Teilprojekt *FALKO-P* (Schödl & Göhring, 2017). Modelle werden nicht immer vollständig systematisch operationalisiert (siehe Text).

- Das Projekt **KiL** (Kröger, Euler, Neumann & Petersen, 2012) beabsichtigt die Erstellung eines Itemstamms zur systematischen Erfassung des Professionswissens von Lehramtsstudierenden in den Naturwissenschaften in den Dimensionen *FW* und *FDW*. Für das Fach Physik wird das Fachwissen in den Subdimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* untersucht, wobei der Inhaltsbereich umfassend in verschiedenen physikalischen Teildisziplinen modelliert wird (Abbildung 1.2c). Es konnte gezeigt werden, dass *FW* und *FDW* eigenständige, jedoch zusammenhängende Konstrukte sind, deren Korrelation im Laufe des Studiums zunimmt (Sorge, Kröger, Petersen & Neumann, 2017).
- Im Teilprojekt **FALKO-P** (Schödl & Göhring, 2017) steht die Untersuchung des fachbezogenen Professionswissens von Sekundarstufenlehrkräften im Fach Physik im Vordergrund. Dem Projekt liegt das *COACTIV*-Rahmenmodell (Baumert et al., 2011) zugrunde. Es werden für das Fachwissen sowohl verschiedene *Inhaltsbereiche* als auch *Wissensarten* (Abbildung 1.2d) modelliert, wobei beide im Rahmen der Testkonstruktion nicht systematisch variiert werden. Es konnte ein weiteres Mal sowohl die Eigenständigkeit als auch ein Zusammenhang von *FW* und *FDW* gezeigt werden.

Im Folgenden wird aufgezeigt, dass die genannten Projekte bei der Fachwissensmodellierungen unterschiedlich stark auf eine Feinstrukturierung der verschiedenen Wissensdimensionen des physikalischen Fachwissens fokussieren. Allen Projekten gemein ist die Ausrichtung auf eine statistische Prüfung der Modelle, wobei generell auf eine empirische Trennung von *FW* und *FDW* abgezielt wird. Ausgenommen der Arbeit von Woitkowski (2015) steht bei keinem der Projekte eine Aufklärung der Binnenstruktur des Fachwissens im Vordergrund. Genau diese Binnenstruktur soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch für die Teilchenphysik untersucht werden. Es bleibt deshalb zunächst einmal fraglich, in wie weit die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen verfügbaren Fachwissensmodellierungen für die vorliegende Arbeit genutzt bzw. übertragen werden können.

1.3.1 Inhaltsbereich

Obgleich Fachwissen im Allgemeinen als domänenspezifisch gilt, lässt sich bei einer Prüfung der genannten Projekte feststellen, dass physikalisches Fachwissen auf Inhaltsebene in vielen Fällen entweder ausschließlich oder mit starkem Fokus in der Domäne *Mechanik* modelliert und gemessen wird. Aufbauend auf der Arbeit von

Riese (2009), wird die wiederholte Wahl für Mechanik in der Regel durch ihre Bedeutung als guter Prädiktor für physikalisches Wissen (Friege & Lind, 2004) begründet. Als Argument für die prädiktive Fähigkeit wird die starke Kumulativität des Physiklernens (Schecker & Parchmann, 2006) angeführt, welche sich in der Praxis durch eine Organisation der Schul- und der universitären Curricula in Physik aufbauend auf einer Einführung in die Domäne Mechanik manifestiert.

Beispielweise fokussiert das Projekt *ProwiN* auf den Inhaltsbereich Mechanik, es werden jedoch keine Subfacetten modelliert. Dennoch findet für die Konstruktion von Testitems auf Schulniveau eine Auswahl mechanischer Themenkomplexe statt. Die Auswahl basiert auf den *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss* (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2005). Für die Items auf vertieftem Schulniveau (siehe unten) werden zusätzlich die *Einheitlichen Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik* (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2004) sowie Einführungsliteratur für das Bachelorstudium der Physik (Tipler & Mosca, 2004) zurate gezogen. Die Auswahl der Themen diene im Rahmen des Projekts als Orientierung, auf Basis derer Expertinnen und Experten (Fachleitende, erfahrene Lehrkräfte, Fachdidaktikerinnen und Fachdidaktiker) gebeten wurden, die Testaufgaben für den Fachwissenstest zu erstellen.

Im Gegensatz dazu werden in Woitkowskis Modell *Nutzung von Fachwissen* a priori die Subfacetten *Kinematik, Kraft, Energie und Impuls* für den Inhaltsbereich Mechanik vorgeschlagen und systematisch operationalisiert. Die Auswahl der Facetten basiert auf der Arbeit von Riese (2009), der die Subthemen als Basiskonzepte mithilfe eines Vergleichs von typischen Inhaltsbereichen aus Physikvorlesungen mit denjenigen aus den *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss* (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2005) und mit denjenigen aus Voruntersuchungen zum Vorverständnis der Lernenden identifizierte.

Das Projekt *KiL* zielt für den Inhaltsbereich des Fachwissens über den Bereich Mechanik hinaus auf eine umfassende Modellierung aller schulrelevanten physikalischen Domänen ab. Auf Basis einer Analyse der Curricula für das Lehramtsstudium an 16 deutschen Hochschulen und eines Vergleich mit den *ländergemeinsamen inhaltlichen Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung* (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2017) werden die acht Domänen *Mechanik, Elektrizitätslehre, Optik, Thermodynamik, Festkörperphysik, Atom- und Kernphysik, Relativitätstheorie* sowie *Quantenmechanik*

ausgewählt. Eine Subdimensionierung der genannten Bereiche findet nicht statt. Neben der Verwendung veröffentlichter Testaufgaben aus anderen Studien wurde im Projekt für die Itementwicklung Expertise aus der Fachwissenschaft und der Fachdidaktik zu Rate gezogen. Die Expertinnen und Experten sollten für die fehlenden physikalischen Domänen Aufgaben entwickeln, um das Fachwissen möglichst gleichmäßig in allen Inhaltsbereichen erfassen zu können.

Schließlich wurden für den Fachwissenstest im Projekt *Falko-P* Aufgaben für die vier Inhaltsbereiche *Mechanik*, *Elektrizitätslehre*, *Optik* und *Wärmelehre* entwickelt. Die Auswahl der Inhaltsbereiche wird durch ihren großen Anteil im Schulcurriculum der Sekundarstufe I (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2005) begründet. Die Konstruktion der Testaufgaben basiert unter anderem auf den verschiedenen bereits genannten deutschen Bildungsstandards sowie auf gängiger fachwissenschaftlicher Einführungsliteratur (z.B. Tipler, Baumgartner, Gedieh & Götz, 1994). Es ist anzumerken, dass die verschiedenen Inhaltsbereiche im Projekt weder getrennt voneinander modelliert, noch systematisch bei der Testentwicklung variiert wurden.

Zusammenfassend lässt sich bereits hier festhalten, dass keines der Projekte die Domäne Teilchenphysik als Inhaltsbereich berücksichtigt. Des Weiteren erscheint es auffallend, dass in wenigen Fällen für die untersuchten physikalischen Domänen eine Einteilung in Basiskonzepte bzw. Kernideen durchgeführt wurde. Auch die vorhandenen Veröffentlichungen lassen zumeist keinen Schluss darüber zu, auf welcher inhaltlichen Basis genau die physikalischen Testitems konstruiert wurden. Diese Tatsache könnte dem erwähnten Umstand zugeschrieben werden, dass die genannten Projekte vorrangig zwischen den Konstrukten *FW* und *FDW* zu trennen beabsichtigten und daher auf keine entsprechende Binnenstrukturierung des Fachwissens Wert legten. Im Gegensatz dazu sollen in der vorliegenden Arbeit mithilfe eines transparenten Vorgehens die Kernideen der Teilchenphysik identifiziert werden, welche später als eindeutige Basis für Testentwicklungen dienen könnten.

1.3.2 Wissensarten

Um das Fachwissen von Expertinnen und Experten im Gegensatz zu dem von Novizinnen und Novizen in einem Fachbereich zu charakterisieren, reicht es nicht, das alleinige Faktenwissen für verschiedene Inhaltsbereiche zu untersuchen. Vielmehr zeichnet sich das Expertisefachwissen durch verschiedene Arten aus, in welchen Wissen zu einem Thema vorliegt (Paris, Lipson & Wixson, 1983). In dieser Arbeit

soll das Fachwissen von Lehrkräften durch eine Beschreibung des relevanten Ausschnitts des Fachwissens von Teilchenphysikexpertinnen und -experten modelliert werden. Aus diesem Grund wird die Unterteilung in verschiedene Wissensarten als zweite Klassifikationsweise von Fachwissen nachfolgend ebenfalls beschrieben und untersucht. Pioniersarbeit für die naturwissenschaftsdidaktische Forschung leistet hier das Projekt *ProwiN*, welches in Anlehnung an Befunde aus der pädagogischen Psychologie (v.a. Gruber, 2008; Paris et al., 1983) und der kognitiven Psychologie (J. R. Anderson, Funke & Plata, 2007) zwischen den drei folgendermaßen definierten Wissensarten unterscheidet (Kirschner, 2013; Tepner et al., 2012):

Definition D1.1: Deklaratives Wissen beschreibt Wissen über Sachverhalte und Inhalte. Typischerweise in Testaufgaben verwendeter Operator: *Nennen Sie ...*

Definition D1.2: Prozedurales Wissen umfasst Wissen über (die Ausführung von) Handlungen und Prozessen. Typisches Frageformat: *Wie kann etwas gemessen bzw. nachgeprüft werden?*

Definition D1.3: Konditionales Wissen beinhaltet Wissen, das zur Begründung und Beurteilung von Handlungen und Prozessen benötigt wird. Typischerweise werden damit *Wann-* und *Warum-Fragen* zur Angemessenheit einer Handlung bzw. eines Prozesses beantwortet.

Anzumerken ist, dass insbesondere die letzten beiden Wissensarten bei Lehrkräften mit direktem Bezug zu spezifischen Unterrichtssituationen organisiert und zentral wichtig für die Planung, Durchführung und Reflexion von Unterricht sind. Daher werden die beiden Wissensarten in der Regel im Format von Unterrichtsvignetten getestet (Gruber, 2008; Tepner et al., 2012). Im Rahmen der Testentwicklung des Projekts *ProwiN* wurden in allen drei Kerndimensionen des Professionswissens (APW, FW, FDW) Items für die Messung aller drei Wissensarten eingesetzt. Kirschner (2013) konnte jedoch lediglich die Unterscheidung zwischen deklarativem fachdidaktischem Wissen (FDW_d) einerseits und prozeduralem und konditionalem fachdidaktischen Wissen (FDW_{pk}) andererseits empirisch bestätigen.

Modellierungen von Wissensarten ähnlich derjenigen von *ProwiN* finden sich insbesondere für das physikalische Fachwissen auch in weiteren Projekten. So werden zum einen bereits im *Paderborner Instrument* Aufgaben eingesetzt, deren Lösung entweder deklaratives oder handlungsnahes prozedurales Wissen von den Lehrkräften erfordert (Riese, 2009; Riese & Reinhold, 2010). In jüngerer Zeit knüpft das Projekt *Falko-P* an die Modellierungen von Tepner et al. (2012) an. Darin wird für die

Messung des fachbezogenen Wissens von Physiklehrkräften ein heuristisches Hintergrundmodell angewandt, welches deklaratives, prozedurales und konditionales Wissen umfasst. Schließlich folgt das Projekt *KiL* einer leicht abgewandelten Form der Modellierung von Wissensarten. In Anlehnung an Shavelson, Ruiz-Primo und Wiley (2005) wurden im Rahmen der Testkonstruktion Aufgaben entwickelt, die für alle physikalischen Inhaltsbereiche systematisch entweder *deklaratives Wissen* (hier als Angabe von Definitionen), *prozedurales Wissen* (hier als Anwendung von Verfahren und Techniken) oder *schematisches und strategisches Wissen* (Begründungs- bzw. Metawissen) erfassen (Sorge et al., 2017).

Insgesamt betrachtet findet sich die präziseste Beschreibung verschiedener Wissensarten für das physikalische Fachwissen im Projekt *ProwiN*. Der vorgeschlagenen Unterteilung soll auch in der vorliegenden Arbeit gefolgt werden. Im Unterschied zur Vorgehensweise von Tepner et al. (2012) findet die Unterscheidung hier jedoch nicht durch verschieden konstruierte Testitems zur Messung der Wissensarten statt. Vielmehr wird im Rahmen der Fachwissensmodellierung angestrebt, theoriegeleitet mithilfe der Definitionen der Wissensarten die inhaltliche Wissens Elemente jeweils konkret für jede der Wissensarten zu beschreiben.

1.3.3 Wissensstufen

Neben der Unterteilung in verschiedene Inhaltsbereiche und Wissensarten repräsentiert die Modellierung bzw. Identifikation von *Wissensstufen* oder *Wissensniveaus*² eine weitere verbreitete Art der Klassifikation von Wissen.

So postulierte die *Michigan-Group* (Ball, Hill & Bass, 2005; Hill, Schilling & Ball, 2004) bereits zu Anfang dieses Jahrtausends, dass das von Mathematikgrundschullehrkräften für den Unterricht benötigte *fachbezogene Wissen* drei verschiedenen Ausprägungen bzw. Stufen zugeordnet werden kann: (I) *common knowledge of content* (mathematisches Alltagswissen eines Erwachsenen), (II) *specialized knowledge of content* (ein dem Lehrberuf eigenes, durch Ausbildung und Unterrichtspraxis erworbenes, mathematisches Wissen) und (III) *knowledge of students and content* (Wissen über Lernendenkognitionen bezüglich der Mathematik).

² Vor allem in der Professionswissensforschung im Fach Mathematik bevorzugt ein Teil der Autorenschaft den Begriff *Wissensformen*, um zu verdeutlichen, dass es sich nicht per se um eine graduelle Modellierung von aufeinander aufbauenden Stufen handelt, sondern mitunter um nebeneinanderstehende Formen von Wissen. Auf diese Bezeichnung soll hier verzichtet werden, um keiner Verwechslung mit *Wissensarten* Raum zu geben.

Daran anknüpfend liegt der COACTIV-Studie (Kunter et al., 2011) ein vierstufiges Rahmenmodell für das Fachwissen von Mathematiklehrkräften zugrunde, welches die Ausprägungen (I) *akademisches Forschungswissen*, (II) *tiefergehendes Hintergrundverständnis der Schulmathematik*, (III) *Meisterung der Schulmathematik in der unterrichteten Klassenstufe* und (IV) *mathematisches Alltagswissen eines Erwachsenen* (Baumert et al., 2011) umfasst. Die Verfassenden nehmen an, dass Lehrkräfte für die Ausübung ihres Berufs in jedem Fall über Wissen in der zweiten Stufe verfügen müssen. Daher wurden bei der Testentwicklung von COACTIV einzig und allein Aufgaben eingesetzt, deren Lösung mit Wissen der zweiten Stufe möglich ist. Als Folge dessen konnte im Rahmen der Studie keine bestätigende empirische Aussage zur Trennung der Stufen getroffen werden.

Hierzu üben auch Heinze, Dreher, Lindmeier und Niemand (2016) Kritik an der Tatsache, dass viele Modellierungen zum mathematischen Fachwissen von Lehrkräften maximal auf erweitertem Schulfachwissen operationalisiert und gemessen werden. Sie nehmen hingegen eine Modellierung vor, die *akademisches Fachwissen* von *Fachwissen im Schulkontext* trennt und konnten die Eigenständigkeit der beiden Konstrukte empirisch bestätigen.

Für die Naturwissenschaften entwickelte Riese (2009) aus dem Vergleich der genannten Modellierungen zum mathematischen Wissen ein dreistufiges Modell für das Fachwissen von Physiklehrkräften, das die Fachstufen (I) *Schulwissen* (Schulstoff der unterrichteten Schulstufe), (II) *Vertieftes Schulwissen* (vernetztes und vertieftes Hintergrundwissen zum Schulstoff) und (III) *Universitäres Wissen* (Wissen, das in einem Hochschulstudium vermittelt wird) umschließt. Mithilfe eines auf diesem Modell basierenden Tests konnte die Eigenständigkeit der drei Wissensstufen für Physiklehrkräfte der Sekundarstufe I bestätigt werden. Obgleich die Stufen ursprünglich mit steigender fachlicher Schwierigkeit modelliert wurden, zeigten die Testergebnisse jedoch, dass es sich statt um aufeinander aufbauende vielmehr um nebeneinanderstehende Teilkompetenzen handelt (Riese & Reinhold, 2010). An den Arbeiten von Riese anknüpfend, wurde im Projekt *Profile-P* gezeigt, dass ein dreidimensionales Konstrukt dem Konstrukt mit einer einzigen Fachstufe überlegen ist (Riese et al., 2015). Die Untersuchung erfolgte über Raschanalysen anhand einer Stichprobe von Physiklehramtsstudierenden. Auch im Modell *Nutzung von Fachwissen* (Woitkowski, 2015) wird die beschriebene Dreiteilung für die Modellierung von Fachstufen verwendet.

Die weiteren diskutierten Projekte zum physikalischen Fachwissen von Lehrkräften verwenden keine systematisch operationalisierte Modellierung von Wissens-

stufen. Während in *ProwiN* unsystematisch Aufgaben entwickelt wurden, die für die Sekundarstufe I entweder Schulwissen oder vertieftes Schulwissen (Wissen auf Oberstufen- oder Grundstudiumsniveau) testen, werden bei *KiL* ausschließlich Aufgaben zum universitären Wissen eingesetzt. *Falko-P* verwendet zwar prinzipiell das vierstufige Hintergrundmodell von *COACTIV*, operationalisiert Fachwissen jedoch nur auf Schulniveau (Stufe III) und auf vertieftem Schulniveau (Stufe II), ohne auf eine Überprüfung dieser Modellierung abzielen.

Zusammengefasst findet eine Modellierung von Stufen innerhalb des physikalischen Fachwissens nur selten und in der Regel basierend auf einer grob modellierten A-priori-Struktur und der empirischen Identifikation von Wissensniveaus innerhalb der untersuchten Gruppen von Testpersonen statt. Für die vorliegende Arbeit scheint dieses Vorgehen nicht geeignet, da es insbesondere für die Konstruktion von Testitems auf *Schulniveau* bislang keine Einigkeit über die fachlichen Inhalte der Teilchenphysik gibt, die in der Schule unterrichtet werden sollten. Man könnte sich jedoch als zukünftige Erweiterung des Projekts die Charakterisierung der im Folgenden herausgearbeiteten inhaltlichen Wissens Elemente aus Sicht der verschiedenen Fachstufen vorstellen, beispielsweise über Einschätzung der Schwierigkeiten durch Fachleute.

1.3.4 Weitere Dimensionen

Über Inhaltsbereiche, Wissensarten und Wissensstufen hinaus finden sich in der Literatur vereinzelt weitere Klassifikationsweisen von physikalischem Fachwissen. So unterscheidet beispielsweise Riese (2009) zwischen verschiedenen *kognitiven Aktivitäten*, bei deren Ausführung eine unterschiedliche Form bzw. Breite oder Tiefe von Fachwissen benötigt wird. Zu den Aktivitäten zählt er *Reproduzieren*, *Verstehen* sowie *Beurteilen*. Diesen Gedanken aufgreifend und primär um Testaufgaben a priori verschiedenen Schwierigkeitsgraden zuordnen zu können, modellieren auch Woitkowski, Riese und Reinhold (2011) zusätzlich zu *Fachstufen* und *Inhaltsbereichen* eine Dimension der *Komplexität* für physikalisches Fachwissen. Die Komplexität beschreibt die verschiedenen zur Lösung einer Aufgabe benötigten kognitiven Fähigkeiten, die aus einem unterschiedlich großen Vernetzungsgrad des mentalen Wissensnetzwerks resultieren. Man spricht in der Lernpsychologie nach Commons, Trudeau, Stein, Richards und Krause (1998) von *hierarchischer Komplexität*, wenn mit steigendem Vernetzungsgrad auch Inhalte niedriger Komplexität in übergreifendere Konzepte organisiert werden. Woitkowski et al. (2011) modellieren für die *hierarchische Komplexität* in Anlehnung an Bernholt, Parchmann und Labudde (2010) die Subfacetten

Fakten, Prozessbeschreibungen, Kausalität und multivariate Interdependenz (siehe auch Abb. 1.2b). Diese Modellierung diente unter anderem Woitkowski und Riese (2017) als Grundlage zur Modellierung und Messung von Kompetenzniveaus innerhalb des physikalischen Fachwissens von Physikfach- und -lehramtsstudierenden.

1.4 Modellierung von Fachwissen in dieser Arbeit

Es lässt sich als Fazit der Diskussion zur Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften feststellen, dass bei den gegebenen unterschiedlichen Foki alle Projekte die *Inhaltsdimension* als Bezugsrahmen für Modellierungen und Messungen verwenden.

Für das Fach Physik wird aus den diskutierten Gründen oftmals ein Schwerpunkt auf den Inhaltsbereich *Mechanik* sowie seltener auf andere physikalische Domänen wie etwa *Elektrizitätslehre* gelegt. Eine explizite Modellierung für die Domäne Teilchenphysik findet sich in der Literatur bislang nicht. Aufgrund der angesprochenen Domänenspezifität von Fachwissen kann für die teilchenphysikalische Modellierung nicht auf Ergebnisse für andere physikalische Domänen zurückgegriffen werden, wodurch folgendes Projektziel dieser Arbeit motiviert wird:

Projektziel: Erste Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften für die Domäne Teilchenphysik

Der Vergleich der analysierten Modellierungen aus der Literatur zeigte die Dominanz von drei Dimensionierungen, die typischerweise innerhalb des Fachwissens in den Blick genommen werden: *Inhaltsbereich*, *Wissensarten* sowie *Wissensstufen*.

Die Modellierung dieser Dimensionen manifestiert sich idealerweise durch eine möglichst präzise Identifikation und Beschreibung der jeweilig vorhandenen Subfacetten. *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* lassen sich a priori modellieren und darauf aufbauend empirisch bestätigen oder falsifizieren. Dahingegen findet eine Identifikation von *Wissensstufen* überwiegend mithilfe statistischer Analysen von Messergebnissen durch die Bildung empirisch abgesicherter Wissensniveaus - wie zum Beispiel bei Woitkowski und Riese (2017) - statt.

Wie bereits in der Einleitung dieser Arbeit diskutiert, zielt das vorgestellte Projekt jedoch zunächst einmal auf die transparente Entwicklung eines detaillierten Strukturmodells für das teilchenphysikalische Fachwissen ab, welches als Grundlage für zukünftige empirische Messungen benötigt wird. Daher wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf eine Modellierung von Wissensstufen verzichtet und stattdes-

sen auf die Dimensionen *Inhaltsbereich* sowie *Wissensarten* fokussiert. Aufgrund der Bedeutung des *Inhaltsbereichs* als Bezugsrahmen für die anderen Fachwissensdimensionen wird der Hauptschwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf die Modellierung dieser Dimension gelegt. Folgender Modellierungsfokus kann festhalten werden:

Modellierungsfokus: Möglichst präzise Identifikation und Beschreibung der Subfacetten innerhalb der Dimension *Inhaltsbereich*

Zusätzlich: Unterschiedliche Beschreibung der identifizierten Subfacetten im Rahmen der in Kapitel 1.3.2 vorgestellten *Wissensarten* des deklarativen, prozeduralen und konditionalen Wissens

Der *Inhaltsbereich* wurde im Rahmen der in Kapitel 1.3.1 diskutierten Fachwissensprojekte mit unterschiedlich viel Aufwand im Vorfeld von Messungen beschrieben. In allen Projekten zum physikalischen Fachwissen wurden für die Modellierungen sowie Messungen die von der Kultusministerkonferenz verabschiedeten Bildungsstandards im Fach Physik (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2004, 2005) oder die fachwissenschaftlichen Anforderungen für Lehrkräfte (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2017) sowie universitäre Curricula zu Rate gezogen. Wie in der Einleitung dieser Arbeit dargelegt, ist das Thema Teilchenphysik als moderner Themenkomplex noch nicht überall fest in den Schulunterricht integriert. Darüber hinaus gibt es für das Thema bislang weder elaborierte staatlichen Vorgaben noch landesinterne Lehr- oder Bildungspläne, an denen man sich für die Modellierung des Inhaltsbereichs des Fachwissens für die Teilchenphysik orientieren könnte.

Denkbar wäre einerseits, den Inhaltsbereich mithilfe eines Literaturvergleichs von universitären Einführungslehrwerken zur Teilchenphysik herauszuarbeiten. Da diese Lehrwerke jedoch in der Regel von Fachforschenden für Physikfachstudierende geschrieben werden, würde eine derartige Vorgehensweise lediglich auf die fachwissenschaftliche Perspektive zur Teilchenphysik fokussieren. Es soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch eine am Lehrberuf professionsorientierte Modellierung von Fachwissen vorgenommen werden, innerhalb derer teilchenphysikalische Themen identifiziert werden, die auch tatsächlich von Lehrkräften für konkret in der Schule umsetzbaren Physikunterricht benötigt werden. Hierfür würde sich wiederum eine Analyse von verfügbaren Schulbüchern und Unterrichtsmaterialien zur

Teilchenphysik anbieten. Diese Materialien werden jedoch - zumindest in Deutschland - bislang ebenfalls vorrangig von Fachforschenden entwickelt.

Aus den genannten Gründen wird im Kontext der vorliegenden Arbeit eine Vorgehensweise zur Fachwissensmodellierung gewählt, die sich nicht allein auf die vorhandene Literatur stützt. Im Rahmen einer Delphi-Befragung (siehe Kapitel 4.1) soll zusätzlich die gemeinschaftliche Expertise aller professionell Agierenden im Spannungsfeld „*Teilchenphysik und Schule*“ genutzt werden. Hierfür werden die Sichtweisen sowohl von Fachforschenden als auch von Fachdidaktikforschenden und Mitarbeitenden in der Öffentlichkeitsarbeit bzw. dem Wissenschaftsjournalismus auf das von Lehrkräften benötigte Fachwissen im Bereich der Teilchenphysik bei der Modellierung miteinbezogen. Aus der Zusammenführung der Ergebnisse soll zwar prinzipiell, wie in der Einleitung der Arbeit beschrieben, ein möglichst detailgetreuer Ausschnitt des Fachwissens von Expertinnen und Experten aus dem Bereich der Teilchenphysikforschung modelliert werden, jedoch unter Berücksichtigung der Perspektive von Berufsgruppen, die einen stärkeren schulischen Hintergrund besitzen. Es kann somit als eine erste grundsätzliche Überlegung zum methodischen Vorgehen Folgendes fixiert werden:

Methodik-Grundsatz 1: Miteinbeziehung der Expertise aller professionell Agierenden im Spannungsfeld „*Teilchenphysik und Schule*“ unter besonderer Berücksichtigung der Sichtweise von schulnahen Berufsgruppen

Schließlich zeichnet sich das abzubildende professionelle Wissen der Expertinnen und Experten nach Befunden aus der Expertiseforschung dadurch aus, dass es hierarchisch um wenige zentrale Schlüsselkonzepte organisiert ist, die miteinander in propositionaler Verbindung stehen (vgl. zur Übersicht der Expertiseforschung z.B. Baumert & Kunter, 2006). Um also die Expertise der befragten Berufsgruppen zu rekonstruieren und damit als Grundlage für die Fachwissensmodellierung nutzen zu können, bietet es sich an, die Fragestellung an das Gremium von Expertinnen und Experten explizit auf zentrale *Schlüsselkonzepte* im Bereich der Teilchenphysik sowie deren *Beziehungen* untereinander auszurichten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Fokus auf die *Benennung* bzw. *Beschreibung* der Konzepte gelegt, obgleich als Ausblick auf zukünftige Forschung am Ende in Teil IV ein Beispiel zu einem methodischem Vorgehen zur Rekonstruktion von *Beziehungen* zwischen den Konzepten im Rahmen von Wissensnetzwerken gezeigt wird.

Gemeinsam mit der Annahme, dass sich aufgrund der Komplexität der Teilchenphysik und ihres anspruchsvollen Niveaus auch innerhalb der Physik vorrangig gymnasiale Lehrkräfte mit dem Thema auseinandersetzen müssen, ergibt sich folgender zweiter Grundsatz zum methodischen Vorgehen dieser Arbeit:

Methodik-Grundsatz 2: Ausrichtung der Delphi-Fragestellungen auf die Identifikation und Beschreibung von zentral wichtigen *Schlüsselkonzepten* innerhalb der Teilchenphysik, über die gymnasiale Lehrkräfte an Fachwissen verfügen müssen.

Die bis hierhin erarbeiteten Methodik-Grundsätze beziehen sich auf die Modellierung der Fachwissensdimension *Inhaltsbereich*. Die Untersuchung bzw. Modellierung der Dimension *Wissensarten* kann aufbauend auf den Ergebnissen aus der inhaltlichen Modellierung durchgeführt werden: Durch die Fragestellung nach den zentralen *Schlüsselkonzepten* an das Expertisegremium in der Delphi-Befragung wird die Erarbeitung von Beschreibungen der wichtigsten inhaltlichen Subfacetten erwartet, die primär deskriptiven Auflistungen von Sachverhalten entsprechen wird. Die Beschreibungen werden sich demnach mehr oder weniger direkt der Wissensart *deklaratives Wissen* zuordnen lassen. Um die Dimension *Wissensarten* darüber hinaus vollständig für das teilchenphysikalische Fachwissen zu modellieren, müssen für die inhaltlichen Subfacetten ebenfalls Beschreibungen erarbeitet werden, die das *prozedurale* sowie das *konditionale Wissen* für die betreffenden Themen beinhalten. Die Beschreibungen für diese Wissensarten sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit theoriegeleitet unter Berücksichtigung der in Kapitel 1.3.2 gegebenen Definitionen für die Wissensarten und ausgehend von den deskriptiven Beschreibungen aus der Inhaltsmodellierung formuliert werden. Es werden hierbei nur für diejenigen inhaltlichen Subfacetten erweiterte Beschreibungen erarbeitet, welche vom Expertisegremium als die für das Lehrkräftewissen relevantesten bzw. wichtigsten eingeschätzt werden (siehe Kapitel 4). Es lässt sich letzter Methodik-Grundsatz festhalten:

Methodik-Grundsatz 3: Theoriegeleitete Erarbeitung von Beschreibungen der wichtigsten inhaltlichen Subfacetten für die Wissensarten des *deklarativen*, *prozeduralen* und *konditionalen Wissens* auf Basis der Ergebnisse der inhaltlichen Fachwissensmodellierung

Während das folgende Kapitel zunächst einen einführenden Überblick in die wichtigsten Erkenntnisse und Errungenschaften der modernen Teilchenphysik zur Einordnung der später erhobenen Konzepte gibt, werden die soeben herausgearbeiteten Ziele und Grundsätze in Kapitel 3 zusammengefasst und in die Forschungsfragen überführt, welche der vorliegenden Arbeit zugrunde liegen.

2

Die *Big Ideas* der Teilchenphysik - eine Einführung

Was sind eigentlich die *Big Ideas*, also die großen Ideen bzw. die fundamentalen Konzepte der Teilchenphysik, mit welchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler tagtäglich arbeiten und über die potenziell auch Lehrkräfte Bescheid wissen sollten? Nachfolgend werden die *Big Ideas* in einführender Weise vorgestellt.

Wie im vorangegangenen Kapitel erarbeitet, soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst das inhaltliche Fachwissen modelliert werden, welches bei Lehrkräften im Hinblick auf einen Unterricht zum Thema Teilchenphysik vorauszusetzen ist. Methodisch bietet es sich hierzu an, auf möglichst detailgetreue Weise den für Lehrkräfte relevanten Ausschnitt desjenigen Fachwissens zu beschreiben, das auch Forschende als die Expertinnen und Experten in ihrem Forschungsgebiet besitzen. Betrachtet man die Struktur des zu modellierenden Fachwissens, so wird der abzubildende Ausschnitt die gleichen zentralen Schlüsselkonzepte (engl. *key concepts*) beinhalten, um die auch das Wissen der Fachleute hierarchisch organisiert ist (siehe Expertisewissen in Kapitel 1.4). Die Schlüsselkonzepte im Fokus der später beschriebenen Delphi-Befragungen werden dabei den *Big Ideas* der Teilchenphysik entspringen, zu welchen allgemein gefasst die bedeutendsten Erkenntnisse, Errungenschaften und Entdeckungen zählen, aus denen sich der aktuelle Kenntnisstand zur Teilchenphysik entwickelt hat bzw. aus denen er sich auch heute noch zusammensetzt.

Im folgenden Kapitel wird ein einführender Überblick über die wichtigsten *Big Ideas* der Teilchenphysik gegeben. Der Überblick erhebt dabei weder den Anspruch auf Vollständigkeit noch soll der theoretische teilchenphysikalische Formalismus bis ins kleinste Detail beschrieben werden. Vielmehr sollen - vor allem auf phänomenologischer Ebene - die teilchenphysikalischen Grundlagen erläutert werden, welche für das Verständnis und die Einordnung der in der Erhebungsphase des Projekts auftauchenden fachwissenschaftlichen Themen benötigt werden.

2.1 Vorstrukturierung und Auswahl der *Big Ideas*

Die großen Forschungszweige der Teilchenphysik

Wie in den meisten physikalischen Domänen sind in der Teilchenphysik durch die Weiterentwicklung der experimentellen, der technischen und auch der konzeptuellen Möglichkeiten, die theoretische und die experimentelle Teilchenphysik als eigenständige Forschungsbereiche entstanden. Die Bereiche spezialisierten sich in jeweils unterschiedlichen Methoden und Arbeitsweisen, stehen jedoch eng miteinander in Verbindung.

Die theoretische Teilchenphysik beschäftigt sich kurz gefasst mit der Modellbildung und mit Präzisionsvorhersagen. Sie versucht unter anderem, sowohl alle beobachteten als auch bislang nur postulierten Elementarteilchen im Universum und deren Wechselwirkungen untereinander in einem möglichst einfachen theoretischen Modell gemeinsam zu beschreiben. Sie bedient sich hierzu insbesondere der Methoden aus der Quantenfeldtheorie (siehe Kapitel 2.2.5). Gleichzeitig sollen mithilfe der Modelle auch bis heute ungeklärte Fragen zum Ursprung und der Entwicklung unseres Universums beantwortet werden.

Die experimentelle Teilchenphysik überprüft dagegen, ob sich die Modelle aus der Theorie falsifizieren lassen. Zur Überprüfung werden heutzutage bei Großexperimenten in internationalen Kollaborationen neue, hochenergetische Teilchen unter anderem bei der Kollision von ebenfalls sehr hochenergetischer Teilchenstrahlung erzeugt, die Teilchen werden nachgewiesen und ihre Wechselwirkungen sowohl untereinander als auch mit Materie untersucht. Als Quellen für hochenergetische Teilchenstrahlung dient einerseits die kosmische Strahlung aus dem Weltraum. Sie wird entweder bei Erreichen der Erdoberfläche untersucht (wie z.B. beim Experiment *IceCube* am Südpol (Aartsen et al., 2013)) oder man bedient sich ihrer im Weltraum als Teilchenquelle bei Satellitenexperimenten (z.B. beim Experiment *Alpha-Magnet-Spektrometer* an Bord der internationalen Raumstation *ISS* (Ahlen et al., 1994)). Andererseits können hochenergetische Teilchen direkt durch Beschleunigung erzeugt werden. Dies geschieht in großen Teilchenbeschleunigern wie beispielsweise dem *Large Hadron Collider* (Brüning et al., 2004) am Forschungszentrum *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN) in Genf. Am CERN werden die Teilchen analysiert, die bei der Kollision der beschleunigten Teilchenstrahlen entstehen und von großen Detektoren wie dem *A Toroidal LHC ApparatuS* (ATLAS Collaboration, Aad, G. et al., 2008) nachgewiesen werden. Neben der Teilchenbeschleunigung hat sich heute

insbesondere die Teilchendetektion als eigenständiger Forschungsbereich etabliert. Er strebt eine Weiterentwicklung der technischen und statistischen Methoden zur Optimierung des Teilchennachweises an.

Der aktuelle Wissensstand der Menschheit zur Natur der Elementarteilchen ist insbesondere seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch das Wechselspiel theoretischer Vorhersagen und der Weiterentwicklung experimenteller Methoden stark gewachsen. Wie bereits erwähnt, gewannen die Weiterentwicklung experimenteller Methoden zur Beschleunigung und zum Nachweis von Teilchen zunehmend an Bedeutung und wurden zu eigenständigen Forschungsbereichen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll daher eine erste Vorstrukturierung bzw. Einteilung der *Big Ideas* der Teilchenphysik in folgende Forschungszweige vorgenommen werden:

- **(I) bisherige Erkenntnisse und aktueller Wissensstand**
- **(II) experimentelle Forschungsmethoden**

Forschung zur Teilchenphysik lässt sich allgemein der Grundlagenforschung und nicht der angewandten Forschung zuordnen. Obgleich aus der Grundlagenforschung in der Regel keine unmittelbaren Erfindungen für unseren Alltag oder andere lebensweltnahe Anwendungsgebiete hervorgehen, lässt sich rückblickend eine Vielzahl an Anwendungen auf grundlegende Entwicklungen rund um die Forschung zur Teilchenphysik zurückführen. Beispiele für den Transfer von Technologien und Methoden aus der Teilchenphysik sind die Hadronentherapie zur medizinischen Krebsbehandlung, verschiedene medizinische Bildgebungsverfahren oder auch die Erfindung des *World Wide Web* durch Tim Berners-Lee (1989) am CERN. Aufgrund der bedeutenden Relevanz, die solche Erfindungen für unsere heutige Gesellschaft haben, werden für die Vorstrukturierung der *Big Ideas* die beiden genannten Forschungszweige um folgenden Bereich erweitert:

- **(III) Spin-offs: Technologietransfer der Teilchenphysik**
(*spin-offs* dt. ausgekoppelte Anwendungen)

Die drei Forschungszweige der Teilchenphysik sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

Zusammenstellung und Auswahl zentraler Themen

Innerhalb der drei Forschungszweige existieren unterschiedliche Lehrmeinungen bezüglich Anzahl und Komplexität der *Big Ideas*. Aus diesem Grund wurde vor

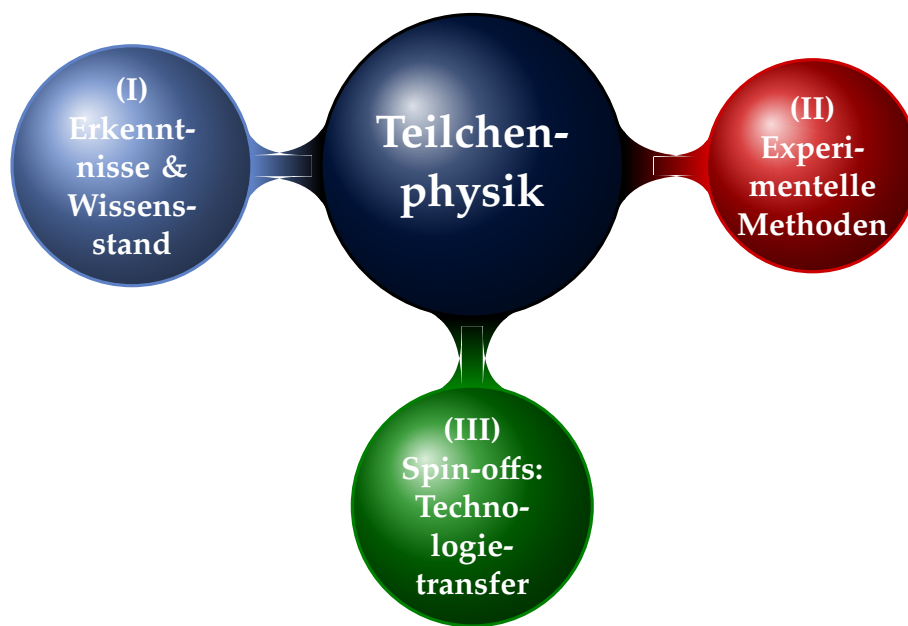


Abbildung 2.1: Die Forschungszweige der Teilchenphysik zur Einordnung der *Big Ideas*

Beginn der Erhebungsphase der Arbeit zunächst auf einem überblicksartigen Niveau die vorhandene Einführungsliteratur analysiert und verglichen. Als Ausgangspunkt dienten hierbei sowohl universitäre Einführungslehrbücher für Physikstudierende als auch Materialien und Webseiten, die im Rahmen von öffentlichkeitswirksamen Projekten und Veranstaltungen (engl. *outreach*) zum Thema Teilchenphysik erstellt wurden. Eine Übersicht der untersuchten Quellen findet sich in Tabelle 2.1.

Basierend auf den angesprochenen inhaltlichen Punkten in der genannten Literatur wurden wiederkehrende Themen innerhalb der drei Forschungszweige identifiziert, welche zunächst einmal als potenzielle *Big Ideas* angesehen werden können. Die zusammengestellten Themen sind in Abbildung 2.2 in Form einer Landkarte dargestellt. Einzelne Themen sind hier bereits größeren Themenkomplexen zugeordnet. Insbesondere durch den starken inhaltlichen Zusammenhang zwischen theoretischer Modellbildung und experimentellen Methoden einerseits sowie zwischen experimentellen Entwicklungen und Technologietransfer andererseits ließen sich die Themen nicht immer eindeutig größeren Komplexen zuweisen. Die dargestellte Zuordnung soll daher lediglich als ein erster Vorschlag zur Strukturierung der Themen verstanden werden. Die Etablierung eines durch Expertinnen und Experten validierten Zuordnungsschemas stellt einen Teilschritt im gewählten Forschungsdesign dieser Arbeit dar (siehe Kapitel 4).

Titel	Autor(en), Jahr	Art der Quelle	untersuchter Zweig
Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik	Demtröder, 2017	Lehrbuch Uni	(I), (II), (III)
Elementarteilchenphysik	Berger, 2014	Lehrbuch Uni	(I), (II)
Introduction to elementary particles	Griffiths, 2011	Lehrbuch Uni	(I)
Elementare Teilchen	Bleck-Neuhaus, 2013	Lehrbuch Uni	(I)
Ladungen, Wechsel- wirkungen, Teilchen	Netzwerk Teilchenwelt: Kobel, Bilow, Lindenau und Schorn, 2017	Material für Lehrkräfte (Outreach)	(I)
www.weltmaschine.de/physik	DESY: Weltmaschine, 2018	Webseite (Outreach)	(I)
Teilchen und Kerne	Povh, Rith, Scholz, Zetsche und Rodejohann, 2014	Lehrbuch Uni	(II)
Forschungsmethoden	Netzwerk Teilchenwelt: Kobel, Bilow, Lindenau, Bachmann und Schorn, 2018	Material für Lehrkräfte (Outreach)	(II)
www.weltmaschine.de/cern_ und_lhc/technologietransfer/	DESY: Weltmaschine, 2018	Webseite (Outreach)	(III)
https://kt.cern/cern- technologies-society	CERN Press Office, 2018	Webseite (Outreach)	(III)
The ATLAS Experiment: From Fundamental Science to Everyone's Life	Marcastel, 2006	Poster (Outreach)	(III)

Tabelle 2.1: Verwendete Quellen für eine erste Zusammenstellung der *Big Ideas* in den drei Forschungszweigen der Teilchenphysik: (I) Erkenntnisse & Wissensstand, (II) experimentelle Forschungsmethoden und (III) Spin-offs: Technologietransfer

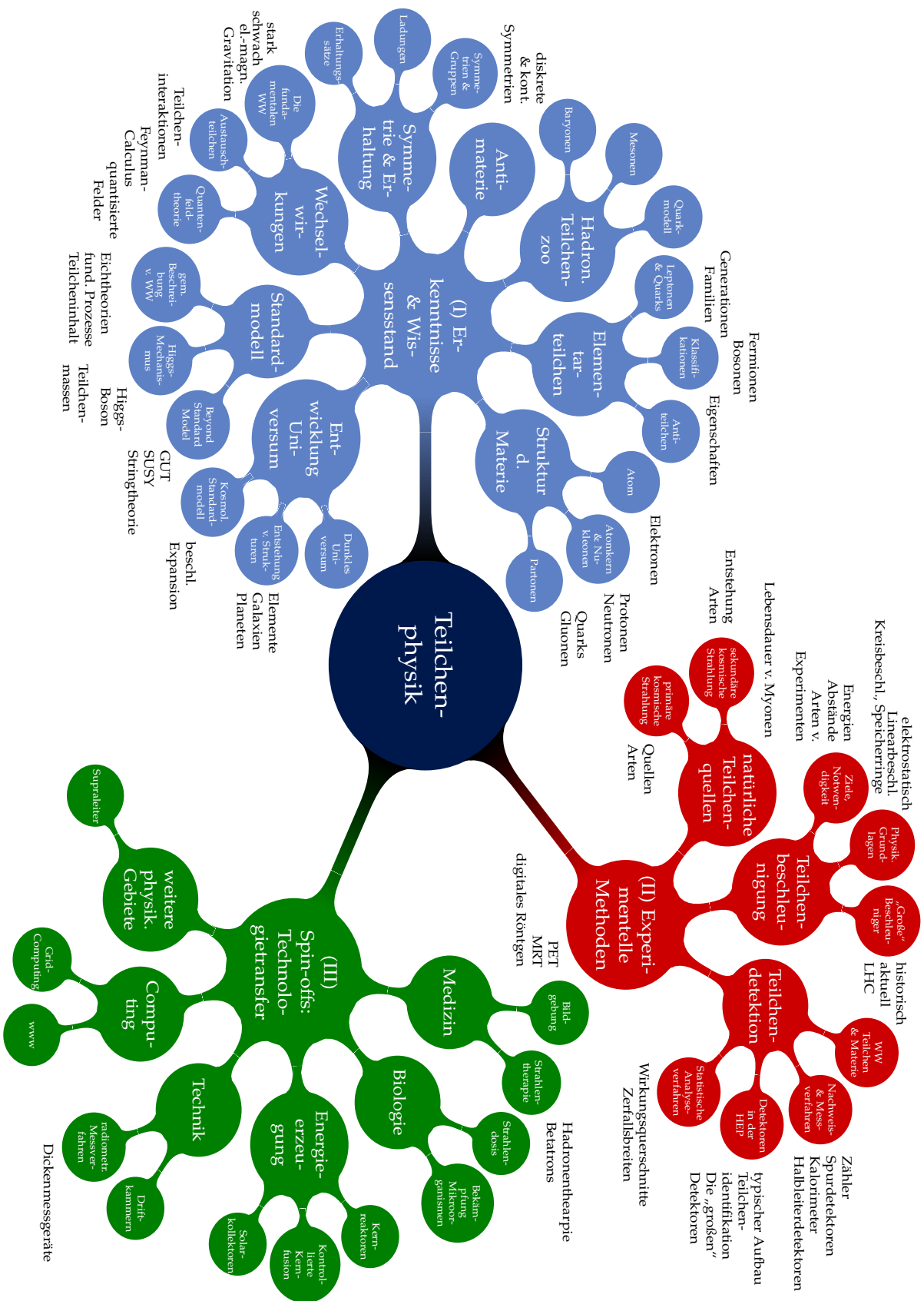


Abbildung 2.2: Landkarte mit wiederkehrenden Themen (Big Ideas) innerhalb der drei Forschungszweige der Teilchenphysik

Wie in Kapitel 1 erläutert dienen die fachwissenschaftlichen *Big Ideas* der Teilchenphysik im Rahmen des vorgestellten Projekts als Grundlage zur Modellierung derjenigen Themen, die als inhaltliche Subfacetten für das Fachwissen von Lehrkräften notwendig sind. Die für das Lehrkräftewissen relevanten Themen sollen aus den *Big Ideas* im Zuge der vorgestellten Studien ausgewählt bzw. identifiziert und präzise beschrieben werden. Es lässt sich feststellen, dass die Zusammenstellung - wie sie in Abbildung 2.2 dargestellt ist - eine sehr große Anzahl an potenziellen *Big Ideas* umfasst, obwohl hier bereits eine Einschränkung auf die am häufigsten genannten Themen in der untersuchten Literatur stattfand. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass die vollständige und umfassende Erhebung aller relevanten *Big Ideas* der drei Forschungszweige die Beschreibung einer sehr großen Anzahl von miteinander in Verbindung stehenden Themen beinhalten würde. Die gleichzeitige und dennoch möglichst präzise Charakterisierung aller für das Lehrkräftewissen relevanter Themen ist aus ressourcen-technischen Gründen im Rahmen dieser Arbeit, die auf der Delphi-Methode (Kapitel 4) basiert, nicht durchführbar. Aufgrund dessen wird zunächst der Fokus auf die Beschreibung von *Big Ideas* der Teilchenphysik gelegt, die sich dem Forschungszweig (I) *bisherige Erkenntnisse und aktueller Wissensstand* zuordnen lassen. Für die Untersuchung der beiden anderen Forschungszweige sei an dieser Stelle auf zukünftige Arbeiten verwiesen.

2.2 Die *Big Ideas* aus dem Zweig „Erkenntnisse & Wissensstand“

In den folgenden Abschnitten werden die physikalischen Grundlagen der in Abbildung 2.2 dargestellten Themen und Themenkomplexe des Forschungszweigs „*Erkenntnisse und Wissensstand*“ einführend beschrieben. Für die Beschreibungen wird ein populärwissenschaftliches Niveau angestrebt mit einer Orientierung an entsprechender Literatur (z.B. Feynman, 1985; Ne’eman & Kirsh, 1995; Resag, 2010). Zentrale Themenkomplexe, die in der Auswertung der empirischen Studien in Kapitel 5 wiederkehren, werden bereits hier **hervorgehoben**.

An verschiedenen Stellen wird neben der Erklärung teilchenphysikalischer Sachverhalte nachfolgend auch auf besondere sprachliche Formulierungen hingewiesen, mithilfe derer Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker über ihr Fachgebiet kommunizieren. Der sprachliche Fokus erscheint hier angemessen, da Wissen über sprachliche Besonderheiten eines Fachs wie beispielsweise Wissen über spezielle Be-

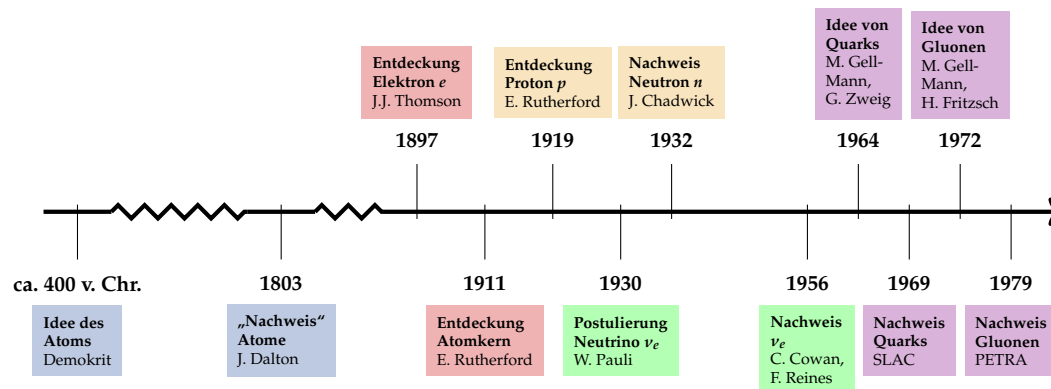


Abbildung 2.3: Meilensteine in der Forschung zur Struktur der Materie

griffe und über die unübliche Verwendung von Wörtern aus anderen Kontexten in gleicher Weise zu dem hier zu modellierenden deklarativen Fachwissen zählt wie Wissen über Prinzipien und Sachverhalte (siehe auch Kapitel 5.4).

2.2.1 Die Struktur der Materie als kurzer historischer Abriss

Aus was bestehen wir und die uns umgebende Welt? Die Frage nach den Bestandteilen der Materie und den Kräften, die diese zusammenhalten, beschäftigt die Menschheit seit mehr als 2000 Jahren. Heute weiß man, dass Materie aus verschiedenen **Bausteinen** aufgebaut ist, deren **Eigenschaften** sowie deren **Beziehungen** bzw. Wechselwirkungen untereinander für die Struktur und den Zusammenhalt der Materie verantwortlich sind.

Eine naheliegende Form die verschiedenen Komponenten unseres heutigen Wissens zu erfassen, besteht darin, sie entlang der Entwicklung des Kenntnisstandes der Menschheit zum Aufbau der Materie nachzuvollziehen¹. Die Entwicklung rankt sich dabei um bedeutende Meilensteine² der Forschung zur Struktur der Materie, deren wichtigste in Abbildung 2.3 dargestellt sind. Für den nachfolgenden Abriss ist zu

¹ Die Entdeckung neuer Substrukturen in der Materie war immer schon eng mit der Weiterentwicklung neuer experimenteller Untersuchungsmethoden verbunden, die eine Auflösung immer kleinerer Abstände ermöglichten. Die Beschreibung des Aufbaus der Materie entlang der historischen Entwicklung zum Kenntnisstand koinzidiert daher mit einer Beschreibung vom „Großen ins Kleine“.

² Es ist anzumerken, dass aus heutiger Sicht einige der beschriebenen Errungenschaften und Entdeckungen nicht der Teilchenphysik, sondern den Domänen Kern-, Atom- und Molekülphysik sowie der Chemie zuzuordnen sind. Historisch bedingt zählten sie jedoch zur jeweiligen Epoche zur Forschung über die Natur der elementaren - also der kleinsten - Teilchen (siehe Definition von Elementarteilchen in Kapitel 2.2.2) und werden daher heute in der Regel in die Liste der Meilensteine der Teilchenphysik mitaufgenommen.

betonen, dass es sich nicht um eine vollständige Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs unseres Wissensstands zur Struktur der Materie, sondern um eine Darstellung der aus heutiger Sicht wichtigen Errungenschaften auf dem Weg zur Entdeckung der elementaren Materiebausteine handelt.

Atome

Bereits um 400 v.Chr. entwickelten die griechischen Philosophen Demokrit und Leukipp den Gedanken, dass alle Materie im Universum nicht aus einem Kontinuum besteht, sondern aus kleinsten, nicht weiter teilbaren Teilchen in einem sie umgebenden leeren Raum aufgebaut ist. Demokrit nannte die kleinen Teilchen Atome (von altgriech. *átomos*, unteilbar). Es dauerte jedoch mehr als 2000 Jahre bis der Chemiker John Dalton (1805) einen indirekten Beweis für die Atomtheorie lieferte. Dalton sah ebenfalls Atome als kleinste Bestandteile der Materie an, die sich jedoch in Eigenschaften wie Größe und Masse für verschiedene Elemente unterscheiden. Auf atomarer Ebene konnte Dalton damit die bereits bekannten festen Mischungsverhältnisse von Elementen in chemischen Reaktionen als eine Folge der Neuordnung der verschiedenen Atomsorten erklären. Heute lassen sich Atome mithilfe sogenannter Rasterkraftmikroskope als kugelförmige Objekte mit einem Radius von ca. einem Ångström sichtbar machen ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$).

Atomkern und Elektronen

Dass Atome doch nicht die kleinsten Bausteine der Materie, sondern wiederum das Ergebnis einer Zusammensetzung aus noch kleineren Teilchen sind, wurde durch zwei weitere bedeutende Entdeckungen um 1900 deutlich.

Zum einen zeigte Ernest Rutherford (1911) in Anlehnung an gemeinsame Arbeiten mit Geiger und Marsden (1909), dass Atome keinesfalls feste, undurchdringliche Objekte sind, sondern vielmehr aus sehr viel leerem Raum um einem kleinen, elektrisch positiv geladenen, massiven Atomkern bestehen. Rutherford bediente sich für diese Entdeckung einer Methode, die Teilchenphysikforschende bis heute verwenden: Um in den Aufbau derart kleiner Strukturen „reinschauen“ zu können, die optisch z.B. durch Mikroskope nicht mehr auflösbar sind, führte er einen Streuversuch durch. Er beschoss hierzu eine Goldfolie mit einer Dicke von wenigen Atomlagen mit elektrisch positiv geladenen Teilchen. Für den Beschuss verwendete er α -Teilchen, die von einem damals bereits bekannten radioaktiven Material ausgesandt wurden und von denen man heute weiß, dass sie die Atomkerne von Heliumatomen sind

und aus zwei Protonen p und zwei Neutronen n bestehen. Entgegen der Erwartung, dass die α -Teilchen nahezu komplett von der Goldfolie reflektiert werden, passierten fast alle Teilchen im Versuch die Folie ungehindert, während nur wenige stark abgelenkt wurden. Aufgrund der Verteilung der Auftrefforte der α -Teilchen auf dem hinter der Goldfolie angebrachten Schirm, schloss Rutherford, dass es in einem sonst leeren Raum in den Goldatomen mindestens ein sehr kleines, positiv geladenes Objekt geben muss, dass für die Ablenkung der α -Teilchen verantwortlich ist und das er Atomkern nannte. Heute weiß man, dass Atomkerne Größenordnungen von wenigen Femtometern ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$) besitzen, damit also zehntausend mal kleiner sind als Atome, und fast die gesamte Masse des Atoms ausmachen.

Die andere bedeutende Entdeckung zum Atomaufbau wurde bereits zuvor von Joseph J. Thomson (1897) erbracht, der das Elektron e als weiteren Bestandteil von Atomen entdeckte. Thomson zeigte, dass in einer Gasentladungsröhre durch Erhitzen bestimmter Materialien und dem Anlegen eines elektrischen Feldes freie elektrisch geladene Teilchen aus den Atomen des Materials herausgelöst werden können und dass dies - unabhängig vom Material - immer die gleiche Sorte von Teilchen sind. Für diese Teilchen - die Elektronen - bestimmte Thomson mithilfe der Beschleunigung und Ablenkung in elektrischen und magnetischen Feldern das Verhältnis von Masse zu elektrischer Ladung. Elektronen sind die ersten entdeckten Teilchen in der Materie, die bis heute als Elementarteilchen ohne weitere Substruktur angesehen werden. Das Elektron besitzt eine negative elektrische Ladung von $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$. Dieser Wert wird auch als Elementarladung e bezeichnet, da - wie Robert Millikan (1913) zeigen konnte - alle vorkommenden Ladungsgrößen von gebundenen Zuständen in unserer Welt ganzzahlige Vielfache dieser Elementarladung sind.

Die beiden Entdeckungen von Rutherford und Thomson zusammengebracht, wusste man um 1910 also, dass Atome neben einem elektrisch positiv geladenen Atomkern aus einem oder mehreren elektrisch negativ geladenen Elektronen bestehen. Atome erscheinen nach außen hin elektrisch neutral, wodurch die Existenz stabiler Materie ohne eine elektrische Anziehung oder Abstoßung der Atome untereinander möglich ist. Damit die negative Ladung der Elektronen die positive Ladung des Atomkerns nach außen hin abschirmen kann, muss die Ladung des Atomkerns also $Q = +Z \cdot e$ sein, wobei die Kernladungszahl Z genau der Anzahl an Elektronen im Atom entspricht. Verschiedene Elemente unterscheiden sich insbesondere durch diese Kernladungszahl. Die anziehende bzw. abstoßende Kraft zwischen elektrisch geladenen Teilchen wird als elektromagnetische Wechselwirkung bezeichnet und in Kapitel 2.2.3 näher erläutert.

An dieser Stelle soll lediglich vorweg genommen werden, dass sich Teilchen mit einer elektrischen Ladung mit verschiedenen Vorzeichen anziehen und mit gleichem Vorzeichen abstoßen. Weshalb sich dann jedoch negativ geladene Elektronen und positiv geladene Atomkerne nicht unweigerlich anziehen und miteinander verschmelzen, können verschiedene historische Atommodelle unterschiedlich gut erklären. Im Atommodell nach Niels Bohr (1913) umkreisen die Elektronen in der Atomhülle den Atomkern auf festen geschlossenen Bahnen, ähnlich wie Planeten um die Sonne kreisen. Während das Modell die beobachteten diskreten Energiezustände der Elektronen gut erklären kann (siehe unten), würde die elektromagnetische Anziehung in diesem Modell jedoch unweigerlich dazu führen, dass die Elektronen Energie verlieren bzw. abstrahlen und sich somit spiralförmig immer stärker an den Atomkern annähern und schließlich in ihn „hineinstürzen“. Um das Problem in seinem Modell zu lösen, nahm Bohr an, dass für bestimmte Elektronenbahnen keine Energieabstrahlung stattfindet.

Eine überzeugendere Erklärung lieferten die in den 1920ern insbesondere durch Louis de Broglie, Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger geprägten Modelle mit weiterführenden quantenmechanischen Betrachtungen. Basis der Quantenmechanik ist die Idee, dass sehr kleine Objekte besondere Quanteneigenschaften besitzen, die sich nicht auf makroskopische Objekte übertragen lassen. Die Eigenschaften zeigen sich dadurch, dass messbare Größen der Quantenobjekte - sogenannte Quantenzahlen - nicht alle beliebigen, sondern nur diskrete Werte annehmen können. Ein Beispiel für solch eine Quantenzahl ist der Spin (siehe Kapitel 2.2.2). In der Quantenmechanik werden die Elektronen in der Atomhülle als Wellen bzw. als Felder modelliert. Der Ort eines Elektrons kann in dieser Beschreibung nicht mehr genau gemessen werden. Stattdessen lassen sich mithilfe des Feldes bzw. der Wellenfunktion, die ein Elektron beschreibt, Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für das Elektron für jeden beliebigen Ort ermitteln. Wie im anschließenden Kapitel erläutert, können Elektronen in der Atomhülle verschiedene diskrete Energiewerte besitzen, welche wiederum die Form der verschiedenen Wellenfunktionen - auch Zustände genannt - bestimmen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann keine vollständige Erklärung für dieses als Orbitalmodell bezeichnete Gedankengerüst geliefert werden. Es soll hier lediglich festgehalten werden, dass es einen stabilen Grundzustand gibt, in welchem sich die abstoßenden und anziehenden Kräfte auf das Elektron derart die Waage halten, dass das Elektron nicht in den Kern stürzt. Das Elektron gibt so lange Energie ab, bis es diesen Grundzustand erreicht.

Nukleonen

Betrachtet man die durch spätere Experimente heute bekannte endliche Ausdehnung der Atomkerne und die Tatsache, dass sie jeweils verschiedene Vielfache der Elementarladung e tragen, so liegt wiederum die Frage nahe, ob Atomkerne wirklich zu den final kleinsten Bausteinen der Materie zählen oder vielleicht doch eher zusammengesetzte Objekte sind. Den Beweis für eine vorhandene Substruktur des Atomkerns erbrachten zwei weitere bedeutende Entdeckungen. Einerseits entdeckte Rutherford (1919) das Proton p , wiederum mithilfe eines Streuversuches, in welchem er diesmal Stickstoff mit nun höher-energetischen α -Teilchen beschoss. Durch die höhere Energie konnten die α -Teilchen bis zum Kern der Stickstoffatome ohne Ablenkung vordringen und daraus elektrisch positiv geladene Teilchen „herausschlagen“. Rutherford erkannte, dass die herausgeschlagenen Teilchen Atomkerne von Wasserstoff waren, welche nur aus einem einzigen Proton bestehen. Das Proton trägt die positive Ladung $+e$. Die zweite Entdeckung erbrachte Chadwick (1932), der das Neutron n als weiteren Bestandteil von Atomkernen identifizierte. In einem ähnlichen Streuversuch beschoss Chadwick diesmal Beryllium mit α -Teilchen und erkannte, dass neben Kohlenstoff auch Teilchen aus den Berylliumkernen herausgelöst werden, die ungefähr die Masse des Protons besitzen, jedoch elektrisch neutral geladen sind.

Mindestens ein Proton sowie Neutronen formen demnach als sogenannte Nukleonen den Atomkern. Unterschiedliche chemische Elemente sind dabei durch eine spezielle, jeweils unterschiedliche Anzahl an Protonen charakterisiert. Atomkerne mit gleicher Anzahl an Protonen, aber unterschiedlich vielen Neutronen werden Isotope genannt.

Atomkerne bis zu einer Zahl von ca. 80 Protonen sind stabil. Darüber hinaus zerfallen sie mit berechenbaren Wahrscheinlichkeiten in bestimmten Zeiträumen in sogenannte „leichtere“ Kerne mit geringeren Kernladungszahlen. Dieser sogenannte radioaktive Zerfall umfasst drei verschiedene Phänomene. Neben dem α -Zerfall, bei welchem eines oder mehrere α -Teilchen den Atomkern verlassen, und dem γ -Zerfall, bei welchem Energie vom Atomkern in Form elektromagnetischer Strahlung abgegeben wird, ist auch der **β -Zerfall auf Elementarteilchenebene** gut beschreibbar (siehe auch Feynman-Darstellung in Kapitel 2.2.3.3). Bei den Nukleonen im Atomkern wandelt sich hierbei ein Neutron in ein Proton um oder umgekehrt. Der Erhalt der elektrischen Ladung in dieser Reaktion wird gewährleistet, da zusätzlich ein Elektron oder ein Positron³ produziert und abgestrahlt wird. Der radioaktive

³ Positronen sind die Antiteilchen der Elektronen (siehe Kapitel 2.2.2).

β -Zerfall ist ein Beispiel für eine sogenannte schwache Wechselwirkung und war außerdem Anlass für Wolfgang Pauli (1930) ein weiteres elementares Teilchen vorherzusagen. Pauli erkannte, dass in dem beschriebenen Zerfall eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron unter anderem das Prinzip der Energieerhaltung nicht gewährleistet ist, sondern es vielmehr ein Energiedefizit nach dem Zerfall im Vergleich zu davor gibt. Er setzte demnach die Existenz eines weiteren - bislang unsichtbaren, weil nicht detektierten - Teilchens voraus, welches beim β -Zerfall entsteht und die fehlende Energie „wegträgt“. Das von Pauli postulierte Teilchen mit dem Namen Elektron-Neutrino ν_e wurde viele Jahre später schließlich durch Experimente an einem Kernreaktor nachgewiesen (Cowan, Reines, Harrison, Kruse & McGuire, 1956). Neutrinos wechselwirken nur mittels der schwachen Wechselwirkung und dadurch äußert selten mit Materie und konnten daher lange unentdeckt bleiben.

Quarks

In den 1960er Jahren wusste man bereits sehr viel über die Struktur der Materie. Neben den bereits entdeckten Elementarteilchen des Elektrons und des Elektron-Neutrinos, war der Aufbau des Atomkerns aus Nukleonen hinreichend bekannt. Zusätzlich hatte Yukawa (1935) neben der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung eine weitere fundamentale Wechselwirkung vorhergesagt, die für den Zusammenhalt der Nukleonen im Atomkern verantwortlich ist und die er starke Wechselwirkung nannte. Teilchen, die an der starken Wechselwirkung teilnehmen, werden als **Hadronen** bezeichnet (altgriech. *hadrós* zu dt. stark). Bekannte Beispiele für Hadronen sind Protonen und Neutronen. Bis zu den 1960er Jahren hatte man eine Vielzahl weiterer Hadronen entdeckt wie beispielsweise die sogenannten Pionen π in der kosmischen Höhenstrahlung, von denen sich herausstellte, dass es die von Yukawa postulierten, zur starken Wechselwirkung gehörenden Austauschteilchen waren (siehe Austauschteilchen in Kapitel 2.2.3). Schließlich präsentierten Murray Gell-Mann (1964) und George Zweig (1964) eine Theorie, in welcher die entdeckten Hadronen nicht als unterschiedliche kleinste Elementarteilchen, sondern jeweils als verschiedene Kompositionen der gleichen drei Arten von noch kleineren Bestandteilen angesehen werden. Mithilfe dieser Theorie konnte man Ordnung in den sogenannten „Zoo der Hadronen“ bringen (siehe auch Kapitel 2.2.2). Die neuen Teilchen nannte Gell-Mann Quarks. Sie wurden am Forschungszentrum SLAC in Kalifornien unter anderem von Breidenbach et al. (1969) in der Kollision von beschleunigten Elektronen und Protonen nachgewiesen. Die Elektronen verhielten sich in dieser

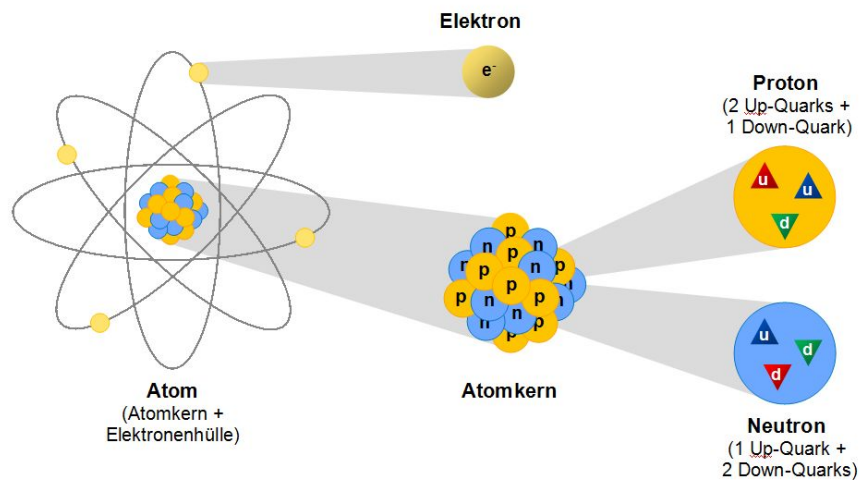


Abbildung 2.4: Bausteine der Materie - vom Atom bis zum Quark (Netzwerk Teilchenwelt, 2018)

sogenannten tiefinelastischen Streuung so, als würden sie von punktförmigen Konstituenten innerhalb der Protonen gestreut werden (siehe auch Feynman-Darstellung der Streuung in Kapitel 2.2.3.3).

Bis heute wurden neben den vorhergesagten drei insgesamt sechs verschiedene Arten von Quarks entdeckt, aus denen die Hadronen aufgebaut sind (siehe Kapitel 2.2.2). Die Hadronen der Materie - Protonen und Neutronen - bestehen jeweils aus 3 Quarks, wobei Protonen $p = (u, u, d)$ und Neutronen $n = (u, d, d)$ jeweils unterschiedliche Anzahlen an sogenannten Up-Quarks u und Down-Quarks d besitzen. Das Up-Quark trägt die elektrische Ladung $q = +2/3 e$ und das Down-Quark $q = -1/3 e$. Quarks existieren jedoch nicht isoliert, sondern nur gebunden in Hadronen wie beispielsweise Protonen und Neutronen. Hier sind die ganzzahligen Größen der elektrischen Ladung durch Addition der Quarkladungen gegeben. Experimentell wissen wir heute, dass Quarks eine räumliche Ausdehnung kleiner als 10^{-18} m besitzen. In der Theorie werden Quarks jedoch als punktförmige Elementarteilchen ohne weitere Substruktur angesehen. Eine zusammenfassende Übersicht des **Aufbaus der Materie vom Atom bis zu den Quarks** findet sich in Abbildung 2.4.

Eine letzte Frage zum Aufbau der Materie bleibt zu beantworten: Was hält die Nukleonen im Atomkern zusammen? Da Protonen alle die gleiche positive elektrische Ladung tragen, würden sie sich aufgrund der elektromagnetischen Kraft abstoßen und in Folge dessen würde der Atomkern zerfallen. Es muss also eine anziehende Kraft geben, die dieser Abstoßung entgegen wirkt. Da Protonen Masse tragen,

unterliegen sie natürlich der Gravitation, welche bewirkt, dass sich massive Körper anziehen. Die Gravitation ist jedoch betragsmäßig zu schwach, um der elektromagnetischen Kraft entgegenzuwirken.

Wie bereits erwähnt postulierte Yukawa (1935) die Existenz der starken Wechselwirkung, welche auf sehr kleinen Abständen große anziehende Kräfte zwischen den in Hadronen vorkommenden Quarks auslöst. Ähnlich wie die elektromagnetische Kraft nur auf elektrisch geladene Teilchen wirkt, nimmt man an, dass die starke Kraft nur auf Teilchen mit einer starken Ladung - der sogenannten Farbladung - wirkt. Quarks tragen unter anderem diese Farbladung (siehe Kapitel 2.2.2). Die anziehende starke Kraft zwischen Quarks hat außerdem indirekt zur Folge, dass Hadronen wie die Nukleonen im Atomkern aneinander haften bleiben: Die Nukleonen gehen auf kleinen Abständen Bindungszustände ähnlich der aus der Chemie bekannten kovalenten Bindung zwischen Atomen ein. Die Nukleonen „besitzen“ dabei gemeinsam Quarks und haften durch die Anziehung der geteilten Quarks zu den jeweiligen anderen Konstituenten-Quarks aneinander.

Fritzsch und Gell-Man (1972) entwickelten Yukawas Theorie weiter und nahmen an, dass die starke Wechselwirkung durch den Austausch weiterer Elementarteilchen, den sogenannten Gluonen, vermittelt wird, die ebenfalls Farbladungen tragen. Die Existenz der Gluonen wurde von verschiedenen Experimenten am Teilchenbeschleuniger *PETRA* am Forschungszentrum *DESY* in Hamburg nachgewiesen (MARK-J Collaboration, Barber, D. P. et al., 1979; PLUTO Collaboration, Berger, Ch. et al., 1979; TASSO Collaboration, Brandelik, R. et al., 1979). Man hatte entdeckt, dass bei der Kollision von beschleunigten Elektronen und Positronen jeweils drei Strahlbündel - sogenannte Jets - entstehen, die aus vielen Hadronen bestehen, welche zusammen jeweils in verschiedene Richtungen abstrahlen. Das Drei-Jets-Phänomen konnte durch die Annahme erklärt werden, dass bei der Kollision ein Quark sowie sein Antiteilchen - das Antiquark - entstehen, von denen eines noch zusätzlich ein Gluon aussendet. Quark, Antiquark und Gluon sind dann jeweils Ursprung der Jets. Gluonen besitzen keine Masse, sind elektrisch neutral und gelten bis heute als Elementarteilchen ohne weitere Substruktur.

2.2.2 Elementarteilchen und zusammengesetzte Teilchen

Im vorangegangenen Kapitel wurden bereits verschiedene Teilchen im Zusammenhang mit der Struktur der Materie eingeführt, von denen einige - wie z.B. das Elektron, das Elektron-Neutrino, die Quarks und die Gluonen - als Elementarteilchen

bezeichnet wurden. **Elementarteilchen** zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine - zumindest aktuell bekannte - permanente Substruktur besitzen. Sie sind aus keinen anderen Teilchen aufgebaut und damit die kleinsten bzw. elementarsten Objekte der Welt, die in der Theorie als punktförmig angenommen werden. Darüber hinaus beschäftigt sich die Teilchenphysik auch mit Teilchen, die aus Elementarteilchen zusammengesetzt sind. Beispiele für solche **zusammengesetzten Teilchen** in der Materie sind die bereits erwähnten Nukleonen im Atomkern, welche aus Quarks aufgebaut sind und damit zur Teilchengruppe der **Hadronen** zählen.

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie sich der heutige Bestand an entdeckten Elementarteilchen und zusammengesetzten Teilchen über die Bausteine der Materie hinaus erweitert hat. Um einen **Überblick über die Vielzahl der Teilchen** zu erhalten, werden unterschiedliche **Klassifikationsschemen** diskutiert, mit deren Hilfe sich alle Teilchen nach verschiedenen **Teilcheneigenschaften** ordnen lassen. Eine besondere Einteilung von Elementarteilchen besteht in der Feststellung, an welchen Arten von fundamentalen Wechselwirkungen sie jeweils teilnehmen. Diese spezielle Klassifikationsweise wird in Kapitel 2.2.5 näher erläutert.

2.2.2.1 Überblick

Zunächst soll betrachtet werden, welche **Elementarteilchen** bislang überhaupt entdeckt wurden und welche verschiedenen Eigenschaften sie jeweils besitzen. Abbildung 2.5 gibt einen bereits geordneten Überblick über alle bekannten Elementarteilchen. Hierbei fällt eine Einteilung nach verschiedenen Werten der Größe s auf. Der sogenannte Spin s ist eine quantenmechanische Eigenschaft von Teilchen - eine sogenannte Quantenzahl - und lässt sich anschaulich am ehesten damit herleiten bzw. vergleichen, dass die Teilchen um ihre eigene Achse rotieren⁴. Der Wert von s gibt in diesem Bild Auskunft darüber, mit welcher festen charakteristischen Winkelgeschwindigkeit und Drehrichtung das Teilchen um seine Drehachse rotiert.

Elektrisch geladene Teilchen mit Spin besitzen außerdem ein sogenanntes magnetisches Dipolmoment, was sich durch folgendes Phänomen beschreiben lässt: Zunächst einmal zeigt rotierende elektrische Ladung magnetische Eigenschaften. Bringt man beispielsweise das Elektron e in ein äußeres Magnetfeld, so richtet sich das Elektron wie kleine Magnetnadeln bezüglich des Magnetfeldes aus. Die Ausrichtung wird dabei vom Spin des Teilchens bestimmt. Hier zeigt sich das quanten-

⁴ Das Bild des Spins als Drehung um eine Drehachse dient hier nur als klassisch vorstellbares Analogon. Bei den als punktförmig angenommen Elementarteilchen lässt sich keine Drehachse eindeutig definieren.

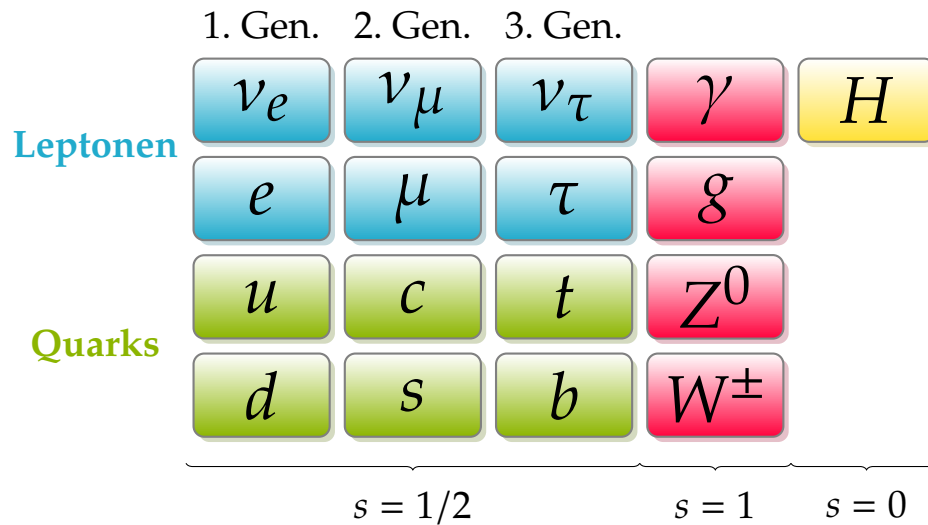


Abbildung 2.5: Übersicht über die verschiedenen Elementarteilchen geordnet nach drei Generationen von Fermionen (mit halbzahligem Spin $s = 1/2$) sowie nach Bosonen (mit ganzzahligem Spin $s = 0$ bzw. $s = 1$). Für einzelne Teilchenbezeichnungen siehe Fließtext.

mechanische und nicht klassische Verhalten des Elektrons als Quantenobjekt. Man findet nämlich, dass ein Teilchen mit Spin s nicht alle beliebigen, sondern nur $2s + 1$ mögliche Ausrichtungen im äußeren Feld einnehmen kann. Das Elektron mit $s = 1/2$ hat demnach 2 mögliche Raumausrichtungen. Die Elementarteilchen tragen die Spin-Werte von $1/2$, 1 oder 0 . Teilchen mit einem halbzahligem Spin werden Fermionen und Teilchen mit ganzzahligem Spin werden Bosonen genannt.

2.2.2.2 Fermionen

In der Gruppe der Fermionen unter den Elementarteilchen mit $s = 1/2$ finden sich zwei weitere Untergruppierungen: **Leptonen** und **Quarks**. Hauptunterschied dieser beiden Gruppen ist, dass Leptonen als elektrische Ladung ganzzahlige Vielfache der Elementarladung e tragen (mit Werten $0e$ oder $-1e$) und außerdem keine starke Farbladung besitzen, während Quarks elektrische Ladungen von $2/3e$ oder $-1/3e$ tragen, nicht isoliert existieren und gekoppelt an ihre Farbladung der starken Wechselwirkung unterliegen.

Leptonen

Innerhalb der Gruppe der Leptonen wurden im vorangegangenen Kapitel bereits die Entdeckungen des Elektrons e und des Elektron-Neutrinos ν_e diskutiert. Ersteres trägt die elektrische Ladung $q = -1e$. Das Neutrino ist elektrisch neutral ($q = 0e$).

Das Elektron besitzt eine Masse⁵ von $0,511 \text{ MeV} = 0,511 \cdot 10^6 \text{ eV}$, während aktuelle Messungen für die Masse des Neutrinos eine Obergrenze von 2 eV angeben. In der Theorie des Standardmodells werden Neutrinos als masselos angenommen (siehe Standardmodell in Kapitel 2.2.5).

Analog zu Elektron und Elektron-Neutrino gibt es noch zwei weitere Paare von Leptonen: Myon μ und Myon-Neutrino ν_μ sowie Tau-Lepton τ und Tau-Neutrino ν_τ . Die verschiedenen Paare werden auch als Teilchen unterschiedlicher **Generationen** bezeichnet. Während auf Ebene der elektrischen Ladungen die zweite und dritte Generation exakte Kopien der ersten Generation sind, nimmt die Masse - zumindest der elektrisch geladenen Leptonen - über die Generationen hinweg sukzessiv zu. Das Myon besitze eine Masse von ca. 106 MeV , das Tau-Lepton von 1777 MeV . Das Myon und das Tau-Lepton wurden erst sehr viel später entdeckt als das Elektron. Das Myon konnte 1936 in der kosmischen Höhenstrahlung detektiert werden (Neddermeyer & Anderson, 1937), während das Tau-Lepton 1975 in den Elektron-Proton-Kollisionen am Forschungszentrum *SLAC* in Kalifornien nachgewiesen wurde (Perl et al., 1975). Myon und Tau-Lepton sind sehr kurzlebig und zerfallen innerhalb von weniger als einer millionstel Sekunde unter anderem unter Aussendung von Neutrinos in ihre leichteren Leptonen-Geschwister. Das Elektron sowie alle Neutrinos sind dagegen stabil und zerfallen nicht weiter⁶. Wie bereits erwähnt ist ein Nachweis von Neutrinos bis heute nur mit großen statistischen Datenmengen möglich, da sie nur durch die schwache Wechselwirkung mit ihrer Umwelt agieren, welche äußerst selten auftritt.

Quarks

In der anderen Gruppe der Fermionen - den Quarks - findet sich eine Entdeckungsgeschichte und Unterordnung, die sehr analog zu den Leptonen verläuft. Up-Quark u und Down-Quark d sind als Bestandteile der Nukleonen im Atomkern in den 1960ern

⁵ In Folge der von Einstein vorgeschlagenen Äquivalenz von Energie und Masse (vereinfacht ausgedrückt $E = mc^2$) werden in der Teilchenphysik in der Regel Teilchenmassen in Energieeinheiten angegeben. Mit der Setzung von $c^2 \equiv 1$ in Natürlichen Einheiten (siehe unten) verwendet man als Energieeinheit Elektronenvolt mit $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$. Umgerechnet in Kilogramm wiegt das Elektron demnach ca. $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. Zur Erklärung Natürlicher Einheiten: In bestimmten physikalischen Gebieten werden in der Regel für einen vereinfachten Formalismus sogenannte Natürliche Einheiten verwendet, bei welchen alle Größen in Einheiten gewisser „Naturkonstanten“ bzw. kleinster oder größter vorkommender Werte für bestimmte Größen angegeben werden. In der Teilchenphysik wird zu diesem Zweck unter anderem dem Planksche Wirkungsquantum $\hbar$ sowie der Vakuumlichtgeschwindigkeit c und der Elementarladung e formal der Wert 1 zugeschrieben und dann alle anderen Einheiten entsprechend umgerechnet.

⁶ Für Neutrinos sollte man jedoch mit Aussagen zu ihrer Stabilität vorsichtig sein. Wie in Kapitel 2.2.7 erläutert, können sich Neutrinos im Rahmen sogenannter Neutrino-Oszillationen zumindest ineinander umwandeln.

als Bausteine der Materie entdeckt worden. u und d werden - gemeinsam mit Elektron und Elektron-Neutrino - der 1. Generation von fermionischen Elementarteilchen zugeordnet. Das Up-Quark trägt eine Masse von ca. 3 MeV und das Down-Quark von 6 MeV. Analog zu den Leptonen wurden bislang zwei weitere schwerere Paare von Quarks entdeckt die der zweiten und dritten Generation angehören: Das Strange-Quark s mit einer Masse von ca. 100 MeV wurde zusammen mit den Quarks der ersten Generation 1964 von Gell-Mann postuliert, um Ordnung in den „Zoo der Hadronen“ zu bringen und indirekt durch den Quarknachweis 1969 am Forschungszentrum *SLAC* in Kalifornien mit entdeckt (siehe vorangegangenes Kapitel). Ebenfalls in der zweiten Generation findet sich das Charme-Quark c mit 1200 MeV, welches 1974 von zwei unabhängigen Experimenten am *SLAC* als Bestandteil eines Hadrons nachgewiesen wurde, das von den Experimenten den kombinierten Namen J/Ψ erhielt (Aubert et al., 1974; Augustin et al., 1974). Die dritte und schwerste Generation wird gebildet vom Bottom-Quark b mit ca. 4300 MeV, welches 1977 am *Fermilab* bei Chicago in einem Hadron namens Upsilon entdeckt wurde (Herb et al., 1977), und dem Top-Quark t mit ca. 172 GeV, das erst 1995 am gleichen Ort nachgewiesen werden konnte (CDF Collaboration, Abe, F. et al., 1995; D0 Collaboration, Abachi, S. et al., 1995).

Bislang sind keine weiteren Quarksorten über die sechs beschriebenen hinaus entdeckt worden⁷. Die Quarks besitzen drittelzahlige elektrische Ladungen: u , c und t tragen die Ladung $+2/3e$ und d , s und b die Ladung $-1/3e$. Obwohl Quarks nicht einzeln, sondern nur in zusammengesetzten Teilchen existieren, zerfallen schwere Quarks ähnlich wie freie Leptonen mit gewissen Wahrscheinlichkeiten in leichtere Quarks. Es sind dabei nur Zerfälle möglich, bei denen gewisse physikalische Größen erhalten bleiben (siehe Erhaltungsgrößen in Kapitel 2.2.4).

Schließlich tragen Quarks zusätzlich zur elektrischen Ladung noch eine weitere charakteristische Eigenschaft, die **Farbladung** genannt wird. Farbladungen sind nicht beobachtbar. Es handelt sich dabei vielmehr um eine theoretische Zuschreibung von Eigenschaften an die Quarks, die erklären und vorhersagen kann, wieso Quarks über die starke Wechselwirkung aufeinander Einfluss nehmen und andere Teilchen wie Leptonen nicht. Ähnlich wie an der elektromagnetischen Wechselwirkung nur Teilchen mit elektrischer Ladung teilnehmen, wirkt die starke Wechselwirkung nur auf Teilchen mit Farbladung. Dieses Ladungskonzept wird im nächsten Unterkapitel

⁷ Andererseits konnte bislang jedoch auch kein Grund dafür gefunden werden, weshalb es nur genau drei Generationen von Fermionen unter den Elementarteilchen gibt. Gleiches gilt im Übrigen auch für die 3 bisher bekannten Leptongenerationen.

vertieft. Hier soll lediglich festgehalten werden, dass das Konstrukt der Farbladung drei mögliche Werte annehmen kann, die als rot, blau und grün bezeichnet werden⁸. Alle Quarks können theoretisch jede der drei Farbladungen tragen. Man sagt „sie können in allen drei Farben vorkommen“.

Da bislang die elektromagnetische Ladung sowie die Farbladung als Teilcheneigenschaften angesprochen wurden, soll der Vollständigkeit halber an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass alle Fermionen zusätzlich noch eine weitere Ladungsart tragen: Die sogenannten schwache Ladung. Diese Ladungsart ist ursächlich dafür verantwortlich, welche Teilchen auf welche Weise an der sogenannten schwachen Wechselwirkung teilnehmen (siehe Kapitel 2.2.3).

2.2.2.3 Bosonen

Es fehlt noch eine letzte Gruppe der in Abbildung 2.5 dargestellten Elementarteilchen in der bisherigen Auflistung: Die Bosonen mit ganzzahligen Spin-Werten. Es handelt sich hier einerseits um die sogenannten **Eichbosonen**, welche mit einem Spin-Wert von $s = 1$ zur Gruppe der Vektorbosonen zählen. Wie im nächsten Unterkapitel diskutiert wird, fungieren die Eichbosonen insbesondere als Vermittler der fundamentalen Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen. Sie werden deshalb auch oft intermediäre Bosonen oder Austauschteilchen genannt. Andererseits findet sich unter bosonischen Elementarteilchen ein Teilchen mit $s = 0$, was aufgrund seines Spin-Werts zu den sogenannten skalaren Bosonen zählt: Das **Higgs-Boson**.

Eichbosonen

Es gibt vier verschiedene Arten von Eichbosonen, korrespondierend zu den drei fundamentalen Wechselwirkungen elektromagnetisch, stark und schwach.

Das Photon γ gilt als Vermittler der elektromagnetischen Wechselwirkung. Es ist ein masseloses, stabiles Teilchen, welches die elektrische Ladung $0e$ trägt, jedoch mit allen elektrisch geladenen Teilchen wechselwirken kann. Die Idee, dass sich Licht neben seiner Beschreibung als elektromagnetische Welle (im sogenannten Wellenbild) auch als ein Strom von Teilchen (im sogenannten Teilchenbild) darstellen lässt, wurde insbesondere durch Albert Einstein (1905) geprägt. Hierbei ist die Energie

⁸ Die Namensgebung hat nur indirekt mit den von uns wahrgenommen Farben zu tun, die durch elektromagnetische Wellen mit unterschiedlicher Wellenlänge erzeugt werden. Es handelt sich bei den Werten der Farbladung vielmehr um ein erfundenes Konzept, das drei verschiedene Werte annehmen kann, wie z.B. auch orange, pink und türkis oder auch 1, 2 und 3, die jedoch in der Summe „neutral“ erscheinen. Die neutrale Farbe Weiß ergibt sich aus der Kombination der Farbladungen rot, blau und grün.

der Teilchen proportional zur Frequenz der elektromagnetischen Welle. 1922 lieferte Arthur Holly Compton den Beweis für die Existenz dieser als Photonen bezeichneten „Lichtteilchen“ im Röntgenlicht (Compton, 1923).

Gluonen g sind für die starke Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen verantwortlich, die Farbladung tragen. Ein bereits diskutiertes Beispiel ist die Wechselwirkung zwischen den Quarks, aus welchen die Nukleonen in Atomkernen aufgebaut sind. Gluonen sind wie Photonen masselos, stabil und elektrisch neutral geladen. Gluonen tragen jedoch selbst Farbladung, die - wie bereits bei den Quarks diskutiert - keine beobachtbare Größe ist. Die möglichen Werte für die Farbladung der Gluonen lassen sich theoretisch aus dem Umstand ableiten, dass für die Bildung von stabilen Hadronen - wie z.B. Protonen - eine durch Gluonen vermittelte anziehende starke Wechselwirkung zwischen den selbst farbig geladenen Konstituenten-Quarks stattfinden muss. Es lässt sich zeigen, dass die Bildung aller bekannter Hadronen dadurch erklärt werden kann, dass Gluonen ein Paar aus einer starker Farbladung (rot, grün, blau) und einer sogenannten starken Antifarbladung (antirot, antigrün, antiblau) tragen. Aus tieferen theoretischen Gründen - auf welche in diesem Rahmen nicht eingegangen werden kann - sind für die Kombination von Farbe und Antifarbe insgesamt nur acht verschiedene Möglichkeiten in der Natur realisiert. Anders ausgedrückt gibt es acht verschieden-farbig geladene Gluonen. Die Entdeckung von Gluonen 1979 am DESY in Hamburg wurden schon im vorangegangenen Kapitel beschrieben.

Das sogenannte Z-Boson Z^0 sowie die W-Bosonen $W^\pm$ sind Vermittler der schwachen Wechselwirkung, wie sie zum Beispiel beim radioaktiven Betazerfall im Atomkern stattfindet (siehe auch Kapitel 2.2.3). Die W-Bosonen tragen die elektrische Ladung $\pm e$, während das Z-Boson elektrisch neutral ist. Im Gegensatz zu Photonen und Gluonen sind W- und Z-Bosonen weder masselos noch für längere Zeit stabil. Während die W-Bosonen eine Masse von ca. 80,4 GeV tragen, wiegt das Z-Boson ca. 91,2 GeV. Alle drei Bosonen zerfallen nach einer mittleren Lebensdauer von $3 \cdot 10^{-25}$ Sekunden in Paare von Leptonen oder Quarks. Es handelt sich daher um sehr kurzlebige Teilchen. Mit der Masse und dem Zerfall der W- und Z-Bosonen geht auch die Tatsache einher, dass die durch die Bosonen übermittelte schwache Wechselwirkung nur sehr kurzreichweitig ist. Die Existenz der W- und Z-Bosonen wurde bereits in den 1960er Jahren im Rahmen der Theorie zur sogenannten elektroschwachen Wechselwirkung postuliert (Glashow, 1959; Salam & Ward, 1959; Weinberg, 1967). Aufgrund ihrer kurzen Lebensdauern und hohen Masse konnte der Nachweis der Bosonen jedoch erst mit der Möglichkeit zur Erzeugung von Teilchenkollisionen mit

sehr hoher Schwerpunktsenergie erbracht werden⁹. 1983 gelang es Forschenden am CERN in Genf, bei Proton-Antiproton-Kollisionen aus den entsprechenden Zerfallsprodukten zu rekonstruieren, dass sowohl W- als auch Z-Bosonen für kurze Zeit nach der Kollision existiert hatten (UA1 Collaboration, Arnison, G. et al., 1983; UA2 Collaboration, Bagnaia, P. et al., 1983).

Higgs-Boson

Andererseits gibt es unter den Elementarteilchen noch ein einziges Boson mit dem Spin-Wert $s = 0$: Das Higgs-Boson. Ihm kommt im Standardmodell der Teilchenphysik eine besondere Rolle zu. Unter dem Begriff Higgs-Mechanismus¹⁰ kann erklärt werden, auf welche Weise alle massiven Elementarteilchen mit einem sogenannten Higgs-Feld wechselwirken und erst dadurch ihre speziellen Teilchenmassen erhalten. Das Higgs-Boson selbst wird in diesem Bild als Anregung des Higgs-Feldes verstanden, ähnlich wie das Photon die Anregung eines elektromagnetischen Feldes repräsentiert (siehe auch Higgs-Mechanismus in Kapitel 2.2.5.1). Das Higgs-Boson ist elektrisch neutral, es trägt eine Masse von ca. 125 GeV und zerfällt nach einer mittleren Lebensdauer von 10^{-22} Sekunden. Die möglichen Zerfallsarten werden an späterer Stelle diskutiert. Die Idee zur Existenz des Higgs-Bosons wurde von Peter Higgs (1964) im Zusammenhang mit dem von ihm und anderen beschriebenen Higgs-Mechanismus entwickelt. Das Higgs-Boson als „jüngstes“ entdecktes Elementarteilchen konnte jedoch erst 2012 von den ATLAS- und CMS-Kollaborationen am CERN in Genf nachgewiesen werden (ATLAS Collaboration, Aad, G. et al., 2012; CMS Collaboration, Chatrchyan, S. et al., 2012).

2.2.2.4 Antiteilchen und Antimaterie

Bis hierhin wurde streng genommen nur die eine Hälfte der Elementarteilchen vorgestellt. Das vollständige Set aller bislang entdeckten Elementarteilchen im Standardmodell der Teilchenphysik umfasst für jedes Teilchen ein zugehöriges **Antiteilchen** mit den jeweils exakt gleichen Eigenschaften wie Spin, Masse und Lebensdauer. Einziger Unterschied zwischen einem Teilchen und seinem Antiteilchen besteht in der

⁹ Hier gilt wiederum Einsteins Äquivalenz von Energie und Masse. W- und Z-Bosonen konnten erst produziert und dementsprechend nachgewiesen werden, als es technisch möglich war, derart beschleunigte Teilchenstrahlen kollidieren zu lassen, dass die sogenannte *Schwerpunktsenergie*, die bei der Kollision entsteht, für die Produktion der *massiven* Teilchen ausreicht (siehe auch Kapitel 2.2.3.4).

¹⁰ Offiziell wird der Mechanismus nach allen seinen Begründern als Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble-Mechanismus bezeichnet.

„Umkehrung“ der Ladungen. Im Falle der elektrischen Ladung wird für diese Umkehrung einfach das Vorzeichen gedreht. Für die Farbladungen werden sogenannte Antifarben eingeführt: Trägt ein Quark z.B. die Farbladung grün, so besitzt sein Antiteilchen die Farbladung antigrün. Die Umkehrung gilt jedoch auch für alle anderen möglichen Ladungen, wie z.B. die schwache Ladung (siehe nächstes Unterkapitel). Für einige Teilchen, welche in allen Ladungen einen neutralen Wert besitzen, gibt es kein spezielles Antiteilchen. Stattdessen sind diese Teilchen ihre eigenen Antiteilchen. Beispiele hierfür sind das Photon und das Z-Boson.

Es wurde für die Namensgebung und Notation der Antiteilchen festgelegt, dass sie wie ihre „normalen“ Teilchenpartner mit dem Zusatz „Anti“ heißen und mit einem Querbalken notiert werden. So gibt es z.B. das Antimyon $\bar{\mu}$, das Antitauneutrino $\bar{\nu}_\tau$, das Up-Antiquark $\bar{u}$ oder auch das Antigluon $\bar{g}$. Eine Ausnahme dieser Regel bildet die Bezeichnung des Positron e^+ als Antiteilchen des Elektrons.

Die Existenz von Antiteilchen mit den beschriebenen Eigenschaften lässt sich auch theoretisch herleiten. Die exakte Herleitung würde zwar den Rahmen dieser Arbeit überschreiten, die Idee dahinter lässt sich jedoch verkürzt beschreiben. Im vorangegangenen Kapitel wurde erläutert, wie sich die Elektronen in der Atomhülle als kleine Quantenobjekte durch Wellen - formal als Wellenfunktionen bezeichnet - beschreiben lassen. Dabei entspricht jede Wellenfunktion eines Elektrons einer gewissen Energie, die es besitzen kann. Der Zusammenhang zwischen den möglichen Wellenfunktionen eines Elektrons zu den beobachteten Energien der Elektronen z.B. in der Atomhülle wurde von Erwin Schrödinger (1926) beschrieben.

Elektronen als Elementarteilchen sind als Quantenobjekte jedoch nicht nur besonders klein, sondern bewegen sich auch mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit. Die Bewegungen derart schneller Objekte lassen sich nicht mehr mit den klassischen Gesetzen der Mechanik beschreiben. Vielmehr wird in der Physik die von Albert Einstein eingeführte Relativitätstheorie zur Modellierung verwendet.

Es gelang Paul Dirac (1928) die von Schrödinger aufgestellte Wellenfunktion für Elektronen derart zu einer Wellengleichung weiterzuentwickeln, dass neben den quantenmechanischen Eigenschaften auch die Besonderheiten der Relativitätstheorie berücksichtigt werden. Mit diesem als Dirac-Gleichung bezeichneten Modell lassen sich die Eigenschaften und das Verhalten von Elektronen besser denken. Eine Folge von Diracs Ansatz ist die Tatsache, dass es hypothetisch neben dem Elektron ein weiteres Teilchen mit gleichem Spin und gleicher Masse, jedoch unterschiedlicher elektrischer Ladung für eine feste vorgegebene Energie gibt, welches ebenfalls die Dirac-Gleichung erfüllt: Das Antiteilchen zum Elektron.

Obwohl Dirac seine Gleichung zunächst allgemein für Fermionen mit Spin $s = 1/2$ formulierte, lässt sich die Existenz der Antiteilchen für alle geladenen Elementarteilchen herleiten. Die Dirac-Gleichung bildet eine der Grundlagen, auf denen in der sogenannten Quantenfeldtheorie die gemeinsame Beschreibung von Wechselwirkungen und Elementarteilchen fußt (siehe Kapitel 2.2.5).

Die uns umgebende Materie ist aus Teilchen und nicht aus Antiteilchen aufgebaut. Kommt ein Antiteilchen mit seinem zugehörigen Teilchen in Kontakt, so werden beide in einem sogenannten Annihilationsprozess vernichtet. Bei bestimmten Phänomenen bzw. Experimenten lassen sich Antiteilchen dennoch beobachten: Beim radioaktiven Betazerfall in Atomkernen z.B. entsteht für kurze Zeit ein Positron, bevor es von der umgebenden Materie annihiliert wird. Unter bestimmten Umständen mit genügend hoher verfügbarer Energie ist es außerdem möglich, dass ein Paar aus einem Teilchen und einem Antiteilchen erzeugt wird. Ein solches Phänomen findet sich z.B. in der an der Erde ankommenden kosmischen Höhenstrahlung. In dieser Strahlung wies C. D. Anderson (1933) das Positron nach. Bis heute konnten alle Antiteilchen zu den bekannten Elementarteilchen in der Höhenstrahlung oder im Rahmen von Kollisionsexperimenten an Teilchenbeschleunigern entdeckt werden.

Da die fundamentalen Wechselwirkungen für Teilchen und Antiteilchen gleich aussehen, ist es theoretisch ganz analog zum Materieaufbau möglich, dass **Antimaterie** aus Antiteilchen gebildet wird. Für eine künstliche Herstellung von Antimaterie müssen zunächst die technischen Möglichkeiten gegeben sein, um die richtigen Antiteilchen mit der richtigen Energie zu erzeugen und zusammenzubringen, bevor sie mit der umgebenden Materie wechselwirken. 2011 gelang es Forschenden am CERN bei Genf Antiwasserstoffatome zu bilden und für über 1000 Sekunden am Leben zu halten (ALPHA Collaboration, Andresen, G.B. et al., 2011).

2.2.2.5 Zusammengesetzte Teilchen

Zum Schluss der Diskussion zu den Teilchen in der Teilchenphysik soll noch eine kurze Übersicht über die bekannten aus Elementarteilchen **zusammengesetzten Teilchen** gegeben werden. Hierzu zählen neben den größeren Strukturen in der Materie wie Atome und Atomkerne vor allem die bereits mehrfach erwähnten **Hadronen**.

Hadronen

Hadronen sind aus Quarks aufgebaut. Dabei finden sich entweder Kombinationen aus einem Quark und einem Antiquark (Mesonen) oder Kombinationen aus

drei Quarks (Baryonen)¹¹. Aus der Addition der entsprechenden Eigenschaften des Quarkinhalts lassen sich die Hadroneneigenschaften wie z.B. elektrische Ladung oder Spin ableiten¹². So findet man, dass alle Mesonen zur Gruppe der Bosonen mit ganzzahligem Spin $s = 0$ oder $s = 1$ zählen und alle Baryonen zur Gruppe der Fermionen mit einem halbzahligem Spin von $s = 1/2$ oder $s = 3/2$. Durch Addition der drittelzahligen Quarkladungen in Mesonen bzw. Baryonen existieren nur Hadronen, die ganzzahlige elektrische Ladungswerte tragen. Die Farbladungen über die Konstituenten-Quarks in Hadronen sind derart verteilt, dass das Hadron als Ganzes nach außen hin „farbneutral“ erscheint.

Insgesamt wurden bis heute viele hunderte verschiedene Baryonen und Mesonen entdeckt bzw. vorhergesagt, die aus den bekannten sechs Quarksorten aufgebaut sind (Particle Data Group, Tanabashi, M. et al., 2018). Protonen (Quarkinhalt uud) und Neutronen (udd) wurden bereits als bekannte Baryonen in der Materie diskutiert. Baryonen besitzen Massen zwischen ca. 938 MeV (Proton) und ca. 6046 MeV (Ω_b -Baryon mit Quarkinhalt ssb). Die als erstes entdeckten und mit ca. 135 – 140 MeV auch leichtesten Mesonen sind die Pionen π^0 und $\pi^\pm$, die ebenfalls nur aus Up- und Down-Quarks aufgebaut sind und von Neddermeyer und Anderson (1937) in der kosmischen Höhenstrahlung nachgewiesen wurden. Ein weiteres bereits erwähntes Mesonenbeispiel ist das J/Ψ ($c\bar{c}$), welches 1974 eine besondere Rolle bei der Entdeckung des Charme-Quarks am Forschungszentrum SLAC in Kalifornien spielte. Das Meson η_b ($b\bar{b}$) wurde dagegen erst 2008 am SLAC in Kalifornien entdeckt (BaBar Experiment, Aubert, B. et al., 2008).

Alle Hadronen außer dem Proton sind instabil, das heißt, sie zerfallen nach einer gewissen Zeit in andere Teilchen. Dabei können leichtere Hadronen oder auch Leptonen oder Photonen entstehen. Art und Anzahl der Zerfallsprodukte sind abhängig von der Art der fundamentalen Wechselwirkung, durch die sich der Zerfall eines Hadrons beschreiben lässt (siehe Kapitel 2.2.3).

¹¹ Tatsächlich bestehen Hadronen nicht nur aus zwei oder drei Quarks, sondern auch aus Gluonen, die ständig zwischen den Quarks ausgetauscht werden und ihrerseits für kurze Zeit in Paare von Quarks und Antiquarks übergehen bzw. fluktuieren können. Dieses komplexere Quarkmodell soll hier jedoch nicht weiter vertieft werden, da die nach außen hin bekannten Eigenschaften der Hadronen wie z.B. der Spin hier hinreichend gut durch das vereinfachte Modell mit einem Aufbau aus den zwei bzw. drei sogenannten Valenzquarks erklärt werden können.

¹² Die Berechnung der Hadronenspins ergibt sich hierbei nicht nur über eine einfache Addition der Quarkspins. Zusätzlich muss noch berücksichtigt werden, dass es im Bild des Spins als Rotation eines Teilchens um seine eigene Drehachse zwei mögliche Ausrichtungen bzw. Drehrichtungen für Teilchen mit $s = 1/2$ gibt. Je nachdem ob die Spins parallel oder antiparallel zueinander stehen, erhalten die Spins der Quarks in der Berechnung des Gesamthadronenspins ein positives oder negatives Vorzeichen.

Hadronen als solche blieben bis ins 20. Jahrhundert hinein unentdeckt. Zum einen lässt sich dies dadurch erklären, dass die Teilchen mit mittleren Lebensdauern zwischen 10^{-8} und 10^{-24} Sekunden nach sehr kurzer Zeit wieder zerfallen. Andererseits ist zur Erzeugung der doch recht schweren Hadronen nach Einsteins Äquivalenz von Energie und Masse sehr viel Energie nötig. Als derart hochenergetische Teilchenquellen können nur die kosmische Höhenstrahlung in der Natur sowie Experimente mit beschleunigten Teilchenstrahlen dienen. Dennoch waren in den 1960er Jahren bereits über 100 verschiedene Hadronen entdeckt worden, die bis dahin als Elementarteilchen ohne Substruktur erachtet wurden. Es gab verschiedene Versuche zur Klassifikation der Hadronen. Ein sehr berühmtes Modell ist der sogenannte „achtfache Weg“ von Gell-Mann (1961) und Ne’eman (1961), in welchem ähnliche Hadronen in Gruppen - sogenannten Supermultipletts - zusammengefasst werden, wobei jedes Teilchen eines Supermultipletts unterschiedliche Werte für gewisse Quantenzahlen hat. Ordnet man die Teilchen eines Supermultipletts geometrisch als Punkte gemäß dieser Quantenzahlenwerte an, so finden sich symmetrische Muster. Aufgrund fehlender Punkte innerhalb dieser Muster konnten verschiedenen Hadronen vorhergesagt werden. Neue Muster für Supermultipletts, aus denen noch kein Teilchen entdeckt wurde, ließen sich mit dieser Methode jedoch nicht voraussagen. Einen erfolgreichen Ansatz zur Vorhersage und Klassifikation der Hadronen lieferten Gell-Mann (1964) und Zweig (1964), die in ihrem **Quarkmodell** alle Hadronen als Zusammensetzungen zunächst aus den drei verschiedenen Quarks u , d und s beschrieben. Die zur damaligen Zeit entdeckten Hadronen konnten vollständig durch diese Theorie erklärt werden. Wie bereits erwähnt, wurde die Theorie durch die Entdeckung weiterer Hadronen auf die sechs bekannten Quarksorten erweitert.

2.2.3 Fundamentale Wechselwirkungen

2.2.3.1 Allgemeine phänomenologische Betrachtungen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel alle bekannten Elementarteilchen vorgestellt wurden, soll nun erläutert werden, wie diese miteinander interagieren können. Die verschiedenen Arten der Interaktion werden als **fundamentale Wechselwirkungen** oder auch als **fundamentale Kräfte** bezeichnet. Insgesamt sind vier verschiedene Arten von fundamentalen Wechselwirkungen bekannt: Die elektromagnetische Wechselwirkung, die starke Wechselwirkung, die schwache Wechselwirkung sowie die Gravitation. Alle bekannten physikalischen Kräfte lassen sich schlussendlich auf

diese vier Wechselwirkungen zurückführen. Außerhalb der Kern- und Teilchenphysik sind für uns Menschen auf makroskopischer Ebene lediglich die elektromagnetische Wechselwirkung sowie die Gravitation durch ihre Kraftwirkungen zwischen Körpern mit elektrischen Ladungen bzw. mit Massen direkt beobachtbar. Wie im Folgenden diskutiert werden wird, spielen die starke und schwache Wechselwirkung lediglich auf sehr kleinen Abstandsskalen wie z.B. zwischen Elementarteilchen eine Rolle.

Verschiedene Phänomene im Zusammenhang mit der Struktur der Materie sowie mit dem Aufbau der Hadronen wurden bereits auf drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen zurückgeführt. So ist die elektromagnetische Wechselwirkung beispielsweise innerhalb von Atomen für die Bindung der Elektronen an den Atomkern verantwortlich. Die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks sorgt unter anderem für den Zusammenhalt von Hadronen und die schwache Wechselwirkung liegt dem radioaktiven Betazerfall von Nukleonen zugrunde.

Die fundamentalen Wechselwirkungen werden in der Teilchenphysik auf verschiedenen Ebenen beschrieben: Während in Kapitel 2.2.5 eine mathematisch genaue Modellierung mithilfe der Methoden aus dem Gebiet der Quantenfeldtheorie umrissen wird, soll in den folgenden Abschnitten zunächst auf phänomenologischer Ebene ein Überblick über die vier fundamentalen Wechselwirkungen gegeben werden. Es wird insbesondere diskutiert, welche Elementarteilchen jeweils an den Wechselwirkungen teilnehmen, in welchen Charakteristika sich die Wechselwirkungen unterscheiden und wie sogenannte Basisprozesse in jeder Wechselwirkung veranschaulicht und experimentell untersucht werden können. Eine Übersicht zu den auftauchenden Kenngrößen bzw. Eckdaten der fundamentalen Wechselwirkungen findet sich in Tabelle 2.2.

Ladungen und Austauschteilchen

Das Phänomen der Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen lässt sich in einem sehr anschaulichen Bild beschreiben: Zwei Teilchen reagieren auf die Anwesenheit des jeweils anderen. Die Reaktion führt dabei entweder dazu, dass sich die beiden Teilchen abstoßen oder anziehen oder aber sich in andere Teilchen umwandeln. Die Art der Reaktion wird bestimmt durch den wechselseitigen Vergleich bestimmter Eigenschaften zwischen den Teilchen: Ihrer **Ladungen**. Man könnte sich vorstellen, dass die Wahl der Reaktion der Teilchen aufeinander auf Basis eines Austausches von Informationen über ihre jeweiligen Ladungswerte geschieht. Da Elementarteilchen unterschiedliche Ladungen gleichzeitig tragen können - z.B. elektrische Ladung und

	elektromagn. WW	starke WW	schwache WW	Gravitation
Teilnehmer	Teilchen mit elektr. Ladung	Teilchen mit Farbladung	Teilchen mit schwacher Ladung	Teilchen mit Energie
Austauschteilchen	Photon γ	Gluon g	$W^\pm, Z^0$	Graviton (postuliert)
Kopplungsparameter	1/137	1/10 – 1/2	1/30	$< 10^{-38}$
Reichweite	unendlich	$\approx 10^{-15} m$ (Proton- durchmesser)	$10^{-18} m$	unendlich

Tabelle 2.2: Übersicht über die fundamentalen Wechselwirkungen (WW). Kopplungsparameter sind in Natürlichen Einheiten angegeben. Der Wert des Parameters für die Gravitation gilt für typische Teilchenmassen. Die Werte für die starke WW gelten für Teilchenabstände zwischen 0,001 fm und 0,2 fm.

Farbladung - gibt es auch verschiedene Eigenschaften, in denen die Teilchen sich vergleichen und dementsprechend aufeinander reagieren können. Anders ausgedrückt nehmen die Teilchen - abhängig von ihren Ladungswerten - an verschiedenen Wechselwirkungen teil. Wie nachfolgend diskutiert wird, gibt es für jede der fundamentalen Wechselwirkungen eine spezielle Ladungsart, für die Teilchen einen Wert ungleich Null besitzen müssen, um an der Wechselwirkung überhaupt teilnehmen zu können. Man spricht auch davon, dass die Ladungen die Wechselwirkungen erst „generieren“.

In dem beschriebenen Bild findet der Vergleich der Informationen über die Ladungswerte zwischen zwei Teilchen durch den Austausch eines weiteren Teilchens - eines sogenannten **Boten- oder Austauschteilchens** - statt. Es gibt für jede Wechselwirkung spezielle Arten von Austauschteilchen, die jedoch alle Bosonen mit Spin $s = 1$ bzw. $s = 2$ sind. Ein bestimmtes Austauschteilchen kann nur ausgetauscht werden zwischen zwei Teilchen, wenn die Teilchen die entsprechende Ladungsart für die dazugehörige Wechselwirkung besitzen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer „Kopplung“ der Austauschteilchen an die Ladungen der wechselwirkenden Teilchen. Beispielsweise können zwei Quarks, die beide eine starke Ladung (Farbladung) tragen, ein Gluon als Austauschteilchen der starken Wechselwirkung austauschen (siehe unten). Das Gluon koppelt an die Farbladungen der Quarks.

Die fundamentalen Wechselwirkungen lassen sich in manchen Aspekten mit klassischen Kräften vergleichen. Es ist beispielsweise bekannt, dass zwischen Körpern

mit elektrischen Ladungen mit gleichem Vorzeichen eine abstoßende Kraft und mit unterschiedlichem Vorzeichen eine anziehende Kraft existiert. Ähnlich verhalten sich elektrisch geladene Elementarteilchen. Die Situation in der Teilchenphysik ist jedoch noch komplizierter. Einerseits gibt es für bestimmte Ladungsarten nicht nur zwei, sondern mehrere „Vorzeichen“. So besitzt z.B. die Farbladung die drei „gegensätzlichen“ Grundwerte grün, blau und rot und dazugehörige Anti-Ladungen anti-grün, anti-blau und anti-rot. Wie sollte man auf dieser Basis entscheiden, wie drei jeweils verschiedenfarbig geladene Quarks aufeinander reagieren? Andererseits gibt es bestimmte Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen, die zu einer Umwandlung in andere Teilchenarten führen. Wie lässt sich eine Umwandlung auf eine klassische Kraftwirkung zurückführen?

Die Theorie, mit der die Teilchenphysik diese Phänomene erklärt, wird nachfolgend in Grundzügen erläutert. Unabhängig von der theoretischen Modellierung lässt sich jedoch festhalten, dass alle Wechselwirkungen schlussendlich nur die drei Reaktionen der Abstoßung, Anziehung oder Umwandlung herbeiführen.

Kopplungsparameter und Reichweiten

Einhergehend mit verschiedenen generierenden Ladungen und verschiedenen Austauschteilchen gibt es weitere Charakteristika, in denen sich die Wechselwirkungen unterscheiden.

Zum einen handelt es sich hier um den sogenannten **Kopplungsparameter α** . Der Kopplungsparameter kann als Maß dafür betrachtet werden, wie stark sich die Wechselwirkungen auf die Elementarteilchen auswirken. Als anschauliches Beispiel lässt sich für den Fall einer aus der Wechselwirkung resultierenden Kraftwirkung die Stärke der abstoßenden oder anziehenden Kraft auf den Kopplungsparameter zurückführen. Weniger anschaulich ist, dass im Fall einer Teilchenumwandlung die Wahrscheinlichkeit für eine Emission bzw. Absorption eines Austauschteilchens vom Kopplungsparameter der Wechselwirkung abhängt. Die Kopplungsparameter der fundamentalen Wechselwirkungen sind keine universellen Konstanten, sondern auf verschiedene Weise vom Abstand der Teilchen bzw. von den Energien der betrachteten Teilchen abhängig (siehe unten). Dementsprechend wird auch die mit einer Wechselwirkung verbundene Kraft vom Abstand der Teilchen beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen Kraft F und Abstand r ist für sehr kleine Abstände für alle

Wechselwirkungen gegeben durch

$$F \propto \alpha \cdot \frac{1}{r^2} \quad , \quad (2.1)$$

wobei α genau der Proportionalitätsfaktor zwischen der mit zunehmenden Abstand abnehmenden Kraft ist.

Ein weiteres unterscheidendes Charakteristikum der Wechselwirkungen sind ihre **Reichweiten**. Reichweiten sind vereinfacht ausgedrückt die maximalen Abstände, auf denen Teilchen potenziell noch miteinander wechselwirken bzw. ein Austauschteilchen austauschen können. Die Reichweiten werden prinzipiell von den Massen der jeweiligen Austauschteilchen bestimmt¹³, was sich auf folgende Weise erklären lässt: Entstehen massive Teilchen, die bei der Wechselwirkung ausgetauscht werden, so muss zunächst einmal nach Einsteins Äquivalenz von Energie und Masse zusätzliche Energie für die Masse des Austauschteilchens vorhanden sein. Klassischerweise ist dies nicht erklärbar, da Energie in einem abgeschlossenen System nicht einfach erzeugt werden oder verschwinden kann, sondern eine erhaltene, konstante Größe ist. Das Phänomen der Austauschteilchen kann durch ein wichtiges Grundprinzip der Quantenmechanik erklärt werden. Es lässt sich aus der sogenannten Heisenbergschen Unschärferelation ableiten, dass eine Verletzung der Energieerhaltung für Quantensysteme möglich ist, solange die Dauer der Verletzung nur klein genug ist. Anders ausgedrückt: Die Existenz eines massiven Teilchens ist für eine kurze Zeit möglich, wobei diese Dauer umso kürzer ist, je energiereicher und damit schwerer das Austauschteilchen ist. Reicht die Dauer der Existenz des Austauschteilchens für eine Übermittlung zwischen zwei Teilchen mit einem gewissen Abstand aus, so kann die Wechselwirkung stattfinden.

Die fundamentalen Wechselwirkungen besitzen verschieden schwere Austauschteilchen und damit auch verschiedene Reichweiten. Kommen masselose Austauschteilchen zum Einsatz, wie insbesondere bei der elektromagnetischen Wechselwirkung, so ist die Dauer der Vermittlerexistenz unendlich groß und damit auch die Wechselwirkung von unendlicher Reichweite.

¹³ Streng genommen wird bei der starken Wechselwirkung zwischen Quarks die Reichweite zusätzlich bzw. maßgeblich noch durch ein weiteres Phänomen bestimmt, welches als *confinement* bezeichnet wird und in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben wird.



Abbildung 2.6: Schematische Darstellungen a) der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen zwei Elektronen (e^-) durch Austausch eines Photons (γ) sowie b) der starken Wechselwirkung zwischen zwei Up-Quarks (u) durch Austausch eines Gluons (g) (in Klammern sind starke Farbladungswerte angegeben).

2.2.3.2 Die vier Wechselwirkungen und ihre Charakteristika

Die elektromagnetische Wechselwirkung

Betrachtet man die beschriebenen Charakteristika für Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen noch einmal für die bekannten fundamentalen Wechselwirkungen getrennt, so stellt man zunächst fest, dass die elektromagnetische Wechselwirkung an die elektrische Ladung von Teilchen koppelt. Es nehmen also nur Teilchen mit einer von Null verschiedenen elektrischen Ladung an der Wechselwirkung teil, was unter den im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Elementarteilchen auf die Quarks und die elektrisch geladenen Leptonen zutrifft. Für die elektromagnetische Wechselwirkung werden die bereits ebenfalls vorgestellten Photonen γ ausgetauscht. Photonen tragen selbst keine elektrische Ladung. In Abbildung 2.6a ist als Beispiel die elektromagnetische Wechselwirkung von zwei Elektronen mit negativer elektrischer Ladung $q = -1$ durch den Austausch eines Photons mit $q = 0$ schematisch dargestellt.

Photonen sind masselos, was mit einer unendlichen Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung korrespondiert. Die Kraftwirkung von zwei elektrisch geladenen Teilchen aufeinander nimmt jedoch nach Gleichung (2.1) mit wachsendem Abstand ab. Der Kopplungsparameter der elektromagnetischen Wechselwirkung hat einen näherungsweise konstanten Wert in natürlichen Einheiten von $\alpha_{em} \approx 1/137$ ¹⁴. α wird auch als Feinstrukturkonstante bezeichnet.

¹⁴ Der angegebene Wert gilt für „große“ Teilchenabstände von ca. 10 fm. Für „kleine“ Teilchenabstände von ca. 0,001 fm gilt $\alpha_{em} \approx 1/128$.

Die starke Wechselwirkung

Die starke Wechselwirkung wird von den Farbladungen der wechselwirkenden Teilchen generiert. Unter den fermionischen Elementarteilchen tragen lediglich die Quarks Farbladungen und können damit als einzige stark wechselwirken. Die Wechselwirkung findet über den Austausch von Gluonen g statt. Diese besitzen im Gegensatz zu den Photonen jedoch selbst die für die Wechselwirkung charakteristischen Farbladungen und können daher auch untereinander wechselwirken. Wie bereits diskutiert, tragen Gluonen eine Kombination aus einer Farbe und einer Antifarbe. Tauschen nun zwei Quarks mit bestimmten Farbladungen ein Gluon aus, so besitzt das Gluon eine derartige Farbkombination, dass durch den Austausch ein sogenannter Farbstrom entsteht, der eine Vertauschung der ursprünglichen Quarkfarben nach der Wechselwirkung im Vergleich zu davor bewirkt. Als Beispiel ist in Abbildung 2.6b die starke Wechselwirkung zweier Up-Quarks u durch Austausch eines Gluons g dargestellt. Im gewählten Beispiel sind die Farbladungen rot (r) und blau (b) der Quarks nach der Wechselwirkung vertauscht im Vergleich zu davor. Das zu dem Farbstrom während der Wechselwirkung korrespondierende Gluon trägt die Farbladungen antirot ($\bar{r}$) und blau (b).

Der Kopplungsparameter α_s der starken Wechselwirkung ist betragsmäßig größer als der elektromagnetische Kopplungsparameter (siehe Tabelle 2.2), nimmt jedoch ebenfalls mit wachsendem Teilchenabstand ab. Im Gegensatz zum elektromagnetischen Fall nimmt der Wert der starken Kraft zwischen zwei Teilchen mit wachsendem Abstand jedoch nicht ab. Vielmehr folgt die mit der starken Kraft verbundene potenzielle Energie der Formel

$$E_{\text{pot}} \propto \frac{\alpha_s}{r^2} + k \cdot r \quad , \quad (2.2)$$

wobei der mit Abstand r linear wachsende Term zu einem Phänomen führt, das als *Confinement* bezeichnet wird und ursächlich dafür verantwortlich ist, dass Quarks nie als Einzelteilchen, sondern immer nur gebunden in Hadronen existieren. Würde man beispielsweise die beiden Quarks in einem Meson auseinanderziehen, so nimmt zwar der erste Term in Gleichung 2.2 ab, der zweite Term steigt jedoch verhältnismäßig mehr an und dadurch nimmt insgesamt die potenzielle Energie des Zwei-Quark-Systems zu. Ab einem gewissen Abstand ist es nicht mehr die energetisch günstigste Option die Quarks weiter voneinander zu trennen. Stattdessen entsteht ein neues Quark-Antiquark-Paar, das jeweils mit einem der ursprünglichen Quarks ein Meson bildet. Die beiden neu entstandenen Mesonen lassen sich nun

ohne Energieaufwand trennen. Die Quarks befinden sich nach diesem Experiment jedoch wieder in gebundenen Zuständen und existieren daher niemals isoliert.

Die Gluonen als Austauschteilchen der starken Wechselwirkung sind wie die Photonen masselos. Die starke Wechselwirkung besitzt dennoch effektiv nur sehr kleine beobachtbare Reichweiten von der Größenordnung eines Protonendurchmessers. Der Grund hierfür lässt sich durch folgende Überlegungen erklären. Es können zunächst einmal potenziell nur Quarks stark wechselwirken. Quarks sind jedoch aufgrund des *Confinements* in Hadronen gebunden und besitzen darin nicht unendlich große Abstände zueinander. Die Quarks innerhalb der Hadronen besitzen eine derartige Verteilung von Farbladungen, dass das Hadron als Ganzes nach außen hin immer farbneutral erscheint und demnach zunächst einmal nicht stark mit anderen Hadronen wechselwirken kann. Erst wenn man Hadronen sehr nah zueinander bringt, wechselwirken sie durch die in Kapitel 2.2.1 beschriebene kovalent-artige Bindung miteinander und haften durch geteilte Quarks aneinander. Aber auch in diesem Fall findet die Wechselwirkung nur auf kleinen Abstandsskalen statt. Es findet sich somit keine Situation, in der zwei Teilchen über große Reichweiten hinweg stark wechselwirken.

Die schwache Wechselwirkung

Die schwache Wechselwirkung koppelt an eine weitere Ladungsart, die hier als schwache Ladung bezeichnet werden soll. Die möglichen Werte der schwachen Ladung für Teilchen stellen sich komplexer als bei elektromagnetischer und starker Wechselwirkung dar. Zur Vereinfachung lässt sich jedoch annehmen, dass alle fermionischen Elementarteilchen eine schwache Ladung ungleich Null tragen und damit der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Eine Sonderrolle nehmen die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Neutrinos aus allen drei Generationen ein. Sie tragen über die schwache Ladung hinaus keine weiteren Ladungen und können damit nur schwach wechselwirken. Deshalb verwenden Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker den Nachweis von Neutrinos als Zeichen dafür, dass in Teilchenexperimenten eine schwache Wechselwirkung stattgefunden hat.

Die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung sind die elektrisch geladenen W-Bosonen $W^\pm$ sowie das elektrisch neutrale Z-Boson Z^0 . Die W-Bosonen tragen selbst die schwache Ladung mit gegensätzlichen Werten, während das Z-Boson nicht schwach geladen ist. Die W-Bosonen werden in der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Leptonen innerhalb einer der in Abbildung 2.5 dargestellten Generationen und von Quarks auch zwischen verschiedenen Generationen ausgetauscht.

Das Z-Boson ist für Wechselwirkungen zwischen Leptonen oder Quarks aus derselben Generation und mit demselben Flavour verantwortlich. In der Regel findet bei der schwachen Wechselwirkung über W-Bosonen eine Teilchenumwandlung statt. Ein Lepton oder Quark sendet hierbei ein W-Boson aus und wird bei der Aussendung selbst in ein anderes Teilchen umgewandelt. Das ausgesendete W-Boson zerfällt seinerseits nach kurzer Zeit in ein Paar von Leptonen oder Quarks.

Alle drei Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung sind massive Bosonen mit Massen von ca. 80 – 90 GeV (siehe vorangegangenes Kapitel). Damit einhergehend besitzt die schwache Wechselwirkung nur eine sehr kurze Reichweite von ca. 10^{-18} Metern. W- und Z-Bosonen lassen sich daher nie direkt, sondern immer nur über ihre Zerfallsprodukte nachweisen. Die Größe des schwachen Kopplungsparameters befindet sich für die vorkommenden sehr kleinen Teilchenabstände betragsmäßig zwischen den Parametern für die elektromagnetische und die starke Wechselwirkung (siehe auch Tabelle 2.2).

Die Gravitation

Die Gravitation als letzte fundamentale Wechselwirkung ist auf Teilchenebene bislang am wenigsten erforscht bzw. beschreibbar. Aus der klassischen Physik ist bekannt, dass alle energiereichen Körper der Gravitation unterliegen und die damit verbundene Gravitationskraft immer eine anziehende Wirkung hat. In der Allgemeinen Relativitätstheorie lässt sich die Wechselwirkung zwischen massiven Teilchen nicht durch das Ladungskonzept, sondern mithilfe einer durch die Massen gekrümmten Raumzeit erklären. Darauf soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen werden.

In dem Bestreben nach einer einheitlichen Beschreibung aller Wechselwirkungen wird in der Teilchenphysik nach Modellen gesucht, welche die Gravitation ebenfalls durch die Vermittlung von Austauschteilchen erklären können. Es konnte bislang jedoch weder eine vollständige theoretische Beschreibung dieser Art von Wechselwirkung mit spezifischer Ladungsart gefunden werden, noch wurde das entsprechende Austauschteilchen - als Graviton bezeichnet - bislang entdeckt. Durch die Abschätzung eines Kopplungsparameters aus der klassischen newtonschen Abhängigkeit zwischen Gravitationskraft und Abstand zwischen zwei Körpern lässt sich des Weiteren ableiten, dass die Gravitation auf typischen Abstandsskalen zwischen Elementarteilchen im Vergleich zur Stärke der anderen fundamentalen Wechselwirkungen zu vernachlässigen ist. Ebenfalls aus dem Kraftgesetz lässt sich - zumindest im dreidimensionalen Raum - folgern, dass die Gravitation wie die elektromagneti-

sche Kraft eine unendliche Reichweite besitzt und damit ein hypothetisches Graviton in jedem Fall masselos sein muss. Die Integration der Gravitation in das an späterer Stelle beschriebene Standardmodell zur einheitlichen Beschreibung aller Wechselwirkungen stellt eine der großen offenen Fragen der modernen Teilchenphysik dar.

2.2.3.3 Feynman-Darstellung

Eine besonders anschauliche und einfache Art, fundamentale Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen darzustellen und eine Übersicht für Berechnungen zu erhalten, geht auf den Physiker Richard Feynman (1949) zurück und besteht in der Anfertigung sogenannter **Feynman-Diagramme**.

Die Entwicklung und Anwendung der nachfolgend erläuterten Methode wird durch zwei verkomplizierende Umstände bei der detaillierten Berechnung von Wechselwirkungen in der Teilchenphysik motiviert. Einerseits basiert die vollständige theoretische Modellierung eines Wechselwirkungsprozesses auf Methoden aus dem Bereich der Quantenfeldtheorie, die sehr aufwändige mathematische Berechnungen beinhalten (siehe auch Quantenfeldtheorie in Kapitel 2.2.5). Andererseits ist es insbesondere in Kollisionsexperimenten mit beschleunigten Teilchenstrahlen in der Regel nicht direkt beobachtbar bzw. nicht eindeutig, welcher Wechselwirkungsprozess auf Elementarteilchenebene stattgefunden hat. Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker können lediglich auf Basis der vorhandenen Teilchen vor und der nachgewiesenen Teilchen kurz nach der Wechselwirkung Wahrscheinlichkeitsaussagen darüber treffen, welche der möglichen Wechselwirkungen stattgefunden hat. Zur Ermittlung der theoretischen Wahrscheinlichkeiten müssen wiederum quantenfeldtheoretische Berechnungen für alle möglichen Wechselwirkungsprozesse angestellt werden, die der Teilcheninteraktion zugrunde liegen könnten. Bei einer großen Anzahl an möglichen Wechselwirkungen ist daher Feynmans graphische Methode sehr nützlich, um vor aufwändigen Berechnungen zunächst einen Überblick über die möglichen Prozesse zu erhalten.

Feynman-Diagramme können als vereinfachte Orts-Zeit-Diagramme verstanden werden, die einen Wechselwirkungsprozess abbilden. Die horizontale Achse in den Diagrammen gibt Auskunft über die Zeit, während die vertikale Achse den Ort der an einer Wechselwirkung beteiligten Teilchen repräsentiert. Die Diagramme werden nach folgenden - verkürzt dargestellten - Regeln erzeugt, welche die teilnehmenden Teilchen in graphische Zeicheneinheiten übersetzen:

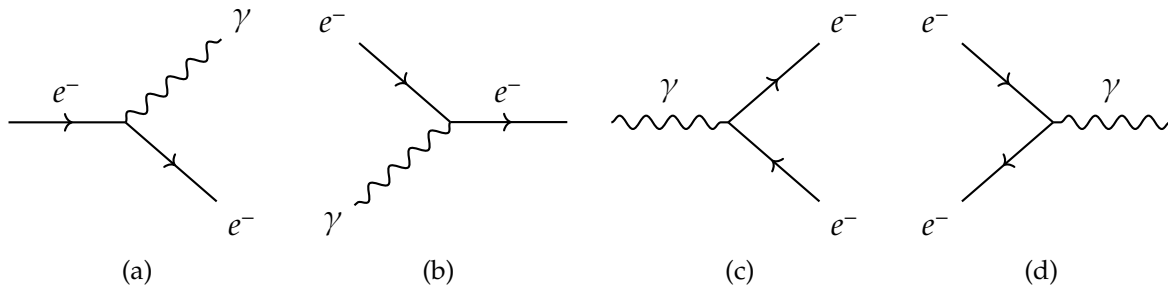


Abbildung 2.7: Verschiedene Vertizes in der Feynmandarstellung für ein Photon (γ) und Elektronen (e^-) bzw. Positronen (e^- mit Pfeil in negative Zeitrichtung nach links)

1. Zunächst werden alle fermionischen Elementarteilchen mithilfe durchgezogener Linien dargestellt, während die bosonischen Austauschteilchen durch unterschiedlich geschwungene oder wellige Linien repräsentiert werden. Neben die Linie wird in der Regel die Symbolbezeichnung für das jeweilige Teilchen geschrieben.
2. Während an die Linien der Teilchen ein Pfeil in Richtung der positiven Zeitachse gezeichnet wird, werden Antiteilchen durch einen Pfeil in negative Zeitrichtung sowie durch das Symbol für das korrespondierende Teilchen gekennzeichnet.
3. Jedes Feynman-Diagramm setzt sich aus bestimmten Grundbausteinen zusammen, die jeweils drei sich treffende Linien bzw. Teilchen beinhalten. Diese Bausteine werden als Vertizes bezeichnet. Ein Vertex besteht dabei in der Regel aus einem Treffpunkt von Linien eines Austauschteilchen und zweier weiterer Elementarteilchen. In Abbildung 2.7 sind vier verschiedene Vertizes dargestellt, deren Linien jeweils ein Photon und zwei Elektronen bzw. ein Elektron und ein Positron darstellen. Die Vereinbarung über eine positive Richtung der Zeitachse nach rechts beachtend, repräsentieren die abgebildeten Vertizes folgende Wechselwirkungsprozesse:
 - a) Emission eines Photons von einem Elektron
 - b) Absorption eines Photons von einem Elektron
 - c) Paarerzeugung eines Elektron-Positrons-Paars aus einem Photon
 - d) Paarvernichtung (Annihilation) eines Elektron-Positron-Paars

In Feynman-Diagrammen nicht detailliert darstellbar sind die Änderungen von Energie bzw. Impuls und damit auch die Änderung der Ausbreitungsrichtung, welche

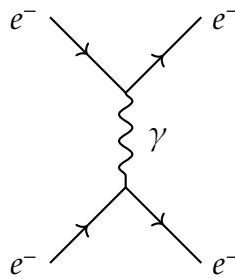


Abbildung 2.8: Feynman-Diagramm für eine sogenannte Bhabha-Streuung zweier Elektronen

das Elektron bei Aussendung oder Einfang eines Photons im Allgemeinen erfährt. Die Änderung lässt sich anschaulich dadurch erklären, dass das Photon selbst ja auch Energie „wegträgt“ bzw. „mitbringt“. Es lassen sich Vertizes analog zu den in Abbildung 2.7 dargestellten für alle Teilchenkombinationen aufstellen, bei welchen das Austauschteilchen an eine Ladung der anderen beiden Teilchen koppeln kann. Für die Vertizes gilt noch folgende letzte Feynmanregel:

4. Bei Kenntnis eines Vertex für eine bestimmte Teilchenkombination sind durch Drehung der einlaufenden Linien um den Vertexpunkt auch alle weiteren möglichen Vertizes bekannt.

Für einen realen physikalischen Wechselwirkungsprozess¹⁵ werden nun in der einfachsten Version der Feynman-Diagramme je zwei Vertizes so aneinandergesetzt, dass eine Linie bzw. ein Teilchen übereinstimmt. In Abbildung 2.8 findet sich ein Feynman-Diagramm, das aus dem Zusammenschluss der obigen Vertizes für Photonemission und -absorption mit übereinstimmender Photonlinie entsteht. Das Diagramm lässt sich interpretieren als die Streuung eines Elektrons an einem anderen Elektron unter Austausch eines Photons. Es handelt sich um einen elektromagnetischen Wechselwirkungsprozess.

Im Allgemeinen finden sich bei Zusammenschluss von Vertizes einerseits äußere Linien, die nur an einem Vertex teilnehmen. Diese Linien repräsentieren die nachweisbaren Teilchen vor bzw. nach einer Wechselwirkung. Andererseits gibt es in den Diagrammen innere Linien zwischen Vertizes, die sogenannte virtuelle Teilchen darstellen, welche nicht direkt nachweisbar sind. Für die inneren Linien existiert keine

¹⁵ Der Wechselwirkungsprozess ist physikalisch möglich, wenn unter anderem Gesamtimpuls sowie Gesamtenergie aller Teilchen vor und nach der Reaktion gleich groß sind. Man kann zeigen, dass für einen einzelnen Vertex mit einem beteiligten masselosen Austauschteilchen wie Photon oder Gluon nicht gleichzeitig Impuls und Energie erhalten bleiben. Hierfür benötigt es einen weiteren Vertex.

ausgezeichnete Zeitrichtung. Eine wichtige Aufgabe der Teilchenphysikforschenden besteht darin, zu den in einen Wechselwirkungspunkt einlaufenden und auslaufenden Teilchen alle möglichen sogenannten **Basisprozesse** zu finden, die stattgefunden haben könnten, jedoch nicht beobachtbar sind. Die möglichen Prozesse lassen sich mithilfe der Feynman-Diagramme aufstellen und veranschaulichen. Viele mögliche Prozesse werden dabei durch kompliziertere Feynman-Diagramme dargestellt, die zwischen den ein- und auslaufenden Teilchen mehr als zwei Vertizes enthalten und als sogenannte Prozesse höherer Ordnung bezeichnet werden.

2.2.3.4 Experimente zur Untersuchung von Wechselwirkungen

Wie bereits in Kapitel 2.1 erläutert, stellen die experimentellen Forschungsmethoden der Teilchenphysik keinen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar. Dennoch schließt sich hier aus den folgenden zwei Gründen ein kurzer Exkurs dazu an, welche Arten von Experimenten in der Teilchenphysik durchgeführt werden, um verschiedene interessierende Wechselwirkungen zwischen bzw. mit Beteiligung von Elementarteilchen zu untersuchen. Einerseits bietet die folgende Darstellung der verschiedenen Untersuchungsziele einen anschaulichen Anwendungsrahmen für die zuvor eingeführten Feynman-Diagramme. Andererseits - und wie auch aus den Ergebnissen der Expertisebefragungen in Kapitel 5 abzulesen sein wird - lassen sich die theoretischen Erkenntnisse in einem Forschungsgebiet nie vollständig unabhängig von den dazugehörigen experimentellen Methoden beschreiben. Insbesondere in der heutigen Teilchenphysik werden die meist sehr teuren experimentellen Aufbauten auf Grundlage bisheriger theoretischer Erkenntnisse geplant und liefern ihrerseits weitere wichtige Erkenntnisse an die Theorie zurück. Es lohnt daher, kurz über die Verknüpfung von Theorie und Experiment bei der Untersuchung von Teilchenwechselwirkungen zu berichten.

Experimente zwischen bzw. mit Beteiligung von Elementarteilchen lassen sich auf Basis der zu untersuchenden Wechselwirkungen sehr grob in folgende drei Arten unterscheiden:

- Streuexperimente
- Untersuchung von Zerfällen
- Spektroskopie von Bindungszuständen

Streuexperimente

Die gängige Methode der Kern- und Teilchenphysikforschenden, um Informationen über sehr kleine Strukturen zu erhalten und Wechselwirkungen zwischen Teilchen zu untersuchen, besteht in der Durchführung sogenannter **Streuexperimente**. Hierbei wird ein einzelnes oder ein Strahl von beschleunigten Teilchen auf ein festes Teilchenziel oder auf einen anderen beschleunigten Teilchenstrahl geschossen. Die zuvor beschleunigten Teilchen können dabei unter anderem abgelenkt, absorbiert werden oder sie wandeln sich in andere Teilchen um. Aus der Anzahl, der Art und der örtlichen Verteilung der gestreuten Teilchen nach dem Experiment lassen sich Rückschlüsse auf die vonstatten gegangenen Teilchenprozesse im Wechselwirkungspunkt oder über die Struktur der verschiedenen am Experiment teilnehmenden Teilchen ziehen. Werden zwei beschleunigte Teilchen(strahlen) zur Kollision gebracht, spricht man von Kollisionsexperimenten. Wird dagegen ein Material oder ein Teilchen in Ruhe mit einem Teilchen(strahl) beschossen, handelt es sich um ein sogenanntes *Fixed-Target-Experiment*.

Beiden Arten von Streuexperimenten ist gemein, dass durch die vorherige Beschleunigung zumindest eines der Kollisionspartner hohe Schwerpunktsenergien erzeugt werden. Die Schwerpunktsenergie eines Stoßexperiments kann aufgefasst werden als die Gesamtenergie aller am Experiment teilnehmenden Teilchen bezüglich des Schwerpunktskoordinatensystems, die sich zusammensetzt aus den jeweiligen Ruheenergien der Teilchen sowie deren kinetischen Energien (siehe Ruheenergie bzw. relativistische Masse in Kapitel 2.2.5). Die kinetische bzw. Bewegungsenergie der Teilchen wächst mit zunehmenden Geschwindigkeiten an. Werden Teilchen vor einer Kollision stark beschleunigt, so steigt demnach auch ihre Energie und die Schwerpunktsenergie des Gesamtexperiments wird erhöht.

Eine hohe Schwerpunktsenergie bzw. eine hohe Energie der Beschussteilchen - im Weiteren Projektil genannt - ermöglicht die Beobachtung interessanter Prozesse. Einerseits sind mithilfe von genügend hochenergetischen Projektilen Strukturuntersuchungen von sehr kleinen Objekten möglich. Ein sehr bekanntes und bereits in Kapitel 2.2.1 diskutiertes Beispiel für derartige Strukturuntersuchungen sind die *Fixed-Target-Experimente* von Ernest Rutherford aus den Jahren 1911 - 1919, in welchen er zunächst Goldatome und später Atomsorten mit leichteren Atomkernen mit α -Teilchen beschoss. Hatten die selbst positiv geladenen α -Teilchen eine genügend hohe Energie, so konnten sie sich den Atomkernen im beschossenen Material soweit annähern, dass sie an diesen gestreut wurden und ihre Flugrichtungen änder-

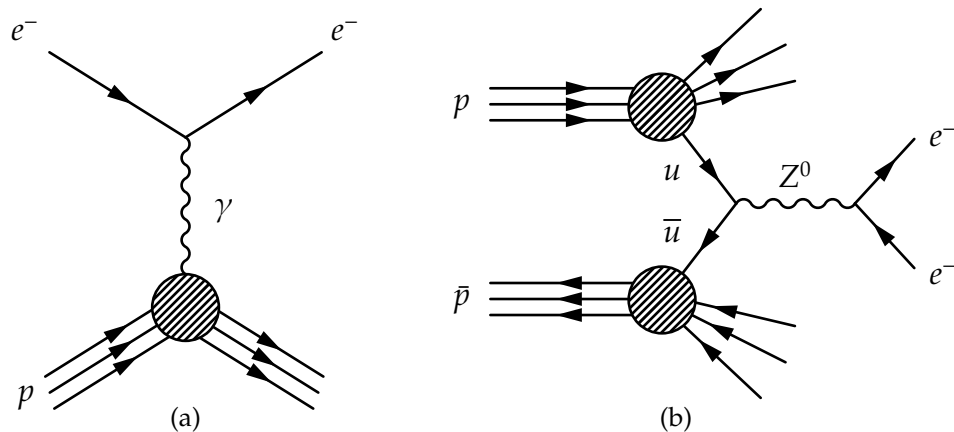


Abbildung 2.9: Feynman-Diagramme für a) Streuung von Elektron und Proton und b) Produktion und Zerfall eines Z -Bosons in einer Proton-Antiproton-Kollision. Die dargestellten Diagramme sind streng betrachtet keine Feynman-Diagramme. In diesen würden nicht alle drei Valenzquarks des Protons dargestellt werden, sondern nur das jeweils an der Wechselwirkung beteiligte Quark.

ten. Durch die Verteilungen der gestreuten Teilchen an verschiedenen Atomkernen konnte Rutherford unter anderem Rückschlüsse über die Substruktur der Atomkerne ziehen und das Proton entdecken. Ein weiteres bereits erwähntes Streuexperiment zur Auflösung von Teilchensubstrukturen führte 1969 zur Entdeckung der Quarks im Proton. Am Forschungszentrum *SLAC* in Kalifornien wurden Elektronen und sich in Ruhe befindende Protonen zur Kollision gebracht. In der sogenannten tiefinelastischen Streuung verhielten sich die Elektronen so, als ob sie an punktförmigen Konstituenten innerhalb des Protons gestreut wurden. Heute weiß man, dass diese Konstituenten innerhalb des Protons - also eines Hadrons - Quarks gewesen sind. Ein einfaches Feynman-Diagramm für eine Streuung eines Elektrons (e^-) an einem Quark innerhalb des Protons (p) unter Austausch eines Photons (γ) ist in Abbildung 2.9a dargestellt.

Neben der Auflösung von Substrukturen ist die Initiation und Beobachtung von seltenen Wechselwirkungsprozessen ein Hauptziel von Streuexperimenten mit hohen Schwerpunktsenergien. Besitzt ein Experiment nämlich eine hohe Schwerpunktsenergie, so steht - wie bereits mehrfach diskutiert - nach Einsteins Äquivalenz von Energie und Masse bei der Kollision genügend Energie zur Verfügung, so dass neue massive Teilchen erzeugt werden können. Bei diesen massiven Teilchen kann es sich beispielsweise um die Austauschteilchen für bestimmte Wechselwirkungen handeln. Anders ausgedrückt können bestimmte Wechselwirkungen, deren Ablauf in der Natur aufgrund der hochenergetischen Austauschteilchen mit sehr kurzen Le-

bensdauern sehr unwahrscheinlich sind, durch das Bereitstellen genügend hoher Energien initiiert werden. Ein Beispiel für eine solche seltene Wechselwirkung ist die schwache Wechselwirkung zwischen zwei Fermionen unter Austausch eines massiven Z-Bosons. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 angedeutet, gelang es 1983 Forschenden am CERN in Genf, ebendiesen Prozess und damit die Existenz des Z-Bosons in der Kollision von Protonen und Antiprotonen zu beobachten bzw. nachzuweisen. In Abbildung 2.9b ist ein beispielhaftes Feynman-Diagramm für einen solchen schwachen Wechselwirkungsprozess dargestellt, in welchem ein Up-Quark (u) aus einem Proton und ein Up-Antiquark ($\bar{u}$) aus einem Antiproton ein Z-Boson (Z^0) erzeugen, welches wiederum in ein Elektron und ein Positron zerfällt.

Untersuchung von Teilchenzerfällen

Eine weitere Art von Experimenten in der Teilchenphysik - dabei handelt es sich zu meist nur um einen Teilaspekt von Streuexperimenten - beschäftigt sich speziell mit der **Untersuchung von Teilchenzerfällen**. Bei Zerfällen wandelt sich in der Regel ein instabiles Ursprungsteilchen nach einer charakteristischen mittleren Lebensdauer in andere Teilchen - die sogenannten Zerfallsprodukte - um. Wie bereits im Zusammenhang mit den fundamentalen Wechselwirkungen diskutiert, hängt die mittlere Lebensdauer des Ursprungsteilchens von seiner Masse sowie von der Art der Wechselwirkung ab, durch die sich sein Zerfall beschreiben lässt. Betrachtet man die am häufigsten vorkommenden zu schwachen Wechselwirkungen korrespondierenden Zerfälle, so gilt: Je schwerer ein Teilchen ist, desto schneller zerfällt es im Mittel. In welche Zerfallsprodukte ein Teilchen zerfällt, wird ebenfalls durch die dem Zerfall zugrundeliegende Wechselwirkung bestimmt. Die Art der Zerfallsprodukte hängt nämlich davon ab, welche Ladungen das Ursprungsteilchen trägt bzw. an welche Ladungen es koppelt. Unter den durch die Wechselwirkungen möglichen Zerfällen sind dann weiterhin nur solche Zerfälle erlaubt, bei welchen bestimmte physikalische Größen wie z.B. Impuls oder Energie nach dem Zerfall im Vergleich zu davor erhalten bleiben (siehe auch Erhaltungsgrößen im nächsten Unterkapitel). Welchen der übrig bleibenden Zerfallsarten ein Teilchen nun schlussendlich folgt, ist nicht voraussagbar. Mithilfe aufwändiger Rechenmethoden aus der Quantenfeldtheorie lassen sich jedoch Aussagen darüber treffen, mit welchen Wahrscheinlichkeiten die verschiedenen Zerfallsarten eintreten (siehe auch Quantenfeldtheorie in Kapitel 2.2.5).

Kontexte, in welchen speziell Teilchenzerfälle untersucht und beschrieben werden, finden sich sowohl in der Natur als auch in Beschleunigerexperimenten. Ein sehr bekanntes Beispiel aus der Natur ist das in der kosmischen Höhenstrahlung entdeck-

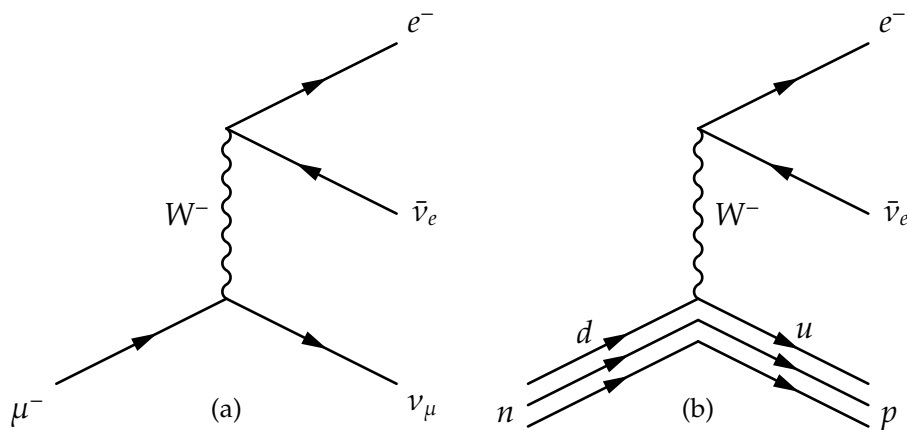


Abbildung 2.10: Feynman-Diagramme für a) Myon-Zerfall und b) radioaktiver β^- -Zerfall

te Myon (μ^-), welches nach einer mittleren Lebensdauer von ca. $2 \cdot 10^{-6}$ Sekunden vorrangig in ein Myon-Neutrino (ν_μ) und das W^- -Boson (W^-) zerfällt, das wiederum einen Zerfall in ein Elektron (e^-) und ein Elektron-Antineutrino ($\bar{\nu}_e$) vollzieht. Eine Feynman-Darstellung des beschriebenen Myonzerfalls findet sich in Abbildung 2.10a. Ein weiteres bekanntes Beispiel für einen Teilchenzerfall liegt dem radioaktiven Betazerfall im Zusammenhang mit der Struktur der Materie zugrunde. Im sogenannten β^- -Zerfall wandelt sich hierbei das Down-Quark (d) eines Neutrons im Atomkern in ein Up-Quark (u) um und erzeugt damit eine Umwandlung des Neutrons in ein Proton. Zusätzlich zum Up-Quark wird bei der Reaktion ein W^- -Boson erzeugt, welches seinerseits wieder in ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino zerfällt. Das Feynman-Diagramm für den β^- -Zerfall ist in Abbildung 2.10b dargestellt. Über die natürlichen Zerfallsprozesse hinaus findet in der Regel in Kollisionsexperimenten mit beschleunigten Teilchenstrahlen eine hohe Anzahl an Zerfällen von neu erzeugten, jedoch schweren Teilchen statt. Als Beispiel wurde bereits der Zerfall des Z -Bosons unter anderem in ein Elektronen-Positronen-Paar beschrieben (siehe Abbildung 2.9b). Das Z -Boson zerfällt nach einer sehr kurzen mittleren Lebensdauer von $3 \cdot 10^{-25}$ Sekunden. Der erste Nachweis dieses Bosons 1983 am CERN war daher nur über die Rekonstruktion seiner Zerfallsprodukte möglich.

Spektroskopie von Bindungszuständen

Eine letzte Art von Experimenten, an welchen Elementarteilchen bzw. aus diesen zusammengesetzten Teilchen beteiligt sind, stellen die Experimente zur sogenannten **Spektroskopie von Bindungszuständen** dar.

Spektroskopie ist eine vor allem aus der Kern- bzw. Atomphysik bekannte experimentelle Methode, um insbesondere die Struktur der möglichen energetischen

Zustände in einem Vielteilchensystem zu erforschen: Einem solchen System - beispielsweise einem Atom - wird unter anderem durch Bestrahlung mit einem Laser Energie zugeführt. Durch die Bestrahlung können die Elektronen in der Atomhülle in einen in diesem System möglichen höherenergetischen Zustand wechseln (siehe auch Zustände bzw. Wellenfunktionen von Elektronen im Atom in Kapitel 2.2.2). Nach einiger Zeit gelangen die Elektronen dann wieder zurück in ihren Ausgangszustände. Bei diesem Übergang wird die überschüssige Energie als elektromagnetische Strahlung emittiert, deren Frequenz vom Energieunterschied der Elektronenzustände abhängt. Es lassen sich somit aus der emittierten Strahlung Rückschlüsse über die charakteristischen Energieniveaus der Elektronen eines Atoms ziehen.

Ein ähnliches Verfahren wird in der Teilchenphysik angewandt, um Informationen über die Energiezustände von gebundenen Teilchensystemen zu erhalten. Gebundene Teilchenzustände sind unter anderem die bereits vorgestellten Baryonen und Mesonen, die aus drei bzw. zwei sogenannten Valenzquarks zusammengesetzt sind. Für eine bestimmte Kombination von Quarks - beispielsweise für ein Meson mit Quarkinhalt $c\bar{c}$ - kann sich das gebundene System in Zuständen mit verschiedenen korrespondierenden Energien und damit auch mit verschiedenen Massen befinden. Man kann demnach für die verschiedenen Zustände auch von verschiedenen Teilchen sprechen. Das in Kapitel 2.2.2 vorgestellte J/Ψ -Meson ist dabei nur der leichteste gebundene Zustand unter mehreren bekannten Zuständen aus Charmequark und Charme-Antiquark. Genau wie bei den Energieniveaus im Atom sind jedoch die höherenergetischen Zuständen nicht auf Dauer stabil, sondern gehen in energetisch niedrigere Zustände über, bevor sie weiter zerfallen über die bekannten Zerfallskanäle von Hadronen. Wechselt ein gebundenes System von Quarks von einem energetisch höheren in einen energetisch niedrigeren Zustand, so wird in der Regel hochenergetische Gammastrahlung abgegeben.

Genau wie in der Spektroskopie der Atomphysik lassen sich in der Teilchenphysik demnach durch Analyse der abgegebenen Strahlung Informationen zu den Übergängen zwischen verschiedenen Zuständen von gebundenen Elementarteilchensystemen erlangen. Durch dieses Wissen konnte eine Vielzahl vermeintlich „neu“ entdeckter Hadronen auf höherenergetische Zustände bereits entdeckter Hadronen zurückgeführt werden.

2.2.4 Symmetrien und Erhaltungsgrößen

Der folgende Abschnitt gibt eine kurze Einführung zu physikalischen Symmetrien, welche den fundamentalen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen zugrunde liegen und mithilfe derer sie sich beschreiben lassen. Es soll damit der Bogen gespannt werden zwischen der bisherigen phänomenologischen Betrachtung von Wechselwirkungen und der im nächsten Unterkapitel vorgestellten Beschreibung der fundamentalen Wechselwirkungen im sogenannten Standardmodell.

Symmetrien sind ein aus dem Alltag bekanntes Phänomen, welches sich zunächst mithilfe einfacher geometrischer Betrachtungen beschreiben lässt. Ein Objekt ist hierbei symmetrisch, wenn es unter gewissen Veränderungen seine Form bzw. sein Aussehen behält. Die Veränderung kann dabei eine räumliche Spiegelung sein (Achsensymmetrie) oder auch eine Drehung um einen bestimmten Punkt (Rotationssymmetrie).

Physikalische Symmetrien

Das Konzept der Alltagssymmetrien lässt sich erweitern zu einer sogenannten **physikalischen Symmetrie**. Sie wird definiert als die Invarianz - das heißt die gleichbleibende Form - von physikalischen Gesetzen und Phänomenen unter bestimmten Veränderungen, die als Transformationen bezeichnet werden. Die Transformationen können dabei von diskreter oder von kontinuierlicher Natur sein. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von kontinuierlicher oder diskreter Symmetrie.

Bei einer kontinuierlichen Symmetrie behält ein Naturgesetz seine Form bei einer kontinuierlichen Veränderung einer bestimmten Größe. Beispielsweise sollten Newtons Bewegungsgleichungen für einen Körper für jeden beliebigen Ort gelten. In gleicher Weise sollten sie auch für jede beliebige Zeit oder für jede beliebige räumliche Ausrichtung des Körpers gelten.

Diskrete Symmetrien andererseits führen zu einer Invarianz von Naturgesetzen unter diskreten Veränderungen bestimmter Größen. Beispielsweise interessiert man sich in der Teilchenphysik dafür, ob eine fundamentale Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen invariant bleibt, wenn eine sogenannte Paritätsumkehr als Transformation stattfindet. Eine Paritätsumkehr ist vorstellbar als eine räumliche Punktspiegelung der gesamten Wechselwirkung am Ursprung des Bezugssystems. Eine weitere diskrete Transformation stellt die Zeitumkehr dar. Hier wird betrachtet, ob die Wechselwirkung noch gleich aussieht, wenn sie rückwärts ablaufen würde. In-

interessant ist weiterhin die Transformation der Ladungskonjugation, bei welcher die Invarianz der Wechselwirkung bei Austausch aller beteiligter Teilchen durch ihre Antiteilchen untersucht wird.

Erhaltungsgrößen und Erhaltungssätze

Insbesondere kontinuierliche Symmetrien spielen in der Teilchenphysik eine besondere Rolle, da sie direkt zusammenhängen mit bestimmten erhaltenen Größen in Wechselwirkungsprozessen. Unter den sogenannten **Erhaltungsgrößen** versteht man physikalische Größen, deren Wert sich beobachtbar bei Ablauf eines Prozesses nicht ändert. Die aus der Mechanik bekannteste Erhaltungsgröße ist die Energie. Die mathematische Formulierung von entsprechenden Energiebetrachtungen vor und nach einem Prozess zu einer konstanten Gesamtenergie wird dann als Energieerhaltungssatz bezeichnet. **Erhaltungssätze** lassen sich für alle Erhaltungsgrößen formulieren. Am Beispiel der Energie besagt der entsprechende Erhaltungssatz, dass ein abgeschlossenes System im Ganzen betrachtet weder Energie verliert noch hinzugewinnt. Die Energieerhaltung gilt ebenfalls für Wechselwirkungsprozesse in der Teilchenphysik, wobei die zusammenaddierte Gesamtenergie aller Teilchen vor und aller Teilchen nach der Wechselwirkung den gleichen Wert besitzt. Es gibt zwei weitere wichtige Erhaltungsgrößen, die sich aus der Mechanik auf die Teilchenphysik übertragen lassen. Einerseits gilt die aus mechanischen Stoßprozessen bekannte Impulserhaltung auch für den Gesamtimpuls aller Teilchen vor und nach der Wechselwirkung. Weniger anschaulich ist die Drehimpulserhaltung, welche sich klassischerweise unter anderem in der konstanten Drehung eines Systems ähnlich einem Kreisel um seine Achse ohne äußere Einwirkung darstellt und zwar ungeachtet der Kräfte zwischen den einzelnen Bestandteilen des Systems. In der Teilchenphysik wird der Drehimpuls eines Teilchens etwas komplizierter berechnet, unter anderem unter Berücksichtigung seines Spins. Dennoch gilt das aus der Mechanik bekannte Analogon für die Drehimpulserhaltung auch für Teilchenwechselwirkungen.

Das Noether-Theorem

Eine besonders weitreichende Entdeckung machte nun Emmy Noether (1918): Sie erkannte zunächst, dass in Prozessen, welche symmetrisch unter Zeittranslation sind, die Gesamtenergie erhalten bleibt. In gleicher Weise fand sie, dass Prozessen mit Impulserhaltung eine Symmetrie unter Raumtranslation und Prozessen mit Drehimpulserhaltung eine Symmetrie unter Raumdrehung zugrundeliegt. Die Ver-

allgemeinerung des als **Noether-Theorem** bekannten Konzepts besagt, dass es zu jeder kontinuierlichen Symmetrie, die ein Prozess aufweist, eine entsprechende Erhaltungsgröße gibt.

Das Noether-Theorem hat weitreichende Konsequenzen für die Beschreibung von Teilchenwechselwirkungen. Wie in Kapitel 2.2.3 erläutert, unterscheiden sich die fundamentalen Wechselwirkungen insbesondere durch ihre jeweiligen spezifischen Ladungsarten, an welche die Austauschteilchen der Wechselwirkungen koppeln. Die jeweils charakteristische Gesamtladung ist dabei eine Erhaltungsgröße in Wechselwirkungsprozessen¹⁶. Das im nächsten Unterkapitel vorgestellte Standardmodell zur einheitlichen Beschreibung von Teilchenwechselwirkungen basiert nun auf der Folgerung, dass es zu den entsprechenden erhaltenen Ladungen jeweils eine spezielle abstrakte Symmetrie geben muss, die den verschiedenen Wechselwirkungen zugrundeliegt. Die Symmetrien werden mithilfe der Gruppentheorie beschrieben, wobei eine Gruppe jeweils alle Transformationen umfasst, unter welchen die jeweilige Wechselwirkung invariant ist. Die Symmetrieeigenschaften der Wechselwirkungen werden auch als Eichinvarianzen bezeichnet. Eine Einführung in die Gruppentheorie der Eichinvarianzen kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht gegeben werden. Ein anschauliches Beispiel lässt sich jedoch für die elektroschwache Wechselwirkung (siehe Fußnote 16) geben: Die Symmetrie dieser Wechselwirkung lässt sich interpretieren als die freie Wahl zu definieren, welches Quark in der Wechselwirkung Up-Quark und welches dementsprechend Down-Quark ist. Das Aussehen der Wechselwirkung bleibt gleich unter Vertauschungen der Konvention.

Symmetrieverletzungen

Neben den vorgestellten Symmetrien gibt es jedoch auch Teilchenwechselwirkungen, die bestimmte - eigentlich vorhergesagte - Symmetrien verletzen. Eine solche **Symmetrieverletzung** findet sich beispielsweise bei der schwachen Wechselwirkung, welche nicht symmetrisch unter der Paritätsumkehr P - also unter Raumspiegelungen - ist. Auch eine Kombination der Paritätsumkehr mit einer Transformation aller Teilchen in ihre Antiteilchen (Ladungskonjugation C) führt zu keinem symmetrischen Prozess. Anders ausgedrückt sind manche, durch schwache Wechselwirkungen beschriebene, Prozesse nicht unter den sogenannten CP -Transformationen

¹⁶ Korrekterweise ist nur die elektrische Ladung in elektromagnetischen Wechselwirkungen und die Farbladung in starken Wechselwirkungen erhalten. Die schwache Ladung ist nur in einer gemeinsamen Beschreibung mit der elektromagnetischen Wechselwirkung eine Erhaltungsgröße. Die kombinierte Beschreibung wird als elektroschwache Wechselwirkung bezeichnet.

symmetrisch. Erst das von Wolfgang Pauli und Gerhart Lüders 1955 aufgestellte *CPT*-Theorem löst das Problem (siehe z.B. Streater & Wightman, 2000). Das Theorem besagt¹⁷, dass alle Wechselwirkungen - demnach auch die schwache Wechselwirkung - symmetrisch sind unter den sogenannten *CPT*-Transformationen, die neben der Paritätumkehr *P* und der Ladungskonjugation *C* zusätzlich noch die Zeit umkehren (Transformation *T*). Bislang folgen alle entdeckten Wechselwirkungen dem von Pauli und Lüders aufgestellten Theorem.

2.2.5 Quantenfeldtheorien und das Standardmodell

Um die Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen neben der phänomenologischen Betrachtungsweise ebenfalls mathematisch möglichst genau beschreiben zu können, bedient sich die Teilchenphysik sogenannter **relativistischer Quantenfeldtheorien (QFT)**. Es handelt sich hierbei um theoretische Modellierungen, die umso besser sind, je genauer sie die real beobachtbaren Eigenschaften und Implikationen der Wechselwirkungen zwischen Teilchen darstellen bzw. auch vorhersagen können. Eine umfassende Einführung in diese Theorien würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit übersteigen. Im Folgenden soll daher nur eine möglichst anschauliche Erklärung zu den Grundideen gegeben werden, auf welchen die QFT basiert. Daran anknüpfend wird ein sehr erfolgreiches Modell zur einheitlichen Beschreibung von drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen mithilfe der Quantenfeldtheorien in Grundzügen vorgestellt: Das sogenannte **Standardmodell der Teilchenphysik**.

Grundlagen aus Quantenmechanik und Spezieller Relativitätstheorie

Das Einsatzgebiet der relativistischen Quantenfeldtheorien umfasst - wie es in der Elementarteilchenphysik der Fall ist - Beschreibungen von Systemen, in welchen aufgrund der kleinen Ausmaße und der hohen Geschwindigkeiten der beteiligten Akteure des Systems gleichzeitig die Gesetzmäßigkeiten von Quantenmechanik und Spezieller Relativitätstheorie berücksichtigt werden müssen.

Wie bereits erläutert, gilt als ein wichtiges **Grundprinzip der Quantenmechanik (QM)** hierbei, dass für ein kleines Quantenobjekt lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen unter anderem zu seinem Ort getroffen werden können. Des Weiteren nehmen messbare Eigenschaften von gebundenen Quantenobjekten - wie z.B. die Energie als

¹⁷ Vollständigerweise gilt die Invarianz unter *CPT*-Transformationen im Theorem von Pauli und Lüders nur für Wechselwirkungen, die bestimmten Voraussetzungen genügen. Unter anderem muss die Wechselwirkung den Prinzipien der Lokalität und der Kausalität folgen.

eine sogenannte Quantenzahl - nicht wie in der klassischen Physik alle möglichen kontinuierlichen Werte, sondern nur bestimmte diskrete Werte an. Eine wichtige Implikation für die Teilchenphysik aus der durch Albert Einstein geprägten **Speziellen Relativitätstheorie (SRT)** besagt andererseits, dass die Energie eines Teilchens durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (2.3)$$

Nach dieser als relativistische Energie-Impuls-Beziehung bekannten Formel hängt die Energie eines Teilchens - neben der Lichtgeschwindigkeit c - einerseits von seinem Impuls $\vec{p}$ ab und andererseits von seiner sogenannten Ruhemasse m_0 . Der Begriff Ruhemasse ergibt sich aus der Tatsache, dass die Energie eines Teilchens - und nach Einsteins Äquivalenzprinzip damit auch die Trägheit des Teilchens - nach Gleichung 2.3 mit steigendem Impuls - also mit steigender Geschwindigkeit - zunimmt. Befindet sich das Teilchen dagegen in Ruhe, besitzt es „nur noch“ seine Ruhemasse m_0 . Das Äquivalenzprinzip ist in der Teilchenphysik von besonderer Bedeutung, da es erklären kann, wie aus reiner Energie neue - zuvor nicht vorhandene - massive Teilchen erzeugt werden können. Die Erzeugung ist dabei jedoch nur möglich, wenn die vorhandene Energie ausreicht, um zumindest die Ruhemasse des neuen Teilchens bereitzustellen.

Eine der wichtigsten Grundlagen, auf denen die Quantenfeldtheorie nun aufbaut und in welcher die Prinzipien aus QM und SRT kombiniert werden, stellt die Dirac-Gleichung dar, die bereits in Kapitel 2.2.2 erläutert wurde. Am Beispiel des Atoms wurde illustriert, wie sich die Elektronen in der Atomhülle zunächst durch Wellenfunktionen beschreiben lassen, mithilfe derer man Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für das Elektron an jedem beliebigen Ort angeben kann. Das Aussehen der Wellenfunktionen muss dabei bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Wie der Physiker Erwin Schrödinger (1926) zeigen konnte, wird die Form der Wellenfunktionen insbesondere durch die möglichen diskreten Energieniveaus bestimmt, die Elektronen beobachtbar im Atom einnehmen können (siehe auch Spektroskopie in Kapitel 2.2.3.4). Soll zusätzlich noch das relativistische Verhalten des Elektrons berücksichtigt werden, so empfahl Paul Dirac (1928) eine Erweiterung für die Bedingung zum Aussehen der Wellenfunktionen, die das Verhalten und die Eigenschaften der Elektronen besser beschreiben bzw. voraussagen kann. Während Diracs Beschreibung ursprünglich nur für Fermionen mit Spin $s = 1/2$ gilt, konnten ähnliche Bewegungsgleichungen auch für Bosonen gefunden werden.

Quantisierte Felder und Lagrangedichten

Das entscheidende **Grundkonzept der Quantenfeldtheorien** in der Teilchenphysik ist nun, dass sowohl die Elementarteilchen sowie auch die Wechselwirkungen zwischen ihnen mithilfe sogenannter quantisierter Felder beschrieben werden. Die Beschreibung von Wechselwirkungen bzw. Kräften mittels Feldern ist unter anderem aus der klassischen Elektrodynamik bekannt: Die elektrische Kraft beispielsweise ist mit einem Feld verknüpft, welches für jeden Raumpunkt die Kraftwirkung angibt, die ein Körper oder ein Teilchen mit einer elektrischen Ladung dort erfährt. Soll jetzt beispielsweise die elektromagnetische Kraft zwischen zwei elektrisch geladenen Elementarteilchen beschrieben werden, so wird in der Quantenfeldtheorie ebenfalls die Darstellung eines elektromagnetischen Felds korrespondierend zu der Wechselwirkung verwendet. Die in Kapitel 2.2.3 diskutierte Vorstellung der Wechselwirkung als eine Vermittlung von bosonischen Austauschteilchen stimmt mit der Feldbetrachtung überein, in dem die Austauschteilchen der Wechselwirkungen als sogenannte Anregungen der entsprechenden Felder verstanden werden. In gleicher Weise werden auch die Elementarteilchen selbst, welche an einer Wechselwirkung teilnehmen, als Anregungen von korrespondierenden Feldern verstanden. Im Gegensatz zur Schrödinger- sowie zur Dirac-Gleichung, welche nur Wechselwirkungen mit einem feststehenden Teilchenensemble beschreiben, kann in der Quantenfeldtheorie zusätzlich auch die Erzeugung bzw. Vernichtung von Teilchen beschrieben werden, wie es beispielsweise bei der Paarvernichtung eines Elektron-Positron-Paar ($e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$) der Fall ist.

In der klassischen Mechanik wird das gesamte Verhalten bzw. die gesamte Dynamik eines Systems von Massenpunkten mithilfe sogenannter LagrangeFunktionen beschrieben, die sich insbesondere unter Berücksichtigung des Energieerhaltungssatzes zu Bewegungsgleichungen umformulieren lassen, denen das System folgen muss. In ähnlicher Weise werden in der Quantenfeldtheorie sogenannte Lagrangedichten formuliert, aus welchen sich das Verhalten bzw. das Aussehen der an einer Wechselwirkung beteiligten Felder ableiten lässt. Aus den Lagrangedichten können anders ausgedrückt die Bewegungsgleichungen für die Felder hergeleitet werden. Speziell für Felder mit korrespondierenden fermionischen Anregungen sind die Bewegungsgleichungen durch die zuvor erwähnte Dirac-Gleichung gegeben.

Zusammengefasst modellieren Quantenfeldtheorien Teilchenwechselwirkungen mithilfe von Lagrangedichten, die für jedes Teilchen entsprechende Feldterme enthalten. Die Form der Lagrangedichten ergibt sich aus dem betrachteten Teilchen-

spektrum sowie den verlangten Symmetrieprinzipien. Die Modellierungen sind dabei umso besser, je genauer sie beobachtbare Größen wie Kopplungsstärken und Reichweiten der Wechselwirkungen vorhersagen. Bislang konnten quantenfeldtheoretische Modellierungen mit unterschiedlichen Lagrangedichten für drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen entwickelt werden. Die Quantenfeldtheorie der elektromagnetischen Wechselwirkung wird als Quantenelektrodynamik (QED) bezeichnet und wurde unter anderem von Richard Feynman (1949) in ihrer heutigen Form aufgestellt. Die QED galt nachfolgend als Prototyp für die Beschreibung der anderen Wechselwirkungen. Die Theorie der starken Wechselwirkung ist unter dem Namen Quantenchromodynamik (QCD) bekannt (Fritzsche, Gell-Mann & Leutwyler, 1973) und die gemeinsame Theorie von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung wurde nach ihren Begründern Glashow-Salam-Weinberg-Theorie (GSW-Theorie) genannt (Glashow, 1959; Salam & Ward, 1959; Weinberg, 1967). Für die Gravitation konnte bislang als einzige noch keine quantenfeldtheoretische Beschreibung gefunden werden.

Das Standardmodell der Teilchenphysik

In dem Bestreben alle fundamentalen Wechselwirkungen mithilfe einer einzigen Quantenfeldtheorie bzw. Lagrangedichte einheitlich zu beschreiben, wurde insbesondere seit den 1970er Jahren das sogenannte **Standardmodell der Teilchenphysik** entwickelt. Das theoretische Modell kombiniert auf konsistente Weise die Quantenfeldtheorien der drei Wechselwirkungen in Form einer einzigen Lagrangedichte und basiert dabei insbesondere auf den jeweiligen Symmetrieeigenschaften der Wechselwirkungen (siehe Symmetrien von Wechselwirkungen im vorangegangenen Kapitel). Obgleich es sich bei dem Standardmodell somit im eigentlich Sinne um eine Quantenfeldtheorie handelt, wird häufig eine phänomenologische Darstellungsweise des Modells gewählt, in welcher lediglich die verschiedenen an den Wechselwirkungen beteiligten Teilchen sowie die zu den Wechselwirkungen korrespondierenden Austauschteilchen dargestellt werden. Eine solche Darstellung des Teilcheninhalts und der Wechselwirkungen des Standardmodells findet sich in Abbildung 2.11, in welcher die auf den Stufen präsentierten Elementarteilchen jeweils an Wechselwirkungen teilnehmen können, die - gekennzeichnet über die Austauschteilchen - derselben Stufe oder tieferliegenden Stufen entsprechen. Es sollte jedoch abschließend noch einmal festgehalten werden, dass dieser Teilchendarstellung insbesondere die bis hierher erläuterten Symmetrieeigenschaften der verschiedenen Ladungen zugrunde liegen,

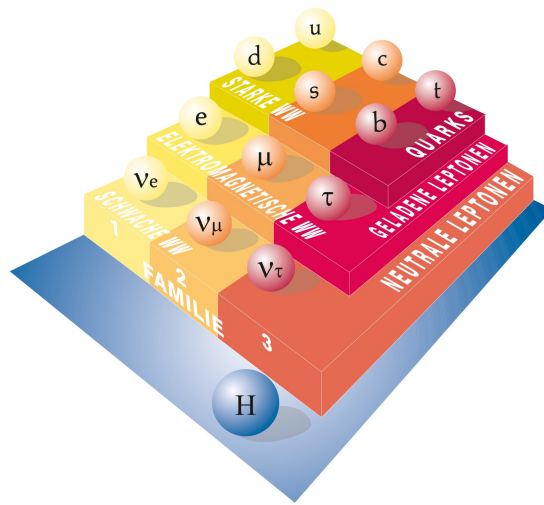


Abbildung 2.11: Eine Darstellung des Teilcheninhalts des Standardmodells der Teilchenphysik (DESY, 2018)

welche ihrerseits die verschiedenen Wechselwirkungen generieren. Das ebenfalls in Abbildung 2.11 dargestellte Higgs-Boson (H) ist ein weiterer Bestandteil des Standardmodells, welcher im nächsten Abschnitt vorgestellt wird. Bis jetzt stimmen viele neue Messungen und Entdeckungen mit den Vorhersagen des Standardmodells überein (z.B. Erler & Schott, 2019; Haller et al., 2018; Particle Data Group, Tanabashi, M. et al., 2018), weshalb das Modell als sehr erfolgreiche theoretische Modellierung gilt.

2.2.5.1 Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson

Die bis hierhin vorgestellte Theorie der Teilchen und der Wechselwirkungen kann ein beobachtbares Teilchenphänomen nicht erklären. Die Tatsache, dass viele Elementarteilchen von Null verschiedene Massen besitzen, führt nämlich zu mathematischen Inkonsistenzen der diskutierten Quantenfeldtheorien. Genauer gesagt kann man zeigen, dass die Symmetrien, welche als entscheidender Faktor den fundamentalen Wechselwirkungen in der kombinierten Quantenfeldtheorie des Standardmodells zugrunde liegen, durch endliche Werte für Teilchenmassen teilweise gebrochen werden. Anders ausgedrückt gehen bestimmte Symmetrieeigenschaften, die zur Beschreibung der Wechselwirkungen nötig sind, durch Integration der Massen in das Modell verloren. Das als Symmetriebrechung bezeichnete theoretische Problem lässt sich jedoch mithilfe des sogenannten Higgs-Mechanismus erklären, welcher nachfolgend diskutiert wird.

Die Theorie zur Erklärung der Teilchenmassen wurde von drei unabhängigen Arbeitsgruppen bereits 1964 entwickelt und ist auf Basis aller ihrer Begründer neben

der Bezeichnung als **Higgs-Mechanismus** häufig auch unter Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble-Mechanismus (EBHGHK-Mechanismus) bekannt. Im Rahmen dieser Theorie wird zunächst die Existenz eines weiteren Feldes - des sogenannten Higgs-Feldes - postuliert. Wie sich aus der Speziellen Relativitätstheorie ableiten lässt, bewegen sich massive Teilchen mit relativistischen Geschwindigkeiten, die nie an die Lichtgeschwindigkeit heranreichen, während sich masselose Teilchen - wie z.B. Photonen oder Gluonen - mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Dementsprechend lässt sich das Hinzugewinnen von Masse anschaulich mit einer Abbremsung des entsprechenden Teilchens vergleichen. Die Abbremsung geschieht durch eine Wechselwirkung der massiven Teilchen mit dem Higgs-Feld, welches den ganzen Raum ausfüllt. Das Higgs-Feld besitzt im Gegensatz zu allen anderen Feldern in der Teilchenphysik einen konstanten Wert ungleich Null. Man könnte sich das Feld wie zähflüssigen Honig vorstellen, der die Geschwindigkeit der Teilchen reduziert. Masselose Teilchen reagieren dagegen nicht mit dem Higgs-Feld.

Die Form bzw. das Aussehen dieses neu eingeführten Feldes kann nun andererseits auch das zuvor beschriebene Symmetrieproblem des Standardmodells erklären. Es wird hierfür angenommen, dass das Higgs-Feld an sich ursprünglich die vorausgesetzten Symmetrieeigenschaften für Felder des Standardmodells erfüllt hat und noch erfüllt. Kurz nach dem Ursprung des Universums wählte das Higgs-Feld jedoch eine von vielen möglichen Formen für sein Aussehen - auch Grundzustand genannt -, welche es heute noch besitzt. Man spricht bei der Festlegung von einer Kondensation des Higgs-Feldes. Dieser in unserem Universum gewählte Grundzustand des Higgs-Feldes weist nun lokal betrachtet nicht mehr den gleichen Symmetriegrad auf, wie er ursprünglich im Standardmodell erwartet wird. Stattdessen besitzt er nur noch genau die Symmetrieeigenschaften, die mit einer Integration von Teilchenmassen in ein quantenfeldtheoretisches Modell übereinstimmen. Man spricht hierbei von einer **spontanen Symmetriebrechung** bzw. von einer **versteckten Symmetrie**, da es nur lokal so aussieht, als wäre das Higgs-Feld weniger symmetrisch. Tatsächlich erfüllt das Higgs-Feld global gesehen immer noch alle erwarteten Symmetrien des Standardmodells und könnte ohne Energieaufwand in einen anderen Grundzustand wechseln.

Der Theorie quantisierter Felder folgend, gibt es als Anregung für das eingeführte Higgs-Feld ein weiteres elementares Teilchen. Die Existenz des sogenannten **Higgs-Bosons** wurde bereits in den 1960ern von Peter Higgs vorausgesagt. Eine Entdeckung dieses Bosons ist ein entscheidender Hinweis für die Richtigkeit der Theorie des Higgs-Mechanismus und damit auch indirekt eine Bestätigung des Standardmo-

dells. Das Higgs-Boson konnte 2012 von Forschungskollaborationen am CERN in Genf in der Kollision von beschleunigten Protonen nachgewiesen werden (ATLAS Collaboration, Aad, G. et al., 2012; CMS Collaboration, Chatrchyan, S. et al., 2012). Die untersuchten Eigenschaften bzw. Quantenzahlen des Higgs-Bosons nach seiner Entdeckung stimmen bis jetzt alle mit den Vorhersagen überein, die sich aus dem Standardmodell ableiten lassen. Die Masse des Higgs-Bosons wurde auf einen Wert von ca. 125 GeV gemessen. Des Weiteren besitzt das Higgs-Boson einen Spin von $s = 0$ und gilt damit als sogenanntes skalares Boson, während die Austauschteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen zu den Vektorbosonen mit $s = 1$ zählen. Aufgrund seiner endlichen Masse zerfällt das Higgs-Boson nach einer mittleren Lebensdauer von ca. 10^{-22} Sekunden.

Bedingt durch die sehr hohe Masse des Higgs-Bosons sind beträchtliche Schwerpunktsenergien nötig, um Higgs-Bosonen experimentell produzieren und damit auch beobachten zu können. Zusätzlich ist eine hohe Kollisionsrate von Teilchen im Experiment erforderlich, so dass mit einer genügend hohen Wahrscheinlichkeit auch tatsächlich Higgs-Bosonen entstehen. Die technischen Voraussetzungen konnten erst mit Fertigstellung des Teilchenbeschleunigers LHC am CERN rund um das Jahr 2008 erreicht werden.

Das Higgs-Boson kann direkt nur an alle massiven Elementarteilchen im Standardmodell koppeln, woraus sich einerseits die möglichen Wechselwirkungen bestimmen lassen, die zur Produktion von Higgs-Bosonen führen. Andererseits können aus dem Standardmodell auch die möglichen Zerfallskanäle des Higgs-Bosons abgeleitet werden, welche eine entscheidende Rolle beim Nachweis des Teilchens durch Rekonstruktion seiner Zerfallsprodukte spielten. Zusammengefasst wird nach aktuellem Kenntnisstand die Theorie des Standardmodells durch die Entdeckung des Higgs-Bosons gestützt und das Higgs-Boson wird als zuletzt entdeckter Teilchenbestandteil des Modells angesehen.

2.2.6 Teilchenphysik in der Kosmologie

Die Teilchenphysik als Grundlagenforschungsgebiet leistet ebenfalls entscheidende Beiträge in anderen physikalischen Bereichen. So liefert sie insbesondere Erkenntnisse über fundamentale Prozesse an die Kosmologie.

Die Kosmologie als Teilbereich der Astrophysik beschäftigt sich grob gefasst mit der Forschung zu Ursprung, Entwicklung und heutiger Struktur des Universums. Dasjenige Forschungsgebiet, welches Kosmologie und Teilchenphysik verbindet,

wird häufig auch als Astroteilchenphysik bezeichnet. Im Folgenden wird ein kurzer Abriss über einzelne Forschungsaspekte der Kosmologie gegeben, in welchen die Teilchenphysik eine besondere Rolle spielt.

Es soll vorab bemerkt werden, dass es sich bei den diskutierten Aspekten nicht um die bereits mehrfach angesprochene kosmische Strahlung handelt, die aus dem Weltall auf unsere Erdatmosphäre trifft. Trotz der ähnlichen Namensgebung muss kosmische Strahlung streng von der Kosmologie als Forschungsgebiet unterschieden werden. Während die Kosmologie ähnlich wie die Teilchenphysik mithilfe von Theorien die Wirklichkeit abzubilden bzw. nachzuvollziehen, wie das Universum entstanden ist, dient die kosmische Strahlung unter anderem als Informationsquelle zur Überprüfung bzw. Untersuchung der Struktur des Universums. Außerdem wird kosmische Strahlung insbesondere in der Teilchenphysik als natürliche Quelle hochenergetischer Teilchen verwendet, mithilfe derer Elementarteilchen und Wechselwirkungen untersucht werden können. Kosmische Strahlung soll daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit den experimentellen Forschungsmethoden der Teilchenphysik und nicht den theoretischen Erkenntnissen zugeordnet werden. Eine Beschreibung der experimentellen Methoden ist kein Gegenstand dieser Arbeit.

Das heute akzeptierteste theoretische Modell der Kosmologie zur Beschreibung des **Ursprungs, der Entwicklung und der heutigen Struktur des Universums** wird als Standardmodell der Kosmologie oder auch als Urknallmodell bezeichnet. Es versucht zu erklären, wie das ganze Universum vor ca. 13,8 Milliarden Jahren aus einem einzigen, unendlichen dichten und sehr heißen Punkt entstanden ist und wie es sich seitdem bis zu seinem Erscheinungsbild in der heutigen Zeit entwickelt hat. Die Teilchenphysik kann hierbei insbesondere für die Frühphase des Universums Erklärungen liefern, in welcher einhergehend mit einer sehr hohen Energiedichte im Universum hochenergetische Teilchen existierten und miteinander wechselwirkten.

Generell wird zunächst einmal davon ausgegangen, dass nach dem Urknall bis zu einem Alter des Universums von 10^{-43} Sekunden in der sogenannten Planck-Ära Temperaturen von 10^{32} Kelvin herrschten und dass damit verbunden nur eine einzige Wechselwirkung existierte, die als Urkraft bezeichnet wird.

Daran anschließend könnte bis zu einem Alter des Universums von 10^{-30} Sekunden die sogenannte GUT-Ära stattgefunden haben, in welcher es bereits zwei verschiedene Kräfte gab: Die Gravitation und die sogenannte GUT-Kraft. Hierbei bezeichnet GUT (engl. *Grand Unified Theories*) Theorien, in welcher die drei fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells (stark, schwach, elektromagnetisch)

zu einer vereinheitlichten Kraft zusammengefasst werden. In der *GUT*-Ära wird auch eine sehr schnelle Ausdehnung des Universums vermutet, was als kosmische Inflation bezeichnet wird.

Nach der *GUT*-Ära bis zu einem Universumsalter von ca. 10 Sekunden fand vermutlich die Phase der sogenannten Primordialen Nukleosynthese statt, nach Abschluss welcher sich Atomkerne gebildet hatten. Während dieser Phase kühlte das Universum von 10^{25} Kelvin auf 10^9 Kelvin ab, was einhergeht mit der Tatsache, dass zuerst lediglich Quarks, Antiquarks und Gluonen in einem sogenannten Quark-Gluon-Plasma existierten. Das Plasma zeichnet sich als ein Zustand aus, in welchem sich die Teilchen quasi frei verhalten und derart hohe Temperaturen herrschen, dass sich keine Hadronen bilden können. Mit der stetigen Abkühlung des Universums bildeten sich nach und nach zuerst schwerere Hadronen, die in Protonen und Neutronen zerfielen, welche sich ihrerseits durch Kernfusion zu den Atomkernen von heute bekannten Elementen zusammenschlossen.

Tatsächlich entstanden vor dem Zusammenschluss zu Atomkernen neben Protonen und Neutronen auch Antiprotonen und Antineutronen aus den Hadronen. Durch Annihilation löschten sich die allermeisten Materie- und Antimaterieteilchen jedoch gegenseitig aus. Aus einem bis heute ungeklärten Grund existierte lediglich ein sehr kleiner Überschuss an Materieteilchen im Verhältnis zu Antimaterieteilchen, aus welchem sich nach der Annihilation die Atomkerne bildeten. Dieses Ungleichgewicht wird auch als Materie-Antimaterie-Asymmetrie oder als Baryonen-Antibaryonen-Asymmetrie bezeichnet. Nach der Phase der primordialen Nukleosynthese bestand das Universum aus einem Plasma aus Atomkernen, Elektronen und Photonen.

Erst 400.000 Jahre nach dem Urknall und nach einer weiteren Abkühlung des Universums bildeten sich in der sogenannten Rekombinationphase stabile Atome. Eines der noch heute sichtbaren Überbleibsel aus dieser Phase stellt die sogenannte Mikrowellenhintergrundstrahlung (engl. *cosmic microwave background* (CMB)) dar. Bei der Entkopplung der Photonen bzw. des Lichts aus dem Plasma mit Atomkernen und Elektronen hatten die Photonen eine bestimmte mittlere Weglänge bzw. Abstand, der von der genau zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Temperatur im Universum abhängt. Diese elektromagnetische Strahlung mit einer dazugehörigen speziellen Frequenz im Mikrowellenbereich kann auch heute noch gemessen werden.

2.2.7 Offene Fragen der Teilchenphysik

Bei all ihren Erfolgen zur Beschreibung von Elementarteilchen und Wechselwirkungen finden sich noch viele offene Fragen, welche die Teilchenphysik bislang nicht ausreichend beantworten kann. Nachfolgend sollen in Kürze vier sehr berühmte Problemstellungen skizziert werden:

1. Wie lassen sich die durch **Neutrinooszillationen** nachgewiesenen Massenunterschiede von Neutrinos korrekt (im Standardmodell) beschreiben?

Neuere Forschungsergebnisse der Teilchenphysik belegen, dass sich die drei verschiedenen Arten von Neutrinos ineinander umwandeln können bzw. dass ein und dasselbe Neutrino je nach Messzeitpunkt bzw. Messort in einem Detektor mit gewissen Wahrscheinlichkeiten als eine der drei Neutrino-Arten erscheint. Es lässt sich theoretisch zeigen, dass das unter dem Namen Neutrino-Oszillationen bekannte Phänomen eine Differenz der Massen der Neutrinos voraussetzt. Im Standardmodell werden Neutrinos jedoch als masselose Leptonen modelliert, wonach es keine Massendifferenz zwischen ihnen geben kann. Mithin ist die Frage danach, welche Massen die Neutrinos exakt besitzen, als Desiderat in der Teilchenphysik zu bezeichnen. Darüber hinaus wären falsifizierbare theoretische Erweiterungen des Standardmodells wünschenswert, welche mit den endlichen Neutrino-Massen konsistent sind.

2. Weshalb existiert in unserem Universum eine **Asymmetrie zwischen Baryonen- und Antibaryoneneinhalt**?

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, fand in der Entwicklung des Universums vor der Bildung von Atomkernen eine Annihilation der existierenden Protonen und Antiprotonen bzw. Neutronen und Antineutronen statt. Dabei blieb ein sehr kleiner Überschuss an Materieteilchen im Vergleich zu Antimaterieteilchen übrig, aus welchem sich alle weitere Materie in unserem heutigen Universum gebildet hat. Geht man in klassischen Urknallmodellen jedoch davon aus, dass sich alle Teilchen ursprünglich aus reiner Energie gebildet haben und gelten außerdem die entsprechenden Erhaltungssätze von Wechselwirkungen im Standardmodell, so sollten sich gleich große Mengen an Baryonen und Antibaryonen gebildet haben. Einige Theorien zur Erklärung der heutigen Asymmetrie setzen voraus, dass es bereits beim Urknall als sogenannte Anfangsbedingung ein sehr großes Ungleichgewicht gegeben hat, welches im Laufe der Zeit durch die entsprechenden Annihilationen nur kleiner wurde.

Andere Theorien - wie z.B. auch im Standardmodell erklärbar - vermuten, dass sich die Asymmetrie dynamisch im Laufe der Entstehung des heutigen Universums entwickelt hat.

3. Was ist **Dunkle Materie** und was ist **Dunkle Energie**?

All die uns bekannte Materie aus Baryonen im Universum macht insgesamt nur 5 % der Universumsmasse aus. Aus was besteht nun also der Rest? Dass es eine weitere Art von Materie geben muss, welche als dunkel bezeichnet wird, lässt sich unter anderem durch die Bewegung von Galaxien in Galaxienhaufen beobachten. Damit Galaxien mit gewissen Radialgeschwindigkeiten nämlich in einem Galaxienhaufen bleiben und nicht voneinander wegdriften, müssen große anziehende Gravitationskräfte wirken. Die beobachtbare Gesamtmasse in einigen Galaxienhaufen reicht jedoch nicht aus, um ihr Bestehenbleiben zu erklären. Es muss demnach weitere, nicht beobachtbare, dunkle Masse in den Galaxienhaufen vorhanden sein. In der Teilchenphysik werden verschiedene Kandidaten für die Dunkle Materie vorgeschlagen. Favorisierte, jedoch bislang unentdeckte Teilchenkandidaten für Dunkle Materie sind unter anderem sogenannte WIMPs (engl. *Weakly Interacting Massive Particles*), wobei es sich um schwere Teilchen mit Massen von 10 – 1000 GeV handelt, die nur an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen.

Unter dem Begriff Dunkle Energie gibt es für die Teilchenphysik- und Kosmologieforschenden eine weitere noch offene Fragestellung. Nach heutigem Stand dehnt sich das Universum zur Zeit nicht mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, sondern sogar beschleunigt aus. Für diese beschleunigte Expansion muss eine bislang unbekannte Energieform verantwortlich sein, welche der anziehenden Gravitation der im Universum vorhandenen Massen entgegengesetzt und betragsmäßig sogar größer ist.

4. Gibt es eine **vereinheitlichende Theorie** für alle fundamentalen Wechselwirkungen?

In dem Bestreben alle Phänomene im Universum möglichst einfach und einheitlich zu beschreiben, würden Teilchenphysikforschende gerne alle fundamentalen Wechselwirkungen als Ausprägungen einer einzigen Wechselwirkung erklären. Die im vorangegangenen Kapitel erwähnten *GUT*-Theorien versuchen bereits, die starke, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung in einer Theorie zusammenzufassen. Bislang bleibt die Vereinigung der Wechselwirkungen jedoch ein Forschungsdesiderat, obgleich sich - wie im vorangegangenen Kapitel angedeutet - das Verhalten der Kopplungsparameter für die drei Wechselwirkungen bei sehr hohen

Energien und damit auch in der energiereichen Frühphase des Universums eventuell nicht mehr unterscheiden lassen. In der Frühphase des Universums wird daher die Existenz einer einzigen kombinierten Kraft vermutet.

In dem hier abzuschließenden Kapitel wurde eine Einführung in die Struktur der wissenschaftlichen Domäne der Teilchenphysik in Form eines Überblicks zu den zentralen Theorien und bedeutendsten Erkenntnissen und Entdeckungen gegeben. Diese *Big Ideas* der Teilchenphysik bilden die Grundlage, aus welcher in der nachfolgend vorgestellten Studie diejenigen Schlüsselkonzepte ausgewählt werden sollen, welche von entscheidender Bedeutung für das Fachwissen von Lehrkräften sind.

3

Forschungsfragen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die theoretische Einbettung der vorliegenden Arbeit aus zwei verschiedenen Perspektiven diskutiert. Während in Kapitel 1 der Forschungsstand zur Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften zusammengefasst und der nachfolgend verwendete Modellierungsfokus bereits im Ansatz erarbeitet wurde, gab Kapitel 2 einen Überblick über die *Big Ideas* der Teilchenphysik, die potenziell für das Fachwissen von Lehrkräften relevant sein könnten. Es handelte sich bis hierhin somit um Beschreibungen der relevanten Forschungsstände, die sich einerseits an den Erkenntnissen der fachdidaktischen Forschungsgemeinschaft (Kapitel 1) und andererseits an denjenigen der fachwissenschaftlichen, teilchenphysikalischen Forschungsgemeinschaft (Kapitel 2) orientierten. Beide Perspektiven zusammengebracht bilden die theoretische Grundlage, auf der die nachfolgend beschriebenen Forschungsfragen des vorgestellten Projekts basieren.

Als übergeordnetes **Projektziel** lässt sich zunächst die Modellierung desjenigen Fachwissens definieren, welches von Lehrkräften für den Unterricht von Themen aus der physikalischen Domäne Teilchenphysik benötigt wird. Wie einleitend erläutert, wird die Wahl für diese spezielle Modellierung durch die Tatsache motiviert, dass Teilchenphysik einen recht jungen Themenkomplex im Kontext deutschen Schulunterrichts darstellt und infolgedessen für viele Lehrkräfte kein expliziter Ausbildungsgegenstand war. Um folglich jedoch Lehrkräfteaus- und -fortbildungsprogramme zum Thema Teilchenphysik konstruieren und einsetzen zu können, muss zuerst das Fachwissen beschrieben werden, welches Lehrkräfte als normative Zielsetzung in solchen Programmen erlangen sollten. Solch ein spezielles Fachwissen wurde bislang weder beschrieben, noch untersucht und lässt sich aufgrund der allgemeinen Domänenspezifität des Fachwissens nicht direkt aus den Ergebnissen von anderen Domänen übertragen, die eventuell besser bekannt sind.

Das Fachwissen für die Domäne Teilchenphysik soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch die **Konstruktion eines Strukturmodells** beschrieben werden,

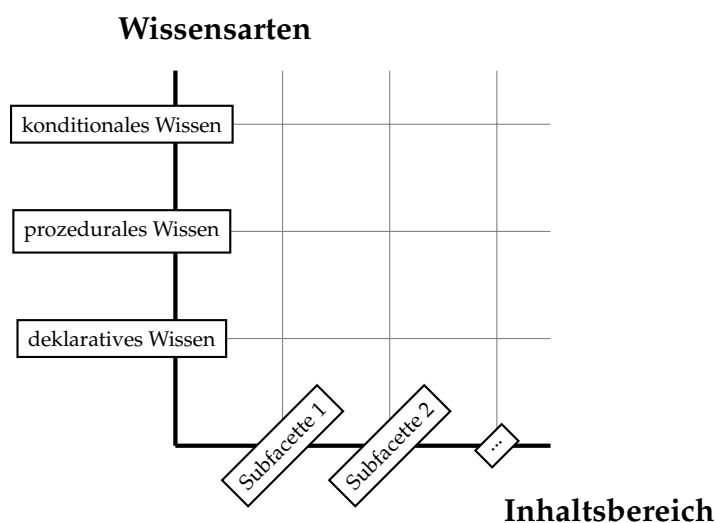


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Fachwissens einer Lehrkraft als Produkt der Dimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten*

welches das Fachwissen einer Lehrkraft als Produkt mehrerer Wissensdimensionen ansieht (siehe Kapitel 1). Wie in Kapitel 1.4 erläutert, fokussieren sich die nachfolgend vorgestellten Studien auf die Modellierungen der Dimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten*. Das Strukturmodell aus diesen beiden Dimensionen lässt sich als ein zweidimensionales Koordinatensystem veranschaulichen, wobei die Dimensionen als Koordinatenachsen aufgefasst werden (siehe Abbildung 3.1). Im Bild des Fachwissens als Koordinatensystem entsprechen die Einheiten auf den Koordinatenachsen den einzelnen unterscheidbaren Wissensfacetten, welche die betreffende Wissensdimension (Achse) umfasst. Einzelne Gitterpunkte im Raum entsprechen dagegen jeweils dem Fachwissen zu einer bestimmten Kombination aus je einer Subfacette aus jeder der beiden Dimensionen¹.

Eine Modellierung des Fachwissens kann demnach verstanden werden als eine Strukturierung des zweidimensionalen Raums zwischen Inhaltsbereichen und Wissensarten durch die Identifikation bzw. Abgrenzung und möglichst genaue Beschreibung der einzelnen Subfacetten der Dimensionsachse *Inhaltsbereich* sowie von deklarativem, prozeduralem und konditionalem Wissen der Dimensionsachse *Wissensarten* (siehe Definition der Wissensarten in Kapitel 1.3.2).

¹ Es ist jedoch anzumerken, dass der Vergleich mit einem Koordinatensystem dahingehend unvollständig ist, dass die Anordnung der Subfacetten auf den Dimensionsachsen keiner hierarchischen Ordnung folgt. Die Subfacetten stellen vielmehr nebeneinanderstehende, weitestgehend unabhängige Teilaspekte der Dimensionen dar.

Die Modellierung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit getrennt für die beiden Dimensionen durchgeführt. Hierbei liegt der **Hauptschwerpunkt** auf der Modellierung der Dimension *Inhaltsbereich*, deren Bedeutung als Bezugsrahmen für alle bekannten Fachwissensdimensionen bereits in Kapitel 1.4 hervorgehoben wurde. Auf der Modellierung der Dimension *Wissensarten* wird zusätzlich ein **Nebenfokus** liegen.

Die Modellierung der Dimension *Inhaltsbereich* versucht folgende Forschungsfrage zu beantworten:

Forschungsfrage 1 (F1): Durch welche Subfacetten lässt sich die Dimension *Inhaltsbereich* des Fachwissens von Lehrkräften für die Domäne Teilchenphysik modellieren?

F1 zielt nach obigen Ausführungen somit auf die **Einschränkung**, die **Strukturierung** sowie die **präzise Beschreibung** der Subfacetten der Dimension *Inhaltsbereich* ab. Bei der Einschränkung wird der Frage nachgegangen, welche aus allen möglichen teilchenphysikalischen Themen überhaupt Relevanz für das Lehrkräftewissen besitzen. Die Strukturierung der relevanten Themen wird hingegen durch die Identifikation voneinander abgrenzbarer Themen erreicht. Die möglichst präzise Beschreibung des Inhalts der einzelnen Themen liefert schließlich die modellierten Subfacetten des inhaltlichen Fachwissens.

Wie bereits durch die Methodik-Grundsätze 1 und 2 in Kapitel 1.4 dargelegt, soll Forschungsfrage F1 in der vorliegenden Arbeit empirisch durch eine Delphi-Studie beantwortet werden. In der Delphi-Studie wird die Expertise eines Gremiums von Personen aus verschiedenen professionellen Gruppierungen im Spannungsfeld „Teilchenphysik und Schule“ genutzt, um die wichtigsten Schlüsselkonzepte der Teilchenphysik für das Lehrkräftewissen zu erheben und zu charakterisieren. Die Methode der Delphi-Befragung wird im Rahmen des Forschungsdesigns in Kapitel 4 erläutert.

Da es sich bei F1 um eine exploratorisch ausgerichtete Fragestellung handelt, lassen sich vorab keine expliziten Hypothesen bezüglich der zu erwartenden Ergebnisse der Delphi-Studie aufstellen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die von den Expertinnen und Experten für das Lehrkräftewissen zu nennenden teilchenphysikalischen Schlüsselkonzepte im Rahmen der in Kapitel 2 vorgestellten *Big Ideas* der Teilchenphysik bewegen.

Für die Modellierung der Fachwissensdimension *Wissensarten* wird im Kontext der vorliegenden Arbeit folgende Forschungsfrage gestellt:

Forschungsfrage 2 (F2): Wie sehen deklaratives, prozedurales und konditionales Wissen in Bezug auf die inhaltlichen Subfacetten des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik aus?

Forschungsfrage **F2** strebt somit eine differenziertere Beschreibung der durch **F1** erhobenen inhaltlichen Subfacetten an. Die Beschreibung ist dabei differenzierter, da die Subfacetten noch einmal getrennt für jede der drei in Kapitel 1.3.2 definierten Wissensarten des deklarativen, prozeduralen und konditionalen Wissens charakterisiert werden sollen. Im Bild des zuvor beschriebenen Koordinatensystems werden somit Beschreibungen für die einzelnen Raumpunkte im Fachwissensraum gegeben.

Wie im Kontext zu Methodik-Grundsatz 3 in Kapitel 1.4 erläutert, werden als Ergebnis von Forschungsfrage **F1** Subfacettenbeschreibungen erwartet, die bereits primär dem deklarativen Wissen zuzuordnen sind. Die Beschreibungen der beiden anderen Wissensarten können durch eine Überarbeitung aus den deklarativen Beschreibungen transferiert werden. Die Überarbeitung findet dabei theoriegeleitet durch die Berücksichtigung der Definitionen für die Wissensarten aus dem ersten -fachdidaktischen - Theoriekapitel statt. Das Ergebnis der Modellierung der Wissensarten und hierbei insbesondere das auf spezifische teilchenphysikalische Themen bezogene prozedurale und konditionale Fachwissen wird von Lehrkräften in besonderer Weise bei der Planung, Durchführung und Reflexion von Unterricht benötigt (siehe auch Kapitel 1.3.2).

Die Ausarbeitung der Beschreibungen für die Wissensarten sollen im Rahmen dieser Arbeit zunächst lediglich für diejenigen inhaltlichen Subfacetten erstellt werden, welche die Expertinnen und Experten im Lauf der Erhebungen zu **F1** als besonders relevant für das Lehrkräftewissen im Vergleich zu anderen Facetten charakterisieren.

Teil III

Empirische Untersuchung

4

Forschungsdesign und Durchführung der Untersuchungen

Die folgenden Kapitel beschreiben die empirische Umsetzung des vorgestellten Dis-sertationsprojekts, mithilfe derer Antworten auf die in Kapitel 3 formulierten For-schungsfragen gefunden wurden. Ausgehend von der übergeordneten Unterteilung einer empirischen Untersuchung in die drei Phasen der Planung, der Durchfüh-rung und der Auswertung von Datenerhebungen, werden im Folgenden zunächst die Ergebnisse aus der Planungsphase (Abschnitt 4.1 - Abschnitt 4.3) sowie aus der Durchführungsphase der Datenerhebungen (Abschnitt 4.4) diskutiert. Im Anschluss daran liegt in Kapitel 5 der Fokus auf der Auswertungsphase vor dem Hintergrund der verwendeten Analysestrategien und Ergebnisse.

An die Forschungsfragen im vorangegangenen Kapitel anschließend, besteht das Hauptforschungsinteresse hierbei in der Erhebung und der Charakterisierung der-jenigen teilchenphysikalischen Schlüsselkonzepte, welche die Subfacetten der Fach-wissensdimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* einer Lehrkraft bilden. Im Fol-genden wird ausschließlich das methodische Vorgehen zur Modellierung des *In-haltsbereichs* erläutert. Für die Beschreibung der Subfacetten bezüglich verschiedener *Wissensarten* wurde ebenfalls im vorangegangenen Kapitel ein theoriegeleitetes Vor-gehen beschrieben, welches sich im Nachgang an die empirische Bestimmung der inhaltlichen Subfacetten anschließt. Vorgehen und Ergebnisse zur Beschreibung der *Wissensarten* werden dementsprechend im Rahmen dieser Arbeit erst nach der Mo-dellierung des *Inhaltsbereichs* im Auswertungskapitel 5.4 diskutiert.

Wie in Kapitel 1.4, im Kontext zu Methodik-Grundsatz 1, ausführlich dargelegt, kann die Modellierung von Subfacetten der Fachwissensdimension *Inhaltsbereich* für die Teilchenphysik entgegen dem bislang üblichen Vorgehen nicht vorrangig durch die Verwendung von Bildungsstandards, Schulbüchern oder fachwissenschaftlicher Literatur stattfinden. Stattdessen wird das weitestgehend unbekannte Aussehen die-

ses speziellen Fachwissens durch ein Zusammenführen der Expertise aller Personengruppen modelliert, die in verschiedenen Kontexten mit Teilchenphysik und dem Schulunterricht Erfahrungen besitzen. Als geeignetes Instrumentarium für die Zusammenführung von Informationen zur Generierung von Wissens zu einem neuen Untersuchungsgegenstand bietet sich die Delphi-Methode zur Konzeption der empirischen Untersuchungen an.

Nachfolgend wird in Abschnitt 4.1 eine kurze Definition und Einführung zur Delphi-Methodik gegeben. Die allgemeine Definition wird ergänzt durch projektspezifische Vorüberlegungen zur Wahl der Variante einer bestimmten Delphi-Methode, zu Gelingensbedingungen für Delphi-Befragungen sowie zur Auswahl der teilnehmenden Testpersonen. Das gewählte Forschungsdesign wird anschließend überblicksartig in Abschnitt 4.2 dargestellt. Im Rahmen des gewählten Designs werden drei aufeinanderfolgende sogenannte Befragungsrunden durchgeführt, in welchen jeweils verschiedene Fragebögen eingesetzt werden, deren Konstruktion in Abschnitt 4.3 näher erläutert wird. Schließlich beinhaltet Abschnitt 4.4 die Details zur Durchführung der Befragungen in Form eines Überblicks zur Einladung der teilnehmenden Personen, zu den Befragungszeiträumen sowie zu Stichprobeneigenschaften der jeweiligen Expertisegruppe.

4.1 Planung von Delphi-Methodik und Expertiseauswahl

Die Delphi-Methode, deren Namen an das griechische Orakel angelehnt ist, wurde zum ersten Mal in den 1960er Jahren von der *RAND-Corporation* in den USA explizit als Gruppenbefragungstechnik entwickelt und eingesetzt (Dalkey & Helmer, 1963). Anfänglich für die wirtschaftliche Beratung des Militärs konzipiert, lässt sich der Ursprung der Delphi-Methode in den Wirtschaftswissenschaften verorten. Nach ihrer Definition zielt die Methode darauf ab, „einen möglichst reliablen Konsens unter Meinungen in einer Gruppe von Experten zu finden“ (Dalkey & Helmer, 1963, S. 1). Erreicht werden kann der Konsens laut der Entwickelnden durch den Einsatz einer Reihe aufeinanderfolgender Fragebögen mit jeweils dazwischengeschalteter Rückmeldung an die teilnehmenden Fachleute. Im Rahmen der Rückmeldung werden Informationen über die Meinungen der anderen an der Befragung teilnehmenden Personen zu dem erfragten Sachverhalt an die Einzelpersonen zurückgespiegelt, so dass eine Revidierung bzw. Anpassung der eigenen Meinung stattfinden kann.

In Deutschland erlangte die Delphi-Methode seit den 1990er Jahren insbesondere durch ihre Anwendung im Rahmen der durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bzw. ursprünglich durch das Bundesamt für Forschung und Technologie (BMFT) initiierten *Foresight*-Prozesse an Bedeutung. Bei den durch das Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (ISI) durchgeführten Studien wurden Fachleute aus Forschung, Wirtschaft und Politik gebeten, Forschungsfelder und Technologien zu identifizieren, die langfristig für den Forschungsstandort Deutschland wichtig sein könnten (siehe z.B. Fraunhofer ISI, 2009). Der Fokus der Befragungen lag hierbei auf der Etablierung eines Konsens unter den Teilnehmenden.

Die empirische Sozialforschung bedient sich ebenfalls der Technik der Delphi-Methode (auch häufig als Delphi-Befragung bezeichnet). Obgleich hier vielfältige Meinungen zu erreichbaren Zielen sowie zu dem Ablauf von Delphi-Befragungen existieren, lässt sich doch als allgemeingültige Charakteristik erkennen, dass es sich um einen Gruppenkommunikationsprozess handelt, in welchem eine bestimmte inhaltliche Fragestellung im Fokus steht, die durch die Expertise bestimmter Personengruppen beantwortet werden soll (M. Häder, 2014).

Darüber hinaus finden sich in jeder Definition von Delphi-Befragungen mehrere sogenannte Befragungsrunden bzw. Befragungswellen, welche konsekutiv ablaufen, rückgekoppelt und anonymisiert sind. Die Rückkopplung erfolgt hierbei ab der zweiten Befragungsrunde durch Rückspiegelung der Ergebnisse aus vorherigen Runden an die Teilnehmenden der aktuellen Runde.

Unter allen Zielen, welche mit einer Delphi-Befragung verfolgt werden können (siehe unten), findet sich das Auffinden eines Konsens innerhalb der teilnehmenden Gruppe besonders häufig in sozial- bzw. bildungswissenschaftlichen Studien. Falls genügend Ressourcen zur Verfügung stehen, werden hierbei so viele Befragungsrunden durchgeführt, bis eine Konvergenz durch eine (möglichst) vollständige Übereinstimmung der Teilnehmenden bezüglich des erfragten Sachverhalts erzielt wird. Es sollten jedoch als Minimum zwei Befragungsrunden durchgeführt werden, so dass die Befragungsteilnehmenden mindestens einmal eine Rückmeldung erhalten und ihre Meinung revidieren können (Balzer, 2005; Blind & Cuhls, 2001; M. Häder, 2014).

Der genaue Ablauf einer Delphi-Befragung wird stark von der damit verfolgten Zielsetzung beeinflusst und sollte dementsprechend geplant werden. Nach M. Häder (2014) lassen sich die folgenden vier Typen bzw. Varianten von Delphi-Befragungen unterscheiden:

- Bei der **Delphi-Befragung zur Ideenaggregation (Typ I)** steht die Sammlung von Lösungsvorschlägen zu einem bestimmten Problem im Mittelpunkt. Es werden in allen Befragungsrunden ausschließlich qualitative Befragungsmethoden eingesetzt. Die erste Runde enthält ein offenes Befragungselement zur Ideensammlung. Die Vorschläge werden vom Forschungsteam zusammengetragen, gebündelt und ab der zweiten Runde noch mindestens einmal mit einer offenen Fragestellung zu einem weiteren *Brainstorming* an die Befragungsteilnehmenden zurückgespiegelt. Als Gütemaß für die konzipierte Delphi-Befragung wird hier die Generierung möglichst vieler Ideen herangezogen.
- Die **Delphi-Befragung zur Bestimmung bzw. Vorhersage eines unsicheren Sachverhalts (Typ II)** strebt das Erlangen von Wissen zu einem bislang unklaren Gegenstand durch eine Expertisegruppe an. Nach einer ersten qualitativen Befragungsrunde zur Strukturierung des Problemfelds sind dann quantitativ angelegte Befragungen zur Bewertung der verschiedenen Aspekte des Sachverhalts von Interesse. Wird eine Delphi-Befragung von Typ II zur Vorhersage verwendet, lässt sich als Gütemaß der Vergleich mit einer später eintretenden Wirklichkeit heranziehen.
- Bei der **Delphi-Befragung zur Ermittlung bzw. Qualifizierung der Ansichten einer Expertisegruppe zu einem unsicheren Sachverhalt (Typ III)** steht ebenfalls die inhaltliche Beschäftigung mit einer unklaren Angelegenheit im Mittelpunkt. Der Forschungsfokus bei Typ III liegt jedoch nicht auf dem Sachverhalt selbst, sondern auf einer vorab bestimmten Gruppe von Expertinnen und Experten, die während des Delphi-Prozesses weitergebildet bzw. qualifiziert werden soll. Nach einer qualitativen Befragungsrunde finden gleichermaßen quantitativ ausgelegte Befragungen statt. Als Gütemaß für diesen Typ wird die Frage gestellt, wie genau die Ansichten der Gruppe erhoben wurden und wie stark sie sich weitergebildet hat.
- Eine der meistverwendeten Varianten ist die **Delphi-Befragung zur Konsensfindung unter Teilnehmenden (Typ IV)**, bei welcher - wenn auch zumeist keine vollständige - so doch eine möglichst große Übereinstimmung unter den teilnehmenden Fachleuten zu einem Sachverhalt angestrebt wird. Da der Sachverhalt selbst vom Forschungsteam vorgegeben ist, werden bei diesem Typ vorwiegend quantitativ-bewertende Befragungsrunden eingesetzt. Der quantifizierte Grad an Übereinstimmung kann hier als Gütemaß betrachtet werden.

Auf Basis der diskutierten Delphi-Varianten bietet sich für das vorgestellte Forschungsvorhaben - die Bestimmung der inhaltlichen Subfacetten des Fachwissens von Lehrkräften - aus folgenden Überlegungen heraus eine Kombination von Typ II und Typ IV an: Zunächst handelt es sich bei dem Fachwissen von Lehrkräften in der Teilchenphysik um einen weitestgehend unbekannten Sachverhalt¹, welcher in einem ersten qualitativen Schritt durch das Expertisegremium selbst vordefiniert werden muss (Typ II). Sobald verschiedene Facetten des Sachverhalts klarer beschrieben sind, kann sich eine Phase der Konsensfindung unter den Teilnehmenden darüber anschließen, welche Aspekte tatsächlich zum relevanten inhaltlichen Fachwissen zu zählen sind (Typ IV). Die Phase der Konsensfindung ist insbesondere daher wichtig, da anzunehmen ist, dass die Expertinnen und Experten in der ersten offenen Phase jeweils verschiedene Aspekte nennen werden, eventuell ohne die von anderen Personen genannten Aspekte im Blick zu haben. Es muss daher in der Konsensphase eine Stellungnahme des gesamten Expertisegremiums zu denselben Aspekten stattfinden. Ein ähnliches kombiniertes Design von Delphi-Befragungen aus Typ II und Typ IV findet sich in zwei bekannten Studien, die in den Bildungswissenschaften bzw. in der Fachdidaktik angesiedelt sind. Einerseits erhoben Kunina-Habenicht et al. (2012) im Zuge der Umstrukturierung der Lehrkräftebildung in Deutschland die zentral wichtigen Kerninhalte dieser Bildung mithilfe eines Gremiums von Fachleuten aus verschiedenen Fachdisziplinen und Phasen der Lehrkräftebildung. Andererseits bediente sich das Projekt *MaLeMINT* (Neumann, Pigge & Heinze, 2018) der Expertise von Hochschullehrenden, um die von angehenden Studierenden der MINT-Fächer benötigten mathematikbezogenen Lernvoraussetzungen zu identifizieren. In beiden Fällen wurde aufgrund des weitestgehend unbekannten Sachverhalts eine erste offene qualitative Befragungsrunde durchgeführt, woran sich jeweils zwei quantitative Runden zur Konsensfindung anschlossen.

Die bisherigen allgemeinen Vorüberlegungen zur Wahl der Delphi-Methodik im Blick, wird nachfolgend noch einmal gezielt analysiert, welche Bedingungen für den Erfolg einer Delphi-Befragung entscheidend sind und wie diese Bedingungen im vorgestellten Projekt erfüllt bzw. realisiert werden können.

¹ Das Fachwissen von Lehrkräften in der Teilchenphysik ist natürlich vorab nicht vollständig unbekannt, da es vorrangig Themen aus den in Kapitel 2 vorgestellten *Big Ideas* der Teilchenphysikforschung beinhalten wird. Dennoch ist das genaue Aussehen unklar und es soll bei der Delphi-Befragung mit einem offenen Element begonnen werden, um die Meinung der Expertinnen und Experten nicht zu Beginn in eine bestimmte Richtung zu lenken.

4.1.1 Anzahl und Art der Befragungsrunden

Durch die diskutierte Wahl der Delphi-Variante aus einer Kombination von Typ II und Typ IV im vorangegangenen Abschnitt ergibt sich zunächst eine benötigte Mindestanzahl von zwei Befragungsrunden des Expertisegremiums. Hierbei dient die erste Runde mit einer zu verwendenden qualitativen Befragungsmethodik der offenen Erhebung aller potenziell wichtiger Aspekte des von Lehrkräften benötigten inhaltlichen Fachwissens in der Teilchenphysik. Anschließend soll ein Konsens über die wirklich wichtigen bzw. relevanten Themen unter den genannten Aspekten in einer quantitativ ausgelegten Befragungsrunde durch Stellungnahme aller Expertinnen und Experten zu allen genannten Themen gefunden werden.

Zwischen den beiden beschriebenen Befragungsrunden wird - wie nachfolgend erläutert - noch eine weitere Befragungsrunde eingefügt. M. Häder (2014) hebt hervor, dass als Grundlage zur erfolgreichen Konsensfindung in Delphi-Befragungen ein möglichst gut strukturierter bzw. präzise definierter Sachverhalt zur Bewertung in die Befragungen gegeben werden muss, um eine mögliche Ambiguität von Begriffen und Konzepten zu vermeiden. Zum Zweck der Strukturierung werden im vorgestellten Projekt alle gleichen oder thematisch verwandten Nennungen von Personen aus Befragungsrunde 1 zu den für Lehrkräfte relevanten fachwissenschaftlichen Themen gebündelt und mithilfe einer Qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring, 2015) thematischen Ober- und Unterkategorien zugeordnet (siehe ausführliche Beschreibung des Vorgehens in Kapitel 5.1). Da sowohl bei der Neubildung thematischer Kategorien als auch bei der Zuordnung von Nennungen in die Kategorien immer die Möglichkeit gewisser subjektiver Einflüsse durch das Forschungsteam besteht, muss die Zustimmung der Teilnehmenden in einer speziellen Befragungsrunde darüber eingeholt werden, ob sie ihre Antworten aus Runde 1 - bzw. ob sie alle wichtigen Aspekte der Teilchenphysik - in dem konstruierten Kategoriensystem wiederfinden. Aus Sicht der psychometrischen Testkonstruktion handelt es sich hierbei um eine Art Inhaltsvalidierung, bei welcher nach der Definition von Wirtz (2014) in der Regel überprüft wird, in wie weit ein Messinstrument auch tatsächlich inhaltlich das misst, was es messen soll. Im vorliegenden Fall wird demnach vor der Konsensfindung durch das Expertisegremium zunächst durch die zwischengeschaltete zweite Befragungsrunde zur Bestätigung des Kategoriensystems überprüft, ob tatsächlich alle Aspekte des für Lehrkräfte relevanten inhaltlichen Fachwissens - und nur diese - in Runde 1 erfasst wurden. Die eingefügte Befragungsrunde 2 umfasst sowohl quantitative Elemente in Form geschlossener Bewertungsskizzen als auch qualitative Elemente zur offenen

Meinungsäußerung (siehe auch Kapitel 4.3.3). Nach der Auswertung von Runde 2 kann die inhaltlich validierte Strukturierung als Diskussionsgrundlage in die bereits beschriebene Befragungsrunde 3 zur Konsensfindung geben werden.

Insgesamt werden für das vorgestellte Forschungsvorhaben bis hierhin demnach drei Befragungsrunden mit folgenden Zwischenzielen konzipiert:

1. Strukturierung des Themenfelds
2. Inhaltsvalidierung der Strukturierung
3. Konsensfindung

Es ließe sich argumentieren, dass für die Phase der Konsensfindung idealerweise noch weitere Befragungsrunden angestrebt werden sollten, damit die Teilnehmenden eine Rückmeldung über den ersten Konsens erhalten können und durch weitere Befragungen eine möglichst hohe Konvergenz der Meinungen unter den Expertinnen und Experten erreicht wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird jedoch auf weitere Runden verzichtet, da einerseits der zeitliche Aufwand für die ausgesuchten Personengruppen des Gremiums (siehe unten) möglichst gering gehalten werden soll. Andererseits erhalten die Teilnehmenden durch die Rückmeldung nach Runde 2 - also die Diskussionsgrundlage für Runde 3 - bereits zumindest einmal die Möglichkeit zur Revidierung der eigenen Meinung bzw. zur Anpassung an die Ergebnisse des Gesamtgremiums.

4.1.2 Gewährleistung der Anonymität

Soll wie im vorliegenden Fall die Meinung einer bestimmten Personengruppe unter dem Aspekt der Konsensfindung erhoben werden, würde sich in erster Linie das Einberufen einer Expertisekonferenz anbieten, in welcher vor Ort alle beteiligten Personen an einem runden Tisch so lange über einen Sachverhalt diskutieren bis sich eine Mehrheitsmeinung herausgebildet hat. Eine Expertisekonferenz birgt jedoch Nachteile vor dem Hintergrund gewisser Gruppendynamikprozesse, wie beispielsweise die dominante Durchsetzung der eigenen Meinung von einzelnen Teilnehmenden, in sich (Balzer, 2005). Werden dagegen alle Expertinnen und Experten einzeln befragt und lediglich die Ergebnisse aller Befragungen anonymisiert an die Personen zurückgespiegelt, können negative Gruppendynamikprozesse verhindert werden.

Die Anonymität wird im vorgestellten Projekt in Anlehnung an das ursprüngliche Vorgehen in Delphi-Befragungen nach Dalkey und Helmer (1963) durch den Einsatz

von Fragebögen in jeder Runde sichergestellt. Innerhalb der Fragebögen erhalten die Teilnehmenden außer generalisierten Angaben zu demographischen Merkmalen des Gesamtremiums - wie z.B. welche Berufsgruppen teilnehmen - keine detaillierten personenbezogenen Informationen. Dadurch wird einerseits die Anerkennung der Expertise des Gesamtremiums durch die Teilnehmenden ermöglicht, andererseits befindet sich keine Person in einer Situation, in der sie das Gefühl hat, sich der Meinung anderer Personen über- oder unterordnen zu müssen. Die einzige - und auch gewünschte - Interaktion, welche indirekt unter den Teilnehmenden abläuft, findet durch das vermittelnde Forschungsteam statt, welches die Ergebnisse aller Einzelpersonen auswertet, zusammenfasst und generalisiert zurückspegelt.

Darüber hinaus ermöglicht es der Einsatz von Online-Fragebögen statt *Paper-Pencil*-Formate, auf ressourcensparende, unkomplizierte Weise Fachleute weltweit und zeitgleich zu befragen (siehe nächster Abschnitt).

4.1.3 Auswahl der Expertinnen und Experten

Wie für alle Expertisebefragungen ist auch bei der Delphi-Befragung die Auswahl der Befragungsteilnehmenden erfolgsentscheidend, denn, wie M. Häder und Häder (1994) treffend zusammenfassen, „...[beeinflusst] letztlich die Kompetenz der zu befragenden Experten die Qualität der Problemlösung wesentlich ...“(M. Häder & Häder, 1994, S. 16). Um demnach eine qualitativ hochwertige, angemessene Antwort auf die Delphi-Fragestellung zu finden, müssen diejenigen Personen bzw. Personengruppen gezielt zur Teilnahme ausgesucht werden, welche über das nötige Wissen bzw. über die nötige Erfahrung zur Diskussion der Fragestellung verfügen.

Wie bereits in Kapitel 1.4 dargelegt, handelt es sich bei der Fragestellung der vorliegenden Arbeit nach dem von Lehrkräften benötigten Fachwissen in der Teilchenphysik um ein sehr komplexes und weitestgehend unerforschtes Thema, welches sich zusätzlich am Schnittpunkt verschiedener Forschungsgebiete (u.a. Teilchenphysikforschung, Lehrkräftebildungs- bzw. Fachdidaktikforschung) und verschiedener Anwendungsgebiete (u.a. Schule) befindet. Aus diesem Grund gibt es keine einzelne prädestinierte Berufsgruppe, die sich als zur Beantwortung der Fragestellung vollständig qualifizierter Personenkreis zur Rekrutierung der Befragungsteilnehmenden heranziehen lässt. Vielmehr soll - wie in Methodik-Grundsatz 1 dargelegt - die gemeinschaftliche Expertise bzw. Sichtweise von Personen aller Berufsgruppen erhoben werden, welche sich beruflich - zumindest teilweise, wenn auch nicht hauptberuflich - damit auseinandersetzen, wie das Thema Teilchenphysik einem Schulniveau ange-

messen aufbereitet bzw. dargestellt werden kann. Hierbei ist das „Schulniveau“ sehr weit gefasst zu verstehen, da alle Personen als potenzielle Befragungsteilnehmenden betrachtet werden, die eine Form von teilchenphysikalischer Ausbildung erhalten haben und sich beruflich mit Schülerinnen und Schülern, mit Lehrkräften oder auch nur mit der interessierten Öffentlichkeit über teilchenphysikalische Themen austauschen. Konkret handelt es sich hierbei um folgende Berufsgruppen:

1. Wissenschaftliches Hochschulpersonal der Teilchenphysikforschung, welches sich auch in öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen wie öffentlichen Vorträgen, Führungen durch Forschungseinrichtungen oder Workshops für Lehrkräfte oder für Schülerinnen und Schüler engagiert
2. Wissenschaftliches Hochschulpersonal der Physikdidaktikforschung mit Kenntnissen in der Teilchenphysik
3. Mitarbeitende in der teilchenphysikbezogenen Öffentlichkeitsarbeit (engl. *outreach*)

Über die Auswahl der richtigen Personengruppen hinaus ist nach Balzer (2005) für eine Verwendbarkeit der Ergebnisse aus Delphi-Befragungen ein möglichst repräsentatives Meinungsbild durch die Gremiumsauswahl zu erzeugen. Hierfür soll „eine möglichst große Vielfalt an Meinungen und Erfahrungen [unter den Experten] angestrebt [werden]“ (Balzer, 2005, S. 91). Im vorgestellten Projekt kann eine Vielfalt dadurch geschaffen werden, dass unter den drei teilnehmenden Berufsgruppen zusätzlich noch jeweils verschiedene Untergruppen an Personen zur Befragung eingeladen werden. Die entsprechenden Untergruppen sind im Einzelnen:

1. Hochschulpersonal Teilchenphysikforschung: Professorenschaft, Dozierende, Forschungspersonal (auch Doktorierende)
2. Hochschulpersonal Physikdidaktik: Professorenschaft, akademisches Personal
3. Mitarbeitende in der Öffentlichkeitsarbeit: u.a. Beschäftigte in wissenschaftlichen Museen und im Wissenschaftsjournalismus

Unter den drei Berufsgruppen sollte idealerweise im Expertisegremium ein Gleichgewicht bestehen, um keiner Perspektive eine Vorzugsrolle zu geben. Es zeigt sich jedoch, dass die Population an Personen der ersten Berufsgruppe (Hochschulpersonal Teilchenphysikforschung) um ein Vielfaches größer ist als die Populationen der

anderen Gruppen. Um eine möglichst große Anzahl an Teilnehmenden zu gewinnen, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei der Bildung der Stichprobe der teilnahmebereiten Personen aus den Populationen ein Ungleichgewicht in Kauf genommen. Das Ungleichgewicht wird zu einem gewissen Grad dadurch ausgeglichen, dass in der Auswertung zur ersten Befragungsrunde der Meinung von Personen aus der zweiten und dritten Berufsgruppe ein größeres Gewicht gegeben sowie in der zweiten und dritten Befragungsrunde untersucht wird, ob sich Unterschiede in den Meinungen der Berufsgruppen zeigen (siehe Kapitel 5.1-5.3).

Eine weitere Grundsatzentscheidung zur Auswahl der Expertinnen und Experten betrifft ihre Nationalität. Sollten nur Personen aus Deutschland teilnehmen? Es ließe sich einerseits argumentieren, dass die Lehramtsausbildung mit der korrespondierenden Lehrkräftebildungsforschung sowie schulische Curricula insbesondere in Deutschland schon immer stark national geprägt waren. Demnach könnten nur Sachkundige für den deutschen Schulunterricht die nötige Expertise für die Delphi-Fragestellung nach dem von Lehrkräften benötigten Fachwissen aufbringen.

Andererseits bezieht sich die Delphi-Fragestellung lediglich auf die Wissensdomäne des Fachwissens und hierbei sogar nur auf die inhaltliche Teildimension, für welche die Schlüsselkonzepte der Teilchenphysik erhoben werden sollen. Wie in Kapitel 1.4 diskutiert, enthält das für Lehrkräfte relevante Fachwissen im Kern dieselben Schlüsselkonzepte, auf welchen auch die Fachsystematik der Teilchenphysikforschung basiert. Die Erkenntnisse der Teilchenphysikforschung sind wiederum in keiner Weise national geprägt, sondern ein Allgemeingut an Wissen und gleichzeitig zusammengetragen durch eine stark vernetzte, internationale Forschungsgemeinschaft. Es könnte daher angenommen werden, dass auch nicht-deutsche Personen aus den zuvor aufgeführten Berufsgruppen die nötige Expertise zur Beantwortung der Delphi-Fragestellung besitzen.

Da die Frage nach dem Einfluss der Nationalität äußerst interessant erscheint, wurden im vorgestellten Projekt sowohl deutsche als auch nicht-deutsche Personen zur Teilnahme an den Befragungen eingeladen. Etwaige von der Nationalität abhängige unterschiedliche Sichtweisen können dadurch insbesondere in der zweiten und in der dritten Befragungsrunde zur Konsensfindung über die wirklich wichtigen teilchenphysikalischen Schlüsselkonzepte durch einen Vergleich der Ergebnisse aufgedeckt und diskutiert werden (siehe Kapitel 5.2 und 5.3). Wie die entsprechenden internationalen Fachleute aus den vorgestellten Berufsgruppen für die Einladung zur Befragung ausfindig gemacht wurden, wird in Kapitel 4.4 erläutert.

Eine letzte - und für den Erfolg von Delphi-Befragungen fundamental wichtige - Bedingung für die Expertenauswahl liegt darin begründet, dass dieselben Personen in den unterschiedlichen Befragungsrunden teilnehmen. Vereinfacht ausgedrückt lässt sich der Kern der Delphi-Methode - die mehrmalige Revidierung der Meinung einzelner Personen zur Auffindung einer Gremiumsmeinung - nur erreichen, wenn dieselben Personen, bei denen eine Revidierung angebahnt werden soll, sich zuvor auch eine Erstmeinung gebildet haben.

Im Rahmen des vorgestellten Projekts wurde versucht, die Zusammensetzung des Expertisegremiums durch Einladung derselben Personen zu jeder Befragung konstant zu halten, was auch zu einem gewissen Maß gelungen ist (siehe Kapitel 4.4). In Anlehnung an M. Häder (2014) kann auch argumentiert werden, dass die Wahrung ähnlicher Quoten der teilnehmenden Personengruppen von entscheidender Bedeutung ist als die vollständig gleiche Zusammensetzung in den Delphi-Befragungen. Die Anteile der verschiedenen Berufsgruppen stellten sich im vorgestellten Projekt in den drei Befragungsrunden als sehr ähnlich dar. Eine Beschreibung der Zusammensetzung der Stichproben aus den Berufsgruppen sowie aus den verschiedenen Ländern wird gemeinsam mit weiteren Stichprobencharakteristika in Kapitel 4.4 gegeben.

Anhand der absoluten Teilnahmezahlen pro Runde - ebenfalls in Kapitel 4.4 abzulesen - ist schlussendlich festzustellen, dass insgesamt betrachtet eine große Anzahl an Expertinnen und Experten an den Befragungen teilgenommen hat. Die große Anzahl erscheint vor allem daher bedeutend, da die anvisierten Berufsgruppen wie beispielsweise die Professorenschaft häufig beruflich stark eingebunden sind.

4.1.3.1 Lehrkräfte als Expertinnen und Experten

Es bleibt eine letzte Personengruppe zu nennen, welche bei der bisherigen Auswahl nicht berücksichtigt wurde, jedoch ebenfalls Expertise in Bezug auf das zum Unterrichten teilchenphysikalischer Themen benötigte Fachwissen besitzt: Die Lehrkräfte selbst. Im Rahmen des vorgestellten Projekts werden Lehrkräfte, die bereits Erfahrung im Unterrichten teilchenphysikalischer Themen besitzen, als die Expertinnen und Experten aus der Praxis aufgefasst und in die Delphi-Befragung integriert. Die Lehrkräfte nehmen hierbei jedoch eine Sonderrolle ein, in welcher sie ausschließlich die von den anderen Berufsgruppen zusammengestellten Ergebnisse - die potenziell für das Fachwissen wichtigen Themen - nach Befragungsrunde 2 in Bezug auf die Relevanz für das Fachwissen bewerten. Für die beiden anderen Phasen der Delphi-

Befragung (Strukturierung des Themenfelds und Inhaltsvalidierung der Strukturierung) könnte sich eine Befragung von Lehrkräften als nicht zielführend herausstellen, da hier vorrangig die Fachstruktur analysiert wird und den anderen Berufsgruppen aufgrund ihrer Ausbildung eine höhere Kompetenz, die reine Fachsystematik betreffend, zugesprochen wird.

Bei der Lehrkräftebefragung zur Bewertung der von den anderen Berufsgruppen zusammengestellten Ergebnisse in Bezug auf Relevanz für das Fachwissen, handelt es sich um eine Art weitere inhaltliche Validitätsprüfung, bei der bestätigt werden soll, ob und in wie weit die Meinung der schulfernen Berufsgruppen auch tatsächlich aus Praxissicht Bestand hat. Es wird somit eine sehr stark professionsorientierte Perspektive eingenommen, was dem in Kapitel 1 erarbeiteten Forschungsfokus auf dem *professionsorientierten Fachwissen* in der vorliegenden Arbeit gerecht wird.

Die Befragung der Lehrkräfte wird parallel zur Befragungsrunde 3 der anderen Gruppen mithilfe eines ähnlich konstruierten quantitativ ausgelegten Befragungsinstruments mit eingesetzten Items zur Relevanzeinschätzung - ebenfalls in Form eines Onlinefragebogens - durchgeführt (siehe Kapitel 4.3.4). Die Ergebnisse der Lehrkräftebefragung werden in Kapitel 5.3 analysiert und mit denjenigen aus Befragungsrunde 3 der anderen Expertisegruppen zur Konsensfindung verglichen.

4.2 Das Forschungsdesign im Überblick

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten allgemeine Überlegungen zur Auswahl hinsichtlich der Delphi-Methodik und der Befragungsteilnehmenden diskutiert wurden, widmet sich der folgende Abschnitt der Beschreibung des konkret ausgearbeiteten Gesamtforschungsdesigns des vorgestellten Projekts, welches zur Übersicht in Abbildung 4.1 graphisch dargestellt ist.

Das Forschungsdesign wurde entlang der drei in Abschnitt 4.1.1 definierten Phasen des ausgewählten Typs von Delphi-Befragung entwickelt: 1) Strukturierung des Themenfelds, 2) Inhaltsvalidierung der Strukturierung, 3) Konsensfindung. Jede Phase umfasst hierbei genau eine Befragungsrunde des Expertisegremiums. Während der zeitliche Verlauf der Befragungsrunden - unterbrochen von Auswertezeiträumen - in Abbildung 4.1a skizziert wurde, zeigt Abbildung 4.1b parallel dazu den aktuellen Status des zu modellierenden Fachwissens in jeder Phase. Die Ergebnisse zur Fachwissensmodellierung einer bestimmten Phase dienen hierbei immer als Evaluationsgrundlage in der nächsten Phase. Die Expertinnen und Experten erhal-

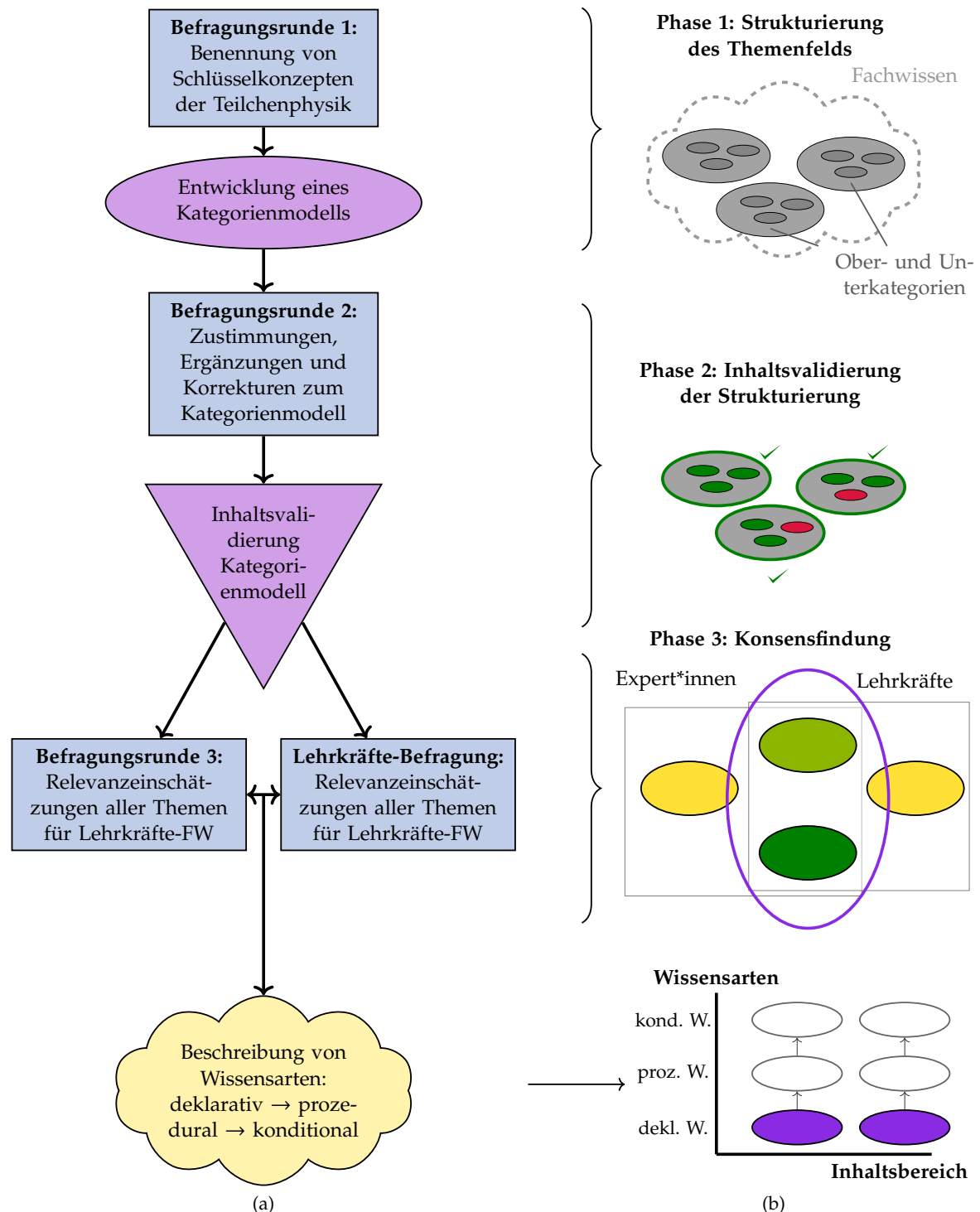


Abbildung 4.1: Das Forschungsdesign im Überblick mit zeitlichem Verlauf von oben nach unten: a) Befragungsrunden (blau), Auswerteabschnitte (violett) und theoriegeleitete Modellierung von Wissensarten (gelb), b) Status des modellierten Fachwissens (FW) in den drei Phasen (siehe Beschreibung im Fließtext)

ten somit durch die Ergebnisse aus der vorherigen Befragungsrunde jeweils die für Delphi-Befragungen so zentrale Rückmeldung, welche eine Anpassung bzw. Revidierung der eigenen Meinung in der aktuellen Runde auslösen soll.

Nachfolgend werden die Forschungszwischenziele, die eingesetzte Befragungsmethodik sowie der jeweilige Stand der Fachwissensmodellierung entlang der Abbildungen überblickartig und getrennt für die Phasen erläutert. Eine ausführliche Darstellung der konkret eingesetzten Fragebögen in jeder Befragungsrunde findet sich daran anschließend in Abschnitt 4.3 und eine Beschreibung der Analysestrategien in Kapitel 5. Die nachstehend vorgestellten Forschungszwischenziele der Phasen wurden auf Basis derjenigen Ziele entwickelt, die sich allgemein mit den entsprechenden Phasen in einer Delphi-Befragung erreichen lassen (siehe Abschnitt 4.1) und werden nachfolgend jeweils nochmals in Bezug zu den übergreifenden Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit gesetzt (siehe Kapitel 3).

Vor einer Beschreibung der ersten Delphi-Phase zur Strukturierung des Themenfelds „relevantes Fachwissen der Teilchenphysik“ sei noch einmal darauf verwiesen, dass die Inhalte des potenziell für Lehrkräfte relevanten Fachwissens zum Zeitpunkt vor der ersten Delphi-Befragung nicht gänzlich unbekannt waren. Die in der Befragung zu nennenden Inhalte speisen sich aus den Schlüsselkonzepten der fachwissenschaftlichen Domäne der Teilchenphysik. Durch die in Kapitel 2 dargestellte Analyse fachwissenschaftlicher Literatur konnten bereits in einem ersten Entwurf Schlüsselkonzepte bzw. *Big Ideas* der Teilchenphysik durch das Auffinden wiederkehrender Themen zusammengestellt werden. Die Zusammenstellung lässt sich im nachfolgend diskutierten Verlauf der Fachwissensmodellierung als eine erste Form von Vorstrukturierung auffassen. Durch die Vorstrukturierung kann den in Befragungsrunde 1 teilnehmenden Expertinnen und Experten eine Idee zu Umfang und Komplexität der Themen gegeben werden, welche sie zu benennen gebeten werden.

Phase 1: Strukturierung des Themenfelds

Forschungszwischenziel der ersten Phase der Delphi-Befragung ist die Strukturierung des von Lehrkräften benötigten inhaltlichen Fachwissens in der Teilchenphysik. Wie in Abbildung 4.1b ganz oben veranschaulicht, sollen zur Strukturierung innerhalb des diffusen, weitestgehend unbekannten Konstrukts des teilchenphysikalischen Fachwissens Themen und Unterthemen (später auch als Kategorien und Unterkategorien bezeichnet) identifiziert werden, die potenziell für das Fachwissen von Lehrkräften relevant sind.

Durch die Auswahl der Themen kann in einem ersten Schritt zur Beantwortung von Forschungsfrage **F1** die Fachwissensdimension *Inhaltsbereich* **strukturiert** werden. Darüber hinaus ermöglicht die Auswahl ebenfalls eine erste **Einschränkung** der Themen innerhalb des Inhaltsbereichs sowie - durch die Identifikation von Untertemen - eine erste **präzisere Beschreibung** der identifizierten Themen.

Die dem Forschungsziel von Phase 1 zugeordnete Leitfrage, welche durch eine erste Befragung des Expertisegremiums beantwortet werden soll, lautet demnach:

Leitfrage 1 (L1): Welche Themen sind als fundamental wichtige Schlüsselkonzepte der Teilchenphysik potenziell relevant für das Fachwissen von Lehrkräften, die Teilchenphysik unterrichten?

Zur Beantwortung von **L1** wird sowohl eine erste Befragungsrunde des Expertisegremiums als auch ein dazugehöriger Zeitabschnitt zur Auswertung der Befragung durch das Forschungsteam - dargestellt durch die obersten beiden Elemente in Abbildung 4.1a - durchgeführt.

Die potenziell relevanten Themen werden - wie in Kapitel 4.1 dargelegt - mithilfe von qualitativer Befragungsmethodik offen erhoben und zwar ohne vorgegebene Auswahloptionen. Das für die Erhebung bei den Expertinnen und Experten entsprechend verwendete offene Befragungssitem im Online-Fragebogen zu Runde 1 wird in Abschnitt 4.3.2 vorgestellt. Die angestrebte Strukturierung des Themenfelds durch Identifikation von Themen- und Untertemen wird im Auswerteabschnitt nach Befragungsrunde 1 mithilfe einer Qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) durch die induktive Zusammenfassung der von den Teilnehmenden genannten Themen zu Wissenskategorien und -unterkategorien sowie dem Abgleich der Kategorien mit universitärer Standardliteratur erreicht (siehe Auswertung im Kapitel 5.1). Neben der reinen Aufstellung von Titeln für Kategorien und Unterkategorien können in der Qualitativen Inhaltsanalyse ebenfalls aus den offenen Antworten der Teilnehmenden noch einmal vertiefte Kurzbeschreibungen bzw. Definitionen herausgearbeitet werden, die ihrerseits Auskunft darüber geben, welche Inhalte die Unterkategorien jeweils umfassen. Um ein möglichst einfaches, übersichtliches Modell als Evaluationsgrundlage in die zweite Befragungsrunde geben zu können, wurde im Auswerteabschnitt zu Befragungsrunde 1 das konstruierte Kategorienmodell derart auf wenige Unterkategorien reduziert, dass Einzelmeinungen weniger Bedeutung und die Meinung von Personen der Berufsgruppen 2 und 3 - siehe Abschnitt 4.1.3 - mehr Gewicht erhielten (siehe Reduktionsvorgehen in Kapitel 5.1).

Phase 2: Inhaltsvalidierung der Strukturierung

Als Ziel der zweiten Phase im gewählten Forschungsdesign kann die Inhaltsvalidierung des in Phase 1 etablierten Kategoriensystems zur Modellierung des Fachwissens festgehalten werden. Wie bereits in Abschnitt 4.1.1 erläutert, dient die Inhaltsvalidierung zur Überprüfung der Frage, ob alle für das Fachwissen von Lehrkräften relevanten Aspekte durch die konstruierten Wissenskategorien und -unterkategorien abgedeckt wurden und das System darüber hinaus keine weiteren irrelevanten Themen beinhaltet. Für die zweite Phase im Verlauf der Fachwissensmodellierung wird die erfolgreiche Validierung bzw. Bestätigung von Kategorien in Abbildung 4.1b durch grün hinterlegte Ellipsen und die nicht erfolgreiche Validierung bzw. Ablehnung einzelner Kategorien durch rot hinterlegte Ellipsen dargestellt.

In Bezug zu Forschungsfrage F1 in Kapitel 3 liegt der Fokus in der zweiten Phase damit weiterhin auf der **Strukturierung** des Fachwissens. Des Weiteren kann durch die Bewertung des Kategoriensystems und der Kategorienbeschreibungen durch die Expertinnen und Experten (siehe unten) ebenfalls eine Verbesserung bezüglich der **präzisen Beschreibung** von relevanten fachwissenschaftlichen Themen erreicht werden.

Für Phase 2 leitet sich somit aus der angestrebten Inhaltsvalidierung folgende forschungsbezogene Leitfrage ab:

Leitfrage 2 (L2): Erfasst das in Phase 1 der Delphi-Befragung konstruierte System aus Wissenskategorien und -unterkategorien das zu modellierende Fachwissen in allen Aspekten und nur in diesen?

Zur Beantwortung von L2 wird eine zweite Befragungsrunde des Expertisegremiums sowie eine entsprechende Auswertung der Befragungsergebnisse durchgeführt, was als drittes und viertes Element in dem in Abbildung 4.1a skizzierten Befragungsverlauf dargestellt ist. Wie in Abschnitt 4.1.1 erläutert, wird für Befragungsrunde 2 eine Kombination aus qualitativer und quantitativer Erhebungsmethodik eingesetzt. Die Kombination erscheint für den Zweck der Inhaltsvalidierung geeignet, um einerseits den Grad der Zustimmung des Gremiums zum Kategoriensystem zu quantifizieren und andererseits offen gegenüber neuen Erweiterungsvorschlägen zu bleiben. Konkret erhalten die teilnehmenden Personen in Befragungsrunde 2 zunächst das in Phase 1 konstruierte Kategorienmodell einschließlich der erarbeiteten Beschreibungen aller Unterkategorien. Mithilfe von geschlossenen Bewertungsskizzen wird das Gremium anschließend um eine Einschätzung darüber gebeten, wie gut bzw. wie

vollständig die dargestellten Kategorien das von Lehrkräften benötigte Fachwissen abbilden. Schließlich sollen im Rahmen offener Texteingabefelder Vorschläge zur Korrektur bzw. zur Ergänzung des Kategorienmodells gegeben werden. Die detaillierte Konstruktion des Befragungsinstruments von Runde 2 wird in Abschnitt 4.3.3 beschrieben.

Auswertungskapitel 5.2.1 gibt einen Einblick dazu, wie die Daten aus dem geschlossenen Bewertungssystem anhand ihrer deskriptiven Kennwerte sowie mithilfe eines bestimmten statistischen Testverfahrens dahingehend untersucht werden können, ob das Expertisegremium dem vorgeschlagenen Kategorienmodell im Allgemeinen zustimmt und damit den ersten Modellentwurf des Fachwissens inhaltlich validiert. Um zusätzlich eine weitere Optimierung des Modells zu erreichen, werden die offenen Korrektur- und Ergänzungsvorschläge anschließend in Kapitel 5.2.2 mithilfe einer sogenannten inhaltlich-strukturierenden Qualitativen Inhaltsanalyse (Kuckartz, 2016) gebündelt und häufig genannte Veränderungsvorschläge auf das bestehende Kategoriensystem angewandt. Das optimierte System bildet die Evaluationsgrundlage zur nachfolgend beschriebenen dritten Phase der Delphi-Befragung.

Phase 3: Konsensfindung

Als übergreifendes Ziel der dritten Phase im gewählten Delphi-Forschungsdesign wird ein gemeinsamer Konsens des bisher befragten Expertisegremiums sowie zusätzlich von Lehrkräften darüber angestrebt, welche der Themen aus dem in Phase 2 etablierten Kategorienmodell besonders relevant für das Fachwissen von Lehrkräften sind. Da bislang alle erarbeiteten Themen lediglich als „potenziell relevant“ aufgefasst wurden, dient die dritte Phase einer konkreten Festlegung der relevanten sowie der eventuell weniger relevanten Themen. Bezüglich der in der Einleitung der vorliegenden Arbeit dargelegten Motivation für das Forschungsprojekt ist Phase 3 somit von entscheidender Bedeutung, um Empfehlungen darüber aussprechen zu können, welche Themen in einer zu konstruierenden Lehrkräftefort- oder -ausbildungsmaßnahme von größerer Bedeutung sind als andere.

Die relevanteren Themen bilden des Weiteren in Bezug zu Forschungsfrage F1 die finalen Subfacetten der Fachwissensdimension *Inhaltsbereich*, deren Modellierung das Hauptanliegen des vorgestellten Projekts ist. Die Relevanz der Themen - wie sie durch Fachleute und Lehrkräfte in Befragungsrunde 3 eingeschätzt werden (siehe Abschnitt 4.3.4) - ist in Abbildung 4.1b durch eine entsprechende Farbkodierung der Ellipsen von gelb (weniger relevant) bis dunkelgrün (sehr relevant) symbolisiert.

Die erste Leitfrage, welche nach vorherigen Überlegungen im Rahmen der dritten Phase des Forschungsdesigns beantwortet werden soll, lautet:

Leitfrage 3a (L3a): Welche der in Phase 2 der Delphi-Befragung inhaltlich validierten Wissenskategorien sind besonders relevant für das Fachwissen von Lehrkräften?

Während **L3a** getrennt sowohl in Bezug auf die Einschätzungen des bisher befragten Expertisegremiums als auch in Bezug auf die Einschätzung der Lehrkräfte interessant erscheint und untersucht werden soll, wurde in Abschnitt 4.1.3.1 bereits die Bedeutung der Meinung der Unterrichtenden selbst für eine Validierung der Ergebnisse aus Praxissicht hervorgehoben. Daher sollen in folgender zweiter Leitfrage der dritten Phase explizit Unterschiede in den Relevanzeinschätzungen des bisherigen Gremiums und der Lehrkräfte analysiert werden:

Leitfrage 3b (L3b): Welche der vom Expertisegremium als besonders relevant eingeschätzten Themen können durch eine ähnliche Einschätzung der Lehrkräfte aus Praxissicht validiert werden?

Zur Beantwortung der Leitfragen **L3a** und **L3b** werden zwei parallel durchgeführte Befragungen von Expertinnen und Experten sowie von Lehrkräften - wiederum unter Einsatz von Online-Fragebögen - durchgeführt. Die Befragungen sind als unterste blau unterlegte Elemente in Abbildung 4.1a dargestellt.

Methodisch werden in beiden Befragungen geschlossene Bewertungsskizzen zur Einschätzung aller Unterkategorien aus Phase 2 in Bezug auf ihre Relevanz für das von Lehrkräften benötigte Fachwissen eingesetzt (siehe Erhebungsinstrumente in Abschnitt 4.3.4). Durch die Einschätzung aller Themen durch alle Teilnehmenden kann für die Auswertung der Befragungen in Phase 3 ein Umfang erhobener Daten erreicht werden, welcher im Gegensatz zu den bisherigen Phasen den Einsatz interferenzstatistischer Analyseverfahren zur Auffindung statistisch signifikanter Unterschiede in den Relevanzeinschätzungen zwischen verschiedenen Themen erlaubt. Wie in Kapitel 5.3 ausführlich beschrieben, werden hierbei verschiedene Varianzanalysen durchgeführt, um zunächst Gruppen von Themen mit unterschiedlicher Relevanz zu identifizieren und daran anschließend etwaige Unterschiede in den Relevanzgruppen zwischen Expertinnen und Experten einerseits und Lehrkräften andererseits aufzudecken.

Beschreibung von Wissensarten

Die drei bis hierhin beschriebenen Befragungsrunden dienten der Beantwortung von Forschungsfrage **F1**, welche sich als Hauptanliegen der vorgestellten Arbeit mit der Modellierung von Subfacetten in der Fachwissensdimension *Inhaltsbereich* befasst. Wie in der Einleitung zu Kapitel 4 dargelegt, findet die Modellierung der Dimension *Wissensarten* erst nach der Erhebung und auf Basis der endgültigen Ergebnisse für die Modellierung des *Inhaltsbereichs* statt. In Bezug zu Forschungsfrage **F2** soll hierfür untersucht werden, wie die etablierten inhaltlichen Subfacetten für die verschiedenen Wissensarten des deklarativen, prozeduralen und konditionalen Wissens aussehen könnten. Alle drei Wissensarten, jedoch insbesondere prozedurales und konditionales Wissen, werden - wie in Kapitel 1.3.2 erläutert - von Lehrkräften für die Planung, Durchführung und Reflexion von Unterricht benötigt.

Die Beschreibungen der inhaltlichen Themen in den verschiedenen Wissensarten werden im gewählten Forschungsdesign theoriegeleitet im Anschluss an die dritte Befragungsrunde erarbeitet (siehe Abbildung 4.1a ganz unten). Als Grundlage für die Erarbeitung dienen die während der bisherigen Befragungen zusammengestellten Inhaltsbeschreibungen von denjenigen teilchenphysikalischen Themen, die in der letzten Befragungsrunde von Expertinnen und Experten sowie von Lehrkräften als besonders relevant eingeschätzt wurden. Wie in Kapitel 3 erklärt, können diese Beschreibungen bereits mehr oder weniger als das deklarative Wissen aufgefasst werden, das Lehrkräfte besitzen sollten.

Wie in Abbildung 4.1b ganz unten im Verlauf der Fachwissensmodellierung dargestellt, kann ein Vorschlag für das Aussehen des prozeduralen und konditionalen Wissens zu den relevantesten Themen (weiß unterlegte Ellipsen) durch eine Überarbeitung der deklarativen Beschreibungen (violett unterlegte Ellipsen) entworfen werden. Für die Umwandlung der Beschreibungen des deklarativen Wissens in die anderen Wissensarten werden die in Kapitel 1.3.2 diskutierten Definitionen der Wissensarten verwendet. Für das prozedurale Wissen wird hierbei zunächst nach deklarativen Wissensanteilen gesucht, die eng mit Elementen des Handelns im Rahmen von Methoden der Erkenntnisgewinnung verbunden sind. Für das konditionale Wissen wird reflektiert, welches Wissen über Begründungen und Beurteilungen die Handlungen im prozeduralen Wissen benötigen, um angemessen durchgeführt werden zu können. Details der auf diese Weise theoriegeleiteten Beschreibung der verschiedenen Wissensarten werden nach der Auswertung der letzten Befragungsrunde in Kapitel 5.4 erläutert.

Durch die Modellierung von Wissensarten zusätzlich zum Inhaltsbereich des Fachwissens können beispielsweise für die inhaltliche Konzeption zukünftiger Lehrkräftebildungsmaßnahmen unterrichtsbezogenere Empfehlungen gegeben werden, als es auf Basis rein deklarativer Wissensbeschreibungen möglich wäre (siehe Empfehlungen in Kapitel 5.4.4.1).

4.3 Konstruktion der Erhebungsinstrumente

Bevor die Erhebungsinstrumente der Befragungsrunden im Detail vorgestellt werden, widmet sich der folgende Abschnitt dem Programm *SoSci Survey* (Leiner, 2019). Das Programm spielt in der empirischen Umsetzung der vorgestellten Delphi-Studie eine zentrale Rolle, da sowohl die Erstellung aller Online-Fragebögen im vorgestellten Projekt als auch die Bearbeitung der Fragebögen durch die Teilnehmenden sowie schließlich das Management der erhobenen Daten mithilfe des Programms umgesetzt wurden. Die Wahl für den Einsatz von Online-Fragebögen statt *Paper-Pencil*-Formate in den Befragungsrunden wurde in Abschnitt 4.1.2 begründet.

4.3.1 Das Programm *SoSci Survey*

SoSci Survey (Leiner, 2019) ist ein web-basiertes Programm zur Erstellung und Durchführung von Online-Umfragen, welches für den nicht-kommerziellen Forschungseinsatz gebührenfrei zugänglich ist. Unter verschiedenen Programmen und Lösungen wurde *SoSci Survey* für die empirischen Datenerhebungen im vorgestellten Projekt ausgewählt, da das Programm eine Vielzahl von Vorteilen sowohl bei der Konstruktion der Fragebögen als auch bei der Durchführung der Befragungen selbst bietet, durch welche die projektspezifischen Anforderungen erfüllt werden können. Die verschiedenen Vorteile werden nachfolgend in Kürze mit Bezug zu den Anforderungen des Projekts beschrieben.

Die Basis der Fragebogenkonstruktion bei *SoSci Survey* bildet eine Sammlung vordefinierter Frageformate und Fragebogenlayouts, die vom Umfragerstellenden beliebig zu einem Befragungsinstrument zusammengestellt werden können. Zusätzlich bietet das Programm die Möglichkeit, durch eigene Programmierungen mit PHP bzw. mit HTML das Sortiment an Fragen zu erweitern und so individuell optimale Fragebögen mit flexibler Fragebogenführung zu erstellen. In den nachfolgend vorgestellten Fragebögen wurde solch eine Zusatzprogrammierung vorgenommen, um vorrangig umfangreiche Ergebnisse aus jeweils vorangegangenen Befragungsrunden

als Bewertungsgrundlage in der aktuellen Runde ansprechend und übersichtlich darzustellen. Des Weiteren konnten durch die Programmierung flexible Filterfunktionen eingebaut werden, die ein Überspringen redundanter Fragebogenitems ermöglichen. Auf diese Weise wird die zeitliche Belastung für die Teilnehmenden beim Ausfüllen des Fragebogens verringert, was zu einer geringeren *Dropout*-Rate führen sollte. Schließlich wurde eine Zusatzprogrammierung in Befragungsrunde 2 eingesetzt, um den Teilnehmenden randomisiert nur eine Teilauswahl aller Items zuzuweisen und so ebenfalls ihre zeitliche Belastung zu verringern (siehe Abschnitt 4.3.3).

Einen weiteren Vorteil der Fragebogenerstellung in *SoSci Survey* stellt die einfache parallele Gestaltung von Fragebögen in verschiedenen Sprachen dar. Alle Fragebögen im vorgestellten Projekt wurden bilingual sowohl in Deutsch als auch in Englisch konstruiert, um sowohl deutschsprachigen als auch nicht-deutschsprachigen Personen die Teilnahme zu ermöglichen. In der nachfolgenden Arbeit wird ausschließlich die deutsche Version diskutiert, welche inhaltlich jedoch genau der englischen Version entspricht.

Bei der Durchführung der Befragungen selbst bietet *SoSci Survey* ebenfalls verschiedene nützliche Aspekte. Zunächst müssen potenzielle Teilnehmende kein Programm herunterladen und installieren, da der Zugang zum Fragebogen über einen Internetbrowser durch Aufrufen der Seite www.soscisurvey.de ermöglicht wird. Durch die Vermeidung der Notwendigkeit zur Installation eines Programms auf dem eigenen Computer kann im vorgestellten Projekt eine weitere potenzielle Teilnahmehürde beseitigt werden. *SoSci Survey* bietet außerdem programmintern die Einladung von Teilnehmenden zur Studie via E-Mail-Versand sowie eine nachverfolgbare Erinnerungsfunktion zur Teilnahme, ebenfalls via E-Mail-Versand, an. Hierbei wird für jede Teilnehmerin und jeden Teilnehmer vom Programm selbst ein personalisierter Teilnahmelink erzeugt, durch welchen sichergestellt wird, dass nur eingeladene Personen den Fragebogen ausfüllen können und insgesamt auch nur ein einziges Mal. Dabei wird ein sogenannter Seriencode für jede Person erzeugt, welcher den im Fragebogen für diese Person erhobenen Daten zugeordnet wird. Der Seriencode erlaubt es in Folgebefragungen, wiederholte Teilnahmen der gleichen Personen nachzuverfolgen, ohne die Anonymität der Teilnehmenden zu gefährden, da personenbezogene Daten wie z.B. E-Mail-Adressen getrennt von den im Fragebogen erhobenen Daten gespeichert werden. Für die Durchführung der Befragungen im vorgestellten Projekt wurde das erläuterte Vorgehen zur Einladung der Teilnehmenden via E-Mail-Versand und SerienCodes gewählt, da zur Delphi-Befragung ausschließlich zuvor definierte Personen bzw. Personengruppen eingeladen werden sollten, von

welchen die E-Mail-Adressen bekannt bzw. öffentlich zugänglich waren. Die betreffenden Personengruppen wurden bereits in Kapitel 4.1.3 beschrieben. Auf welche Weise konkret Mitglieder aus den Personengruppen für die Einladung zur Teilnahme ausgewählt wurden, wird in Kapitel 4.4 erläutert.

Zum Abschluss der Programmvorstellung sollte noch festgehalten werden, dass *SoSci Survey* eine Reihe von Vorteilen in Bezug auf das Management und den Schutz von Daten bietet, welche den Standards für ein wissenschaftliches Umfrageprojekt in Deutschland entsprechen. Zunächst unterliegt jegliche Datenübertragung innerhalb der Programm-*Cloud* einer SSL-Verschlüsselung. Darüber hinaus befinden sich der Server für die Befragungen sowie der Betreiber des Servers in Deutschland und schließlich entsprechen die Konzepte von *SoSci Survey* zur Speicherung und Löschung von Daten der europäischen Datenschutzgrundverordnung DSGVO (Europäische Union, 2016).

4.3.2 Befragungsrunde 1: Strukturierung des Themenfelds

Im Folgenden wird Online-Fragebogen 1 vorgestellt, welcher in Befragungsrunde 1 des in Abschnitt 4.2 diskutierten Forschungsdesigns zur Delphi-Befragung des Expertisegremiums eingesetzt wurde.

Nach einleitenden Informationen zu Zielen und Einbettung des Forschungsprojekts besteht Online-Fragebogen 1 aus einem Frageblock zu demographisch relevanten Eckdaten der teilnehmenden Expertinnen und Experten sowie aus einem Frageblock zum Hauptforschungsanliegen von Phase 1 der Delphi-Befragung: Die Strukturierung des von Lehrkräften benötigten Fachwissens in der Teilchenphysik.

Den Frageblock zum Hauptforschungsanliegen betreffend, wurde bereits im vorangegangenen Kapitel aus dem Forschungszwischenziel von Phase 1 die Leitfrage **L1** abgeleitet, welche durch Befragungsrunde 1 beantwortet werden soll. In **L1** wird nach den fundamental wichtigen Schlüsselkonzepten der Teilchenphysik gefragt, welche potenziell für das Lehrkräftefachwissen relevant sind. Für die Operationalisierung im Fragebogen wurde **L1** mit zwei kleinen Abwandlungen in der Formulierung (siehe unten) direkt an die Expertinnen und Experten im Online-Fragebogen weitergegeben. Hierfür wurde das in Abbildung 4.2 dargestellte Item vom Typ „offene Nennungen“ eingesetzt (Item mit der Fragebogennummer 4), wobei für jede Nennung ein leeres Textfeld zur freien Eingabe zur Verfügung stand und die Anzahl an Nennungen - anders als in der Abbildung gezeigt - insgesamt nicht begrenzt war.

TP im Schulkontext

Erkenntnisse der (Astro-) Teilchenphysik

Beispiele:

- Aufbau der Materie
- Fundamentale WW
- Symmetrien und Erhaltungssätze
- Ladungen, Quantenzahlen
- Elementarteilchen
- Zusammengesetzte Teilchen
- Feynmandiagramme
- Standardmodell
- Higgs-Mechanismus
- Supersymmetrie
- Stringtheorie
- Dunkle Materie und Energie
- Baryonenasymmetrie
- Weitere offene Fragen: BSM (Hierarchieproblem, Vereinigung der Wechselwirkungen, Neutrinoszillation.....)
-

Experimentelle Forschungsmethoden

Beispiele:

- natürliche Teilchenquellen
- Teilchenerzeugung und -beschleunigung
- Kreis- und Linearbeschleuniger
- WW Teilchen mit Materie
- Detektorentwicklung
- Aufbau und Funktionsweise der „großen“ historischen Beschleuniger und Detektoren
- Elektronik- und Chipentwicklung
- Statistische Betrachtungen, Analyseverfahren
- Machine Learning/ Knowledge Discovery in Data Bases

Anwendungen, Spin-Offs

Beispiele:

- neue Supraleiter
- Driftkammern
- Bildgebende Systeme in der Medizin
- Hadronentherapie
- www
- GRID-/Cloud-Computing
-

4. Was sind Ihrer Meinung nach die ZENTRALEN Themen (Erkenntnisse, Sachverhalte, Kernaussagen und Errungenschaften) der (Astro-) Teilchenphysik, welche Sie als fundamental für den Schulunterricht ansehen?

Bitte formulieren Sie Ihre Angaben so übersichtlich wie möglich und so präzise wie nötig.

01 _____

02 _____

03 _____

04 _____

05 _____

Abbildung 4.2: Auszug aus Online-Fragebogen 1

Für die Abwandlung von L1 zur Fragestellung in Item 4 wurde einerseits der Begriff „Schlüsselkonzepte“ durch „Themen“ ersetzt, um etwaige Begriffsambiguitäten zu vermeiden, die durch Uneinigkeit verschiedener Berufsgruppen über die Definition eines Schlüsselkonzepts entstehen könnten. Stattdessen wurden in der Fragestellung verschiedene Alternativbegriffe als Beispiele dafür gegeben, welcher Art die zu nennenden Themen sein könnten („Erkenntnisse, Sachverhalte, ...“).

Andererseits wurde in der Fragestellung zu Item 4 nicht explizit nach den für das Lehrkräftewissen, sondern nach den für den Schulunterricht relevanten Themen gefragt. Grund für die Veränderung stellt die Annahme dar, dass sich Angehörige der Fachwissenschaft eventuell kompetenter in der Einschätzung der Unterrichtsrelevanz fühlen, da sie selbst bereits Unterricht besucht und eventuell gehalten haben. Dagegen haben sich viele Fachforschende vermutlich noch nicht explizit mit der Lehrkräftebildungsforschung auseinandergesetzt. Aus Forschungssicht beeinflusst

1. Geben Sie bitte Ihre aktuelle Berufsbezeichnung an.
Falls Sie im Ruhestand oder derzeit nicht arbeitstätig sind, geben Sie bitte den Titel Ihrer letzten Stelle an.

2. Benennen Sie bitte KURZ die Hauptarbeitsfelder Ihrer aktuellen Tätigkeit.
z.B. (Hoch-)Schullehre, Forschung, Verwaltungsaufgaben, Leitung einer Arbeitsgruppe, Organisation öffentlichkeitswirksamer Veranstaltungen, Outreach bzw. Wissenschaftskommunikation, ...

01
02
03

3. Schätzen Sie bitte ein, zu welchem Anteil Ihrer Arbeitszeit Sie sich aktuell im Bereich der außeruniversitären Wissenschaftsvermittlung rund um die Teilchenphysik beschäftigen.
Hierzu zählen z.B. Organisation u. Teilnahme an Ausstellungen, Laborführungen, jegliche Kooperation mit Schulen, Lehrerfortbildungen, öffentliche Vorträge oder andere Arten von öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen.

selten (< 25%) gelegentlich (25 -50%) oft (50-75%) (Fast) ausschließlich (>75%)

Abbildung 4.3: Auszug aus Online-Fragebogen 1

die Veränderung der Fragestellung die Verwendung der zu erwartenden Nennungen der Gremiumsmitglieder nicht, da zum Stand der Fachwissensmodellierung in Phase 1 zunächst nur teilchenphysikalische Themen identifiziert werden sollen und keine Aussagen darüber getroffen werden, welchen Umfang bzw. welche Tiefe die Themen speziell im Kontext von Lehrkräftewissen besitzen sollen.

Um den Teilnehmenden eine zusätzliche Hilfestellung dahingehend zu geben, welcher Art und welcher Komplexität die zu nennenden Themen sein könnten, wurde im Online-Fragebogen vor Item 4 eine Übersicht der in der Lehrbuchanalyse erarbeiteten potenziellen Schlüsselkonzepte (siehe Kapitel 2) als Anhaltspunkt zur Verfügung gestellt. Die Übersicht ist ebenfalls in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Auswertung der erhobenen Daten zu Item 4 wird in Kapitel 5.1 beschrieben.

Der Frageblock zu den demographischen Eckdaten im Online-Fragebogen 1 enthält insgesamt drei Items, welche in Abbildung 4.3 dargestellt sind (Fragebogennummern 1-3). In Item 1 wurde als Fragetyp „Offene Texteingabe“ das in Kapitel 4.1.3 erläuterte Forschungsinteresse darüber operationalisiert, welche beruflichen Hintergründe die teilnehmenden Personen besitzen. Da beispielsweise unter der möglichen Nennung „Wissenschaftlicher Mitarbeiter“ sehr verschiedene Forschungsbereiche und Aufgabenfelder zu verstehen sind, wurde zusätzlich in Item 2 im Frageformat

„Offene Nennungen“ nach den Hauptarbeitsfeldern der Teilnehmenden gefragt, um ein detaillierteres Berufsbild einzelner Personen zeichnen zu können.

Wie ebenfalls in Abschnitt 4.1.3 diskutiert, gilt als Grundbedingung für die Auswahl teilnehmender Expertinnen und Experten in der Delphi-Befragung, dass sie sich beruflich - zumindest teilweise - damit auseinandersetzen, wie das Thema Teilchenphysik einem Schulniveau angemessen aufbereitet bzw. dargestellt werden kann. Die Bedingung wird prinzipiell dadurch erfüllt, dass nur gezielt ausgewählte Personen zur Befragung eingeladen werden, von welchen die schulnahe Aufbereitung und Darstellung von Teilchenphysik bekannt ist (siehe auch Kapitel 4.4). Um einen grundlegenden Überblick darüber zu erhalten, wie stark sich die Teilnehmenden tatsächlich mit diesen Aufgaben beschäftigen, wurde zusätzlich in Item 3 mithilfe einer Auswahlfrage der prozentuale Anteil der Arbeitszeit erhoben, in welcher die Teilnehmenden in außeruniversitärer Wissenschaftsvermittlung tätig sind.

Die Auswertung der erhobenen Daten zu den demographischen Items für die Stichprobe der Expertinnen und Experten aus Befragungsrunde 1 wird in Abschnitt 4.4 erläutert und zusammengefasst. Auf die Implikationen, welche die Stichprobencharakteristika auf die Auswertung des bereits vorgestellten Items 4 zur Benennung der Schlüsselkonzepte besitzen, wird in Kapitel 5.1 eingegangen.

Der Online-Fragebogen als Erhebungsinstrument in Befragungsrunde 1 wurde vor seinem Einsatz zur Datenerhebung mithilfe von 10 Personen aus Fach- und Fachdidaktikforschung einem Pretest unterzogen. Mithilfe der Pretest- und Kommentar-Funktion von *Sosci Survey* waren die Testpersonen dazu aufgefordert, den Online-Fragebogen am Computer durchzuarbeiten und auf Verständlichkeit, Menüführung und Bearbeitungszeit zu überprüfen. Aufgrund der Kommentare der Testpersonen mussten letztlich nur einige Formulierungen angepasst werden, bevor Online-Fragebogen 1 eingesetzt werden konnte. Da keine Verbesserung von Validität oder Reliabilität des Fragebogens beispielsweise durch Reduktion oder Veränderung von Items angesichts des vorgestellten Forschungsvorhabens mit explorativem Charakter erforderlich ist, wurde das erläuterte Vorgehen zur Validierung des Online-Fragebogens ohne konkret erhobene Testdaten als angemessen und ausreichend erachtet.

4.3.3 Befragungsrunde 2: Inhaltsvalidierung der Strukturierung

Der folgende Abschnitt beschreibt Online-Fragebogen 2. Er wurde in Befragungsrunde 2 der Delphi-Befragung des Expertisegremiums eingesetzt.

Für den Grundaufbau von Online-Fragebogen 2 wurde die gleiche Struktur wie für den zuvor beschriebenen Online-Fragebogen 1 gewählt, wodurch der kognitive Aufwand für die Expertinnen und Experten vermindert werden und dadurch die inhaltlichen Fragen stärker in den Mittelpunkt rücken sollten: Nach einer einleitenden Projektbeschreibung für neu in die Befragung eingestiegene Personen und einer weiteren Erfassung relevanter demographischer Eckdaten, liegt der Hauptfokus von Online-Fragebogen 2 auf der Rückspiegelung der Ergebnisse aus Runde 1 an das Gremium sowie auf einer erneuten Stellungnahme zu diesen Ergebnissen.

Für die Ergebnismeldung wurde den Gremiumsmitgliedern zunächst eine Übersicht derjenigen Wissenskategorien- und -unterkategorien präsentiert, welche aus der induktiven Zusammenfassung der Schlüsselkonzeptbenennungen in Runde 1 erarbeitet wurden (siehe Kategorienkonstruktion in Kapitel 5.1). Wie bereits mehrfach erwähnt, stellt das Kategoriensystem eine erste Strukturierung des potenziell von Lehrkräften benötigten Fachwissens dar.

Die Übersicht zu den erarbeiteten Hauptkategorien erhielten die Teilnehmenden im Online-Fragebogen 2 durch die in Abbildung 4.4 dargestellte Form. Im weiteren Verlauf der Befragung war es den Teilnehmenden durch Auswahl bestimmter kontextsensitiver Informationen (durch das Anklicken bestimmter Informationsknöpfe) außerdem möglich, neben den Hauptkategorien jederzeit eine Aufstellung aller Wissensunterkategorien aus Runde 1 zu erhalten. Eine Version des hierfür im Hintergrund hinterlegten Unterkategoriensystems findet sich in Abbildung 5.7 in Abschnitt 5.1.2.

Das durch Leitfrage **L2** in Abschnitt 4.2 formulierte Hauptforschungsanliegen in Phase 2 der Delphi-Befragung liegt in der Inhaltsvalidierung der in Phase 1 erarbeiteten Strukturierung des Lehrkräftefachwissens in der Teilchenphysik. Wie bereits erläutert, wird für die Inhaltsvalidierung in **L2** gefragt, ob das zuvor konstruierte System aus Wissenskategorien und -unterkategorien alle Aspekte des zu modellierenden Fachwissens abdeckt und keine Aspekte darüber hinaus enthält. Die für das Expertisegremium in Runde 2 operationalisierte Fragestellung von **L2** umfasst insgesamt zehn Frageblöcke mit je drei Items, wobei alle Items auf eine Stellungnahme der Teilnehmenden zum gezeigten Kategoriensystem abzielen.

In der ersten Runde der Delphi-Befragung haben die teilnehmenden Expert*innen Themengebiete aus dem Bereich der Teilchenphysik als potenziell relevant für den Schulunterricht benannt. Diese Themengebiete wurden den in **Abbildung 1** dargestellten 10 Hauptkategorien zugeordnet.

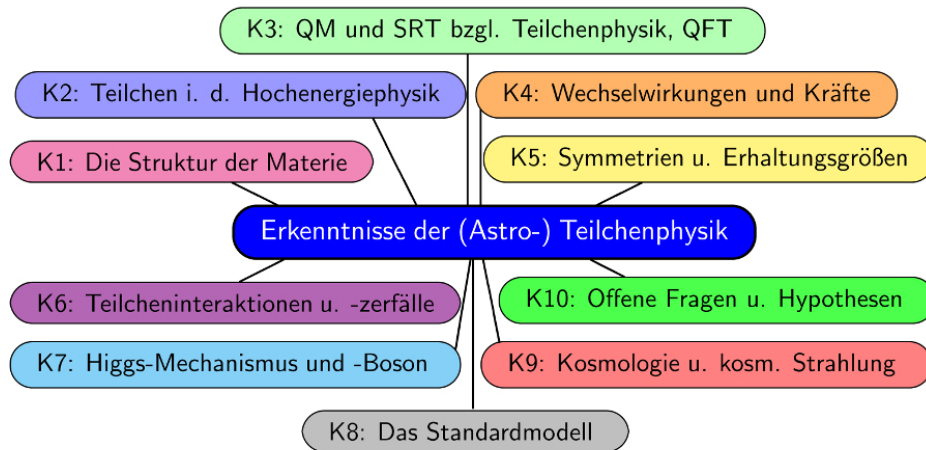


Abbildung 1: Übersicht über die in Runde 1 genannten Hauptwissenskategorien

Zusätzlich wurden innerhalb dieser 10 Hauptkategorien jeweils mehrere Unterkategorien identifiziert.

Abbildung 4.4: Auszug aus Online-Fragebogen 2

Bei jedem Frageblock steht eine einzige der zehn in Runde 1 erarbeiteten Hauptkategorien mit ihren entsprechenden Unterkategorien im Fokus der Bewertung. Wie in Abbildung 4.5 beispielhaft für Hauptkategorie 1 gezeigt, wird im Online-Fragebogen pro Frageblock jeweils links die zu bewertende Kategorie angezeigt und parallel sind rechts drei Fragen die angezeigte Kategorie betreffend zu beantworten (Items 5-7). Für jede Unterkategorie auf der linken Seite existiert im Fragebogen ein anklickbarer Informationsknopf, welcher entsprechende, ebenfalls in Runde 1 erarbeitete, Unterkategorienbeschreibung enthält. Durch die Zusatzinformationen soll es den Befragten ermöglicht werden, sich ein detaillierteres Bild der Kategorien zu verschaffen und dadurch gezielter bewerten zu können. Die hinter allen Informationsknöpfen hinterlegten Unterkategorienbeschreibungen sind in Anhang A.1 aufgelistet.

Für jede der zehn Hauptkategorien - und somit in jedem der zehn Frageblöcke - werden die gleichen drei Items eingesetzt. Wie bereits in den Abschnitten 4.1.1 und 4.2 erläutert, wird für die Inhaltsvalidierung in Runde 2 eine Kombination aus quantitativer und qualitativer Befragungsmethodik verwendet. Der quantitativ auszuwertende Teil wird durch das in Abbildung 4.5 gezeigte Item 5 gebildet. Darin wird mittels des Fragetyps „Rating“ (dt. Bewertung, Einschätzung) nach dem Grad der Abdeckung gefragt, durch welchen die angezeigten Unterkategorien dasjenige Wissen

Validierung von Kategorie 1

K1: Die Struktur der Materie Info:K1

- K1.1: Materieaufbau** Info:K1.1
- K1.2: Eigenschaften, Entdeckungen, Beziehungen von Bausteinen** Info:K1.2
- K1.3: Kernphysik, Radioaktivität** Info:K1.3
- K1.4: Historische Entdeckungen zum Materieaufbau** Info:K1.4
- K1.5: Antimaterie** Info:K1.5

Info: Kategorienüberblick

5. Wie gut decken die links angezeigten Unterkategorien das Wissen, das eine gymnasiale Physiklehrkraft über die gezeigte Hauptkategorie haben sollte, Ihrer Meinung nach ab?

Durch Anklicken der hellblau unterlegten Knöpfe erhalten Sie jeweils weitere Informationen, die Ihnen eventuell bei Ihrer Entscheidung nützlich sein könnten.

überhaupt nicht

 vollständig

6. Gibt es Unterkategorien auf der linken Seite, die Ihrer Ansicht nach kein Teil des Wissens sind, das eine Lehrperson über die angezeigte Hauptkategorie haben muss?

Falls ja, benennen Sie diese bitte und geben Sie eine kurze Begründung für Ihre Ansicht.

☐ Nein.

☐ Ja, und zwar weil ... :

7. Gibt es fundamental wichtige Aspekte, die Ihrer Ansicht nach in der Liste der Unterkategorien auf der linken Seite fehlen?

Falls ja, benennen Sie diese bitte und geben Sie eine kurze Begründung für Ihre Ansicht.

☐ Nein.

☐ Ja, und zwar weil ... :

Abbildung 4.5: Auszug aus Online-Fragebogen 2

abdecken, das eine Lehrkraft über die dazugehörige Hauptkategorie besitzen sollte. Die im Online-Fragebogen einstellbaren Antwortmöglichkeiten zu Item 5 bilden ein ganzzahliges Kontinuum zwischen 0 % (entspricht „überhaupt keiner Abdeckung“) und 100 % (entspricht „vollständiger Abdeckung“). Durch die Operationalisierung mithilfe des Abdeckungsgrades soll die generelle Zustimmung der Expertinnen und Experten zu der erarbeiteten Strukturierung des Themas der Hauptkategorie in die Unterkategorien erfasst werden. Schlussendlich kann damit die Fragestellung der Inhaltsvalidierung beantwortet werden. Die statistische Auswertung von Item 5 wird in Kapitel 5.2 diskutiert.

Darüber hinaus wurde in offenen Antwortformaten im Rahmen der eingesetzten Items 6 und 7 (siehe Abbildung 4.5) nach inhaltlichen Aspekten gefragt, die keinen Teil des von Lehrkräften benötigten Wissens bilden bzw. in der angezeigten Unterka-

tegorienliste der relevanten Themen fehlen. Mit diesem Vorgehen sollen auch etwaige Korrektur- bzw. Ergänzungsvorschläge des Expertisegremiums berücksichtigt werden, mit dem Ziel ein optimiertes, inhaltssvalideres Kategoriensystem zu entwickeln.

Abschließend soll noch angemerkt werden, dass jede Person in Online-Fragebogen 2 nur drei der zehn Frageblöcke zur Inhaltsvalidierung erhielt, wodurch der zeitliche Aufwand für die Teilnehmenden reduziert wurde. Die Auswahl der Frageblöcke pro Teilnehmendem wurde durch einen programmierten Zufallsgenerator bestimmt, wobei die Ziehung der Frageblöcke gemäß einer Gleichverteilung stattfand, um gleichmäßig Informationen zu allen Hauptkategorien zu erhalten.

Der Frageblock zu den demographischen Eckdaten in Online-Fragebogen 2 wurde analog zu den in Online-Fragebogen 1 verwendeten Items konstruiert. Es wurde zunächst im Fragetyp „Offene Angabe“ nach dem Land gefragt, in welchem die Teilnehmenden mit der Teilchenphysik „sozialisiert“ wurden (Item 1). Hierunter ist dasjenige Land zu verstehen, welches einen maßgeblichen Einfluss auf das heutige Bild bzw. das heutige Wissen und Verständnis der Teilnehmenden über die Teilchenphysik hatte. Das Land ist nicht unbedingt mit dem Geburts- oder Wohnort gleichzusetzen. Zusätzlich wurden wiederum im Rahmen offener Angaben die beruflichen Hintergründe (Item 2) sowie durch ein Rating zwischen 0% und 0% der Arbeitszeitanteil der außeruniversitären Wissenschaftsvermittlung (Item 3) der Teilnehmenden erhoben, welche nicht bereits in Befragungsrunde 1 teilgenommen hatten. Die erhobenen demographischen Daten aus Runde 2 sind als Stichprobencharakteristika in Kapitel 4.4 zusammengefasst. Der Einfluss der beruflichen sowie der landesabhängigen Charakteristika auf die Ansichten der Expertinnen und Experten zur Inhaltsvalidierung werden in Kapitel 5.2 analysiert.

Der vorgestellte Online-Fragebogen 2 wurde in gleicher Weise einem Pretest unterzogen wie bereits für Online-Fragebogen 1 beschrieben und geringfügig hinsichtlich Verständlichkeit und Menüführung angepasst.

4.3.4 Befragungsrunde 3: Konsensfindung

Kapitel 4.3 schließt mit einer Beschreibung der Online-Fragebögen ab, die in Phase 3 der Delphi-Befragung eingesetzt wurden. Es handelt sich dabei einerseits um Befragungsrunde 3 des Expertisegremiums sowie andererseits um die Lehrkräftebefragung.

Der Aufbau der beiden Online-Fragebögen ist wiederum angelehnt an die Frage-

bögen aus den beiden vorangegangenen Befragungsrunden: Nach einer einleitenden Projektbeschreibung sowie einem Frageblock zu demographischen Eckdaten schließt sich eine Übersicht der Ergebnisse, diesmal aus Befragungsrunde 2, sowie eine Einschätzung dieser Ergebnisse unter der forschungsrelevanten Fragestellung in Phase 3 an.

Da sich die bei den Expertinnen und Experten sowie bei den Lehrkräften eingesetzten Items lediglich im demographischen Frageblock sowie in der adressatengerechten Operationalisierung des Forschungsanliegens in Phase 3 unterscheiden, wird in den anschließenden Abschnitten zunächst der Aufbau des Fragebogens für das Expertisegremium im Detail und nachfolgend lediglich der Unterschied zum Lehrkräftefragebogen diskutiert.

Befragung der Expertinnen und Experten

Das im vorangegangenen Kapitel erarbeitete Forschungsziel von Phase 3 der Delphi-Befragung stellt die Konsensfindung unter den Meinungen der Expertinnen und Experten darüber dar, welche unter den in Phase 2 inhaltlich validierten thematischen Wissenskategorien besonders relevant für das Fachwissen von Lehrkräften sind. Der Konsens soll auf Basis einer Einteilung der Themen aus Phase 2 in Gruppen von geringerer sowie höherer Relevanz gemäß Leitfrage **L3a** gebildet werden. Die Beantwortung von **L3a** erfordert zunächst eine Einschätzung aller Themen in Bezug auf ihre Relevanz durch die Teilnehmenden in Runde 3.

Als Evaluationsgrundlage für die erneute Einschätzung werden den teilnehmenden Personen im Online-Fragebogen 3 zunächst die zusammengefassten Ergebnisse aus Runde 2 in der durch Abbildung 4.6 dargestellten Form präsentiert. Es handelt sich hierbei um eine Übersicht über das durch die Teilnehmenden in Runde 2 optimierte und inhaltlich validierte System von Fachwissenskategorien². Neben einer reinen Auflistung der Wissenskategorien und -unterkategorien, erhalten die Teilnehmenden in Runde 3 auf Basis des Farbcodes in Abbildung 4.6 ebenfalls Informationen darüber, welche der gezeigten Kategorien im Vergleich zum Kategoriensystem nach Runde 1 hinzukamen, entfernt oder inhaltlich modifiziert wurden. Die Zusatzinformationen erlauben es dem Gremium, den gesamten Konstruktionsprozess im Blick zu behalten und bei der erneuten Einschätzung des Kategoriensystems zu berücksichtigen.

Nach der Ergebnissrückmeldung aus Runde 2 stellt die zuvor beschriebene Rele-

² Der Erstellprozess des Systems ist Gegenstand von Kapitel 5.2

4.3 Konstruktion der Erhebungsinstrumente

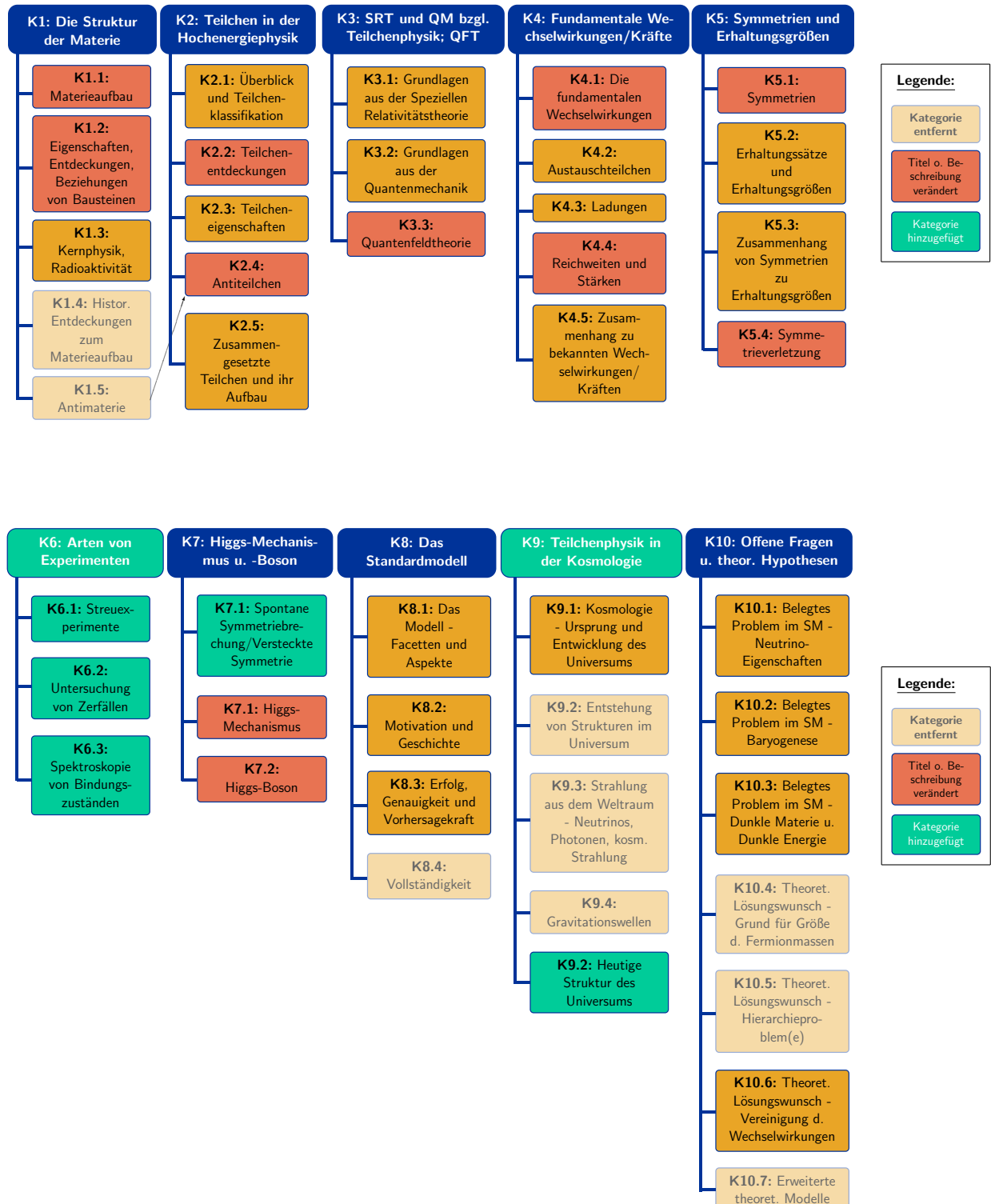


Abbildung 4.6: Ergebnisdarstellung aus Runde 2 im Online-Fragebogen 3 für die Expertinnen und Experten

Stellen Sie sich eine Lehrkraft eines Gymnasiums bzw. einer weiterführenden Schule vor, die demnächst mit ihrem Physik-Oberstufenkurs eine Unterrichtseinheit rund um die Teilchenphysik durchführen möchte.

6. Wie relevant ist es Ihrer Meinung nach, dass die Lehrkraft selbst über Wissen zu den folgenden Themen verfügt?

Durch Anklicken der hellblau unterlegten Infoknöpfe links erhalten Sie jeweils eine Kurzdefinition der aufgelisteten Themen.

	überhaupt nicht relevant	sehr relevant	Das kann ich nicht einschätzen.
Die Struktur der Materie:			
Info 1 1. Materieaufbau – vom Molekül bis zum Quark	☐	☐	☐
Info 2 2. Eigenschaften und Beziehungen von Materiebausteinen	☐	☐	☐
Info 3 3. Kernphysik und Radioaktivität auf Teilchenebene	☐	☐	☐
Teilchen in der Hochenergiephysik:			
Info 4 4. Teilchenüberblick – und -klassifikationen	☐	☐	☐
Info 5 5. Besondere Teilchenentdeckungen und -suchen	☐	☐	☐
Info 6 6. Teilcheneigenschaften	☐	☐	☐
Info 7 7. Antiteilchen und Antimaterie	☐	☐	☐
Info 8 8. Zusammengesetzte Teilchen und ihr Aufbau	☐	☐	☐

Abbildung 4.7: Auszug aus Online-Fragebogen 3 für die Expertinnen und Experten

vanzeinschätzung selbst den Hauptfrageblock im eingesetzten Online-Fragebogen 3 dar. Ein Ausdruck des Frageblocks ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Er beinhaltet zunächst die Beschreibung eines möglichst konkreten Szenarios, in welches sich die Teilnehmenden hineinversetzen sollen. Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht eine gymnasiale Physiklehrkraft, die eine Unterrichtseinheit zur Teilchenphysik für einen Oberstufenkurs planen soll. Da die Expertinnen und Experten teilchenphysikalische Themen als unterschiedlich relevant für das Fachwissen von Lehrkräften - vor dem Hintergrund verschiedenen Schulformen und Klassenstufen - erachten könnten, soll ihnen das beschriebene Szenario ermöglichen, ihre Relevanzeinschätzungen passgenau für eine möglichst konkrete Situation abgeben zu können. Da nach Analyse von Bildungs- und Lehrplänen davon auszugehen ist, dass viele Themen der sehr abstrakten Domäne Teilchenphysik ausschließlich in der Oberstufe relevant werden könnten, wurde für das Szenario das in allgemeinbildenden Schulen höchste fachli-

che Niveau eines gymnasialen Oberstufenkurses gewählt.

Anschließend an die Szenarienbeschreibung wurde im Online-Fragebogen 3 die Frage nach der Relevanz der Themen aus Runde 2 für das Fachwissen der beschriebenen Lehrkraft durch das in Abbildung 4.7 gezeigte Item 6 operationalisiert. Item 6 umfasst hierbei Unteritems vom Typ „Rating“ zur Einschätzung der Relevanz der Unterkategorien aus Runde 2 mit Antwortmöglichkeiten auf einer sechsstufigen Skala mit Ankerpunkten von „überhaupt nicht relevant“ und „sehr relevant“ sowie einer Ausweichoption. Durch die Wahl einer sechsstufigen Skala sollen möglichst kleine Unterschiede in Relevanzen zwischen verschiedenen Unterkategorien sichtbar gemacht und gleichzeitig soll dennoch eine Tendenz zur Mitte vermieden werden. Insgesamt enthält Item 6 im Frageblock zur Relevanzeinschätzung 35 Unteritems vom gleichen Typ. Bei jedem Unteritem steht eine der in Runde 2 etablierten Unterkategorien im Fokus der Bewertung. Durch die Reihenfolge der Unteritems im Fragebogen sowie durch strukturgebende Überschriften im Frageblock wird eindeutig gemacht, zu welcher Hauptkategorie die entsprechende Unterkategorie gehört. Von den 35 Unteritems werden als Beispiel lediglich die ersten acht in Abbildung 4.7 gezeigt.

Für jedes Unteritem enthält die dargestellte Fragebogenseite einen Informationsknopf, hinter welchem sich Kurzbeschreibungen der zu bewertenden Unterkategorien verbergen. Die Kurzbeschreibungen wurden aus den Antworten des Expertisegremiums in Runde 2 erarbeitet und sowohl den in Runde 3 teilnehmenden Expertinnen und Experten als auch den Lehrkräften für eine bessere Einschätzung der Themen zur Verfügung gestellt. Eine Zusammenstellung aller Kurzbeschreibungen in den Online-Fragebögen aus Phase 3 findet sich in Anhang A.2.

Durch die eingesetzte quantitative Befragungsmethodik zur Relevanzeinschätzung aller Unterkategorien durch alle Expertinnen und Experten können - wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert - mithilfe interferenzstatistischer Analyseverfahren Relevanzunterschiede sowohl zwischen einzelnen Unterkategorien als auch - durch die Zusammenfassung zu Hauptkategorien - zwischen verschiedenen Hauptkategorien aufgedeckt werden (siehe Kapitel 5.3).

Analog zu den bis hierhin vorgestellten Fragebögen enthält Online-Fragebogen 3 ebenfalls einen Frageblock zu den relevanten demographischen Eckdaten der teilnehmenden Personen. Hier wird wiederum nach dem „Sozialisierungsland“ mit der Teilchenphysik (Item 3), nach dem jeweiligen Beruf (Item 4) sowie nach der Arbeitszeit gefragt, die zur außeruniversitären Wissenschaftsvermittlung zur Verfügung

steht (Item 5). Die derart erhobenen Stichprobencharakteristika sind in Kapitel 4.4 beschrieben.

Sowohl Online-Fragebogen 3 für das Expertisegremium als auch der nachfolgend beschriebene Online-Fragebogen zur Lehrkräftebefragung wurden auf die gleiche qualitative Weise getestet und verbessert, welche bereits im Zusammenhang mit den Online-Fragebögen aus Runde 1 und 2 beschrieben wurde.

Lehrkräftebefragung

Für Phase 3 des in Abschnitt 4.2 beschriebenen Forschungsdesigns wurde zusätzlich zur Befragung der Expertinnen und Experten ein weiterer Online-Fragebogen entwickelt, welcher bei Physiklehrkräften eingesetzt wurde, die Erfahrung im Unterrichten teilchenphysikalischer Themen besitzen.

Wie bereits erläutert, dient die Lehrkräftebefragung vorrangig ebenfalls der Relevanzeinschätzung der in Runde 2 etablierten Fachwissenskategorien und trägt damit zur Beantwortung von Leitfrage **L3a** und der Etablierung eines gemeinsamen Konsens unter allen Personen mit Expertise - also auch unter den Lehrkräften als den Expertinnen und Experten aus der Praxis - über die relevantesten Themen bei. Zusätzlich lässt sich mithilfe der Lehrkräftebefragung im Rahmen von Leitfrage **L3b** überprüfen, ob und in welchen Themen sich Unterschiede in den Einschätzungen der Lehrkräfte und des Gremiums aus den anderen Expertinnen und Experten zeigen. Aus dem Vergleich kann abgeleitet werden, welche Themen tatsächlich auch aus Praxissicht von Bedeutung sind.

Für die Relevanzeinschätzungen im Fragebogen für die Lehrkräfte wurde der in Abbildung 4.8 auszugsweise dargestellte Frageblock eingesetzt. Der Grundaufbau des Frageblocks entspricht exakt der Struktur im Online-Fragebogen 3 der Expertinnen und Experten, was nach einer einführenden Szenarienbeschreibung Rating-Items für alle 35 der durch das Expertengremium in Runde 2 etablierten Fachwissensunterkategorien beinhaltet. Als Szenario wurde hier jedoch eine Situation gewählt, in welcher ein hypothetischer Referendar die Oberstufenkurseinheit zur Teilchenphysik plant. Obgleich nachfolgend wieder die Relevanz für das Fachwissen von Lehrkräften selbst im Fokus der Einschätzungen liegt, ermöglicht die Beschreibung eines Referendars es den teilnehmenden Lehrkräften ebenfalls, Einschätzungen zur Fachwissensrelevanz für eine dritte Person vorzunehmen und keinen direkten persönlichen Bezug zu etwaigen Defiziten im eigenen Fachwissen herzustellen.

Die 35 eingesetzten Rating-Subitems selbst sind im Lehrkräftefragebogen unter

Stellen Sie sich nun folgendes Szenario vor:

Sie betreuen an Ihrer Schule einen Referendar (Vorbereitungsdienst für Lehrkräfte) im Fach Physik.

Er möchte in einem Physikoberstufenkurs (Sekundarstufe II) eine Unterrichtseinheit zur Teilchenphysik durchführen.

9. Für wie wichtig halten Sie es, dass der Referendar zur Unterrichtsvorbereitung und -durchführung über Wissen in den folgenden Themenbereichen verfügt?

Durch Anklicken der hellblau unterlegten Infoknöpfe links erhalten Sie jeweils eine Kurzdefinition der aufgelisteten Themen.

	überhaupt nicht wichtig	sehr wichtig	Das kann ich nicht einschätzen.
Die Struktur der Materie:			
Info 1 1. Materieaufbau – vom Molekül bis zum Quark	☐	☐	☐
Info 2 2. Eigenschaften und Beziehungen von Materiebausteinen	☐	☐	☐
Info 3 3. Kernphysik und Radioaktivität auf Teilchenebene	☐	☐	☐
Teilchen in der Hochenergiephysik:			
Info 4 4. Teilchenüberblick – und -klassifikation	☐	☐	☐
Info 5 5. Besondere Teilchenentdeckungen und -suchen	☐	☐	☐
Info 6 6. Teilcheneigenschaften	☐	☐	☐
Info 7 7. Antiteilchen und Antimaterie	☐	☐	☐
Info 8 8. Zusammengesetzte Teilchen und ihr Aufbau	☐	☐	☐

Abbildung 4.8: Auszug aus dem Online-Fragebogen für die Lehrkräfte

Item 9 zusammengefasst und beinhalten jeweils eine Einschätzung der entsprechenden Fachwissensunterkategorie auf einer sechsstufigen Skala mit Ausweichoption. Im Unterschied zum Expertisefragebogen wurden jedoch die Fragestellung sowie die Ankerpunkte der Skalen in den Subitems nicht auf die Relevanz für das Fachwissen, sondern auf die Wichtigkeit ausgerichtet, die Lehrkräfte dem Fachwissen des Referendars bezüglich der Themen beimessen. Durch diese Veränderung wird prinzipiell das Gleiche erhoben wie im Expertisefragebogen, durch die Umformulierung wird jedoch betont, dass die persönliche Meinung der Lehrkräfte erfragt wird und keine Einschätzung darüber, was eventuell objektiv als relevant gelten könnte. Die Auswertung der durch Item 9 erhobenen Daten wird in Kapitel 5.3 beschrieben.

Analog zu allen bis hierhin beschriebenen Fragebögen enthält das Instrument zur Lehrkräftebefragung ebenfalls einen Frageblock zu relevanten demographischen Eckdaten der Teilnehmenden, welcher den Relevanzeinschätzungen im Online- Fragebogen vorgeschaltet und in Abbildung 4.9 abgedruckt ist.

Der Frageblock enthält 7 Items (Fragebogennummerierungen 2 - 8). Item 2 wurde als offene Texteingabe in ähnlicher Weise wie in den anderen Befragungen konzipiert, um das Unterrichtsland der Teilnehmenden zu erheben. Die Frage dient ähnlich wie in der Expertisebefragung dem Vergleich von Einschätzungen der Fachwissensthemen zwischen Personengruppen aus unterschiedlichen Ländern. In den Items 3 bis 8 werden die teilnehmenden Lehrkräfte teilweise ebenfalls durch offene Texteingaben, teilweise durch (Mehrfach-)Auswahl, um Daten gebeten, welche zusammengekommen eine Einschätzung des Erfahrungs- bzw. Kompetenzniveaus der Lehrkräfte bezüglich des Unterrichtens teilchenphysikalischer Themen erlauben. Wie bereits erläutert, sollte die an der Delphi-Befragung teilnehmende Stichprobe eine möglichst große Expertise bzw. möglichst viel Erfahrung besitzen, um die Ergebnisse der Expertinnen und Experten auch aus Praxissicht aussagekräftig validieren zu können.

Für die Beschreibung der Erfahrung wurden in den Items 3 bis 7 einerseits die Kenngrößen Unterrichtsjahre, Unterrichtsfächer, Ausbildungsinhalt, Fortbildungsbesuche sowie gehaltener Unterricht in der Teilchenphysik erhoben. Generell wird erwartet, dass die Stichprobe aus Physiklehrkräften bestehen sollte, die seit einiger Zeit unterrichten und sich mit Teilchenphysik in der Ausbildung oder auch in Fortbildungen sowie im eigenen Unterricht beschäftigt haben. Abschließend wird in Item 8 noch das selbst eingeschätzte Kompetenzniveau der Lehrkräfte auf einer sechsstufigen Skala von „überhaupt nicht vertraut“ bis „sehr vertraut“ mit der schulrelevanten Teilchenphysik erhoben. Alle beschriebenen demographischen Eckdaten werden in Kapitel 4.4 als Stichprobencharakteristika der Lehrkräftegruppe evaluiert.

4.4 Datenerhebungen und Stichproben

Nachdem im bisherigen Verlauf des Kapitels Details aus der Planungsphase des vorgestellten Projekts berichtet wurden, fokussiert der nachfolgende Abschnitt auf die Datenerhebungen selbst. Darin wird zunächst beschrieben, wie die potenziellen Teilnehmenden ermittelt und zu den Online-Befragungen eingeladen wurden sowie über welche Zeiträume sich die Befragungen erstreckten. Abschließend werden Charakteristika der Stichproben aus jeder Befragung zusammengefasst, analysiert und

2. In welchem Land bzw. in welchen Ländern unterrichten Sie aktuell? Falls Sie aktuell nicht unterrichten, geben Sie bitte das Land an, in welchem Sie zuletzt unterrichtet haben.	
Bitte tragen Sie lediglich das Landeskürzel ein, z.B. „DE“ für Deutschland:	☐ Ich habe bislang noch in keinem Land unterrichtet.
3. Wie lange sind bzw. waren Sie bereits im Schuldienst tätig?	
Anzahl in Jahren:	☐ Ich war bislang noch nie im Schuldienst tätig.
4. Welches Fach bzw. welche Fächer unterrichten Sie aktuell? Bitte schreiben Sie jedes Fach in eine eigene Zeile. Sie können maximal 10 Nennungen machen. Falls Sie derzeit nicht unterrichten, geben Sie bitte das Fach/die Fächer an, in denen Sie zuletzt unterrichtet haben.	
01	
02	
03	
5. Waren Themengebiete aus der Teilchenphysik Inhalt Ihrer akademischen Ausbildung (ab Hochschul – bzw. Universitätsniveau)?	
☐ Ja. ☐ Nein. ☐ Weiß ich nicht mehr.	
6. Haben Sie bereits an mindestens einem Fort- bzw. Weiterbildungsprogramm rund um die Teilchenphysik für Lehrkräfte teilgenommen?	
☐ Ja, und zwar: (Bitte durchführende Organisation und Dauer des umfangreichsten Programms angeben.) ☐ Nein. ☐ Weiß ich nicht mehr.	
7. Haben Sie bereits Unterricht zu teilchenphysikalischen Themen durchgeführt/vorbereitet?	
☐ Ja, und zwar: (Bitte Alter der Schüler*innen bzw. Klassenstufe(n) und jeweilige Anzahl Unterrichtsstunden angeben.) ☐ Nein. ☐ Weiß ich nicht mehr.	
8. Wie vertraut fühlen Sie sich selbst mit den fachlichen Inhalten der schulrelevanten Teilchenphysik?	
☐ überhaupt nicht vertraut ☐ nicht vertraut ☐ eher nicht vertraut ☐ eher vertraut ☐ vertraut ☐ sehr vertraut	

Abbildung 4.9: Auszug aus dem Online-Fragebogen für die Lehrkräfte

miteinander verglichen. Als Übergang zum nachfolgenden Auswertungsteil der vorliegenden Arbeit wird insbesondere auf diejenigen Stichprobeneigenschaften näher eingegangen, für welche ein Einfluss auf die Ergebnisse zu der relevanten Fragestellungen nach dem von Lehrkräften benötigten Fachwissen vermutet wird.

Wie in Kapitel 4.1.3 diskutiert, wurden im Rahmen der beschriebenen Delphi- Befragung nur Personen zur Teilnahme ausgewählt, die mutmaßlich die Kompetenz bzw. die nötige Expertise zur adäquaten Beantwortung der Delphi-Fragestellung besitzen.

Für die drei Befragungsrunden eines Expertisegremiums wurden als potenzielle Mitglieder des Gremiums bereits drei Personengruppen identifiziert: 1) Hochschulpersonal der Fachwissenschaft, 2) Hochschulpersonal der Fachdidaktik, 3) Mitarbeitende in der Öffentlichkeitsarbeit. Innerhalb der drei Gruppen wurden weitere Untergruppen ermittelt, welche in einem Expertisegremium vertreten sein sollten (siehe Kapitel 4.1.3). Ausschlaggebendes Qualifizierungskriterium für die Expertinnen und Experten war eine gewisse Form von absolvierter Ausbildung in der Teilchenphysik sowie eine - zumindest geringe - berufliche Beschäftigung damit, wie sich Teilchenphysik einem Schulniveau angemessen aufbereiten bzw. darstellen lässt.

Für die konkrete Auswahl von Personen aus der Fachwissenschaft (Gruppe 1) wurden vor der ersten Befragungsrunde die öffentlich zugänglichen Kontaktdaten von Professorinnen und Professoren, Dozierenden sowie wissenschaftlichem Personal ausfindig gemacht, welche als Kollaborationsmitglieder mit einem der Großexperimente des *CERN* in Genf (siehe Kapitel 2) affiliert sind und aus deren Vita zusätzlich hervorgeht, dass sie sich in öffentlichkeitswirksamen Projekten und Veranstaltungen rund um das Thema Teilchenphysik engagieren. Zu den Projekten und Veranstaltungen zählen insbesondere netzwerkähnliche Zusammenschlüsse von Forschenden wie das *Netzwerk Teilchenwelt* (Netzwerk Teilchenwelt, 2019), die *International Particle Physics Outreach Group* (IPPOG, 2019) sowie die *Outreach*-Abteilung der *ATLAS*-Kollaboration (ATLAS Outreach & Education, 2019).

Für die Personengruppe aus dem Bereich der Fachdidaktik (Gruppe 2) wurden Professorinnen und Professoren sowie weiteres akademisches Personal aus den Naturwissenschafts- bzw. Physikfachdidaktikabteilungen von Hochschulen identifiziert, welche sich - durch Publikationen nachweisbar - bereits mit der Lehr-Lern-Forschung speziell im Kontext moderner Physik bzw. direkt mit Teilchenphysik auseinandergesetzt haben.

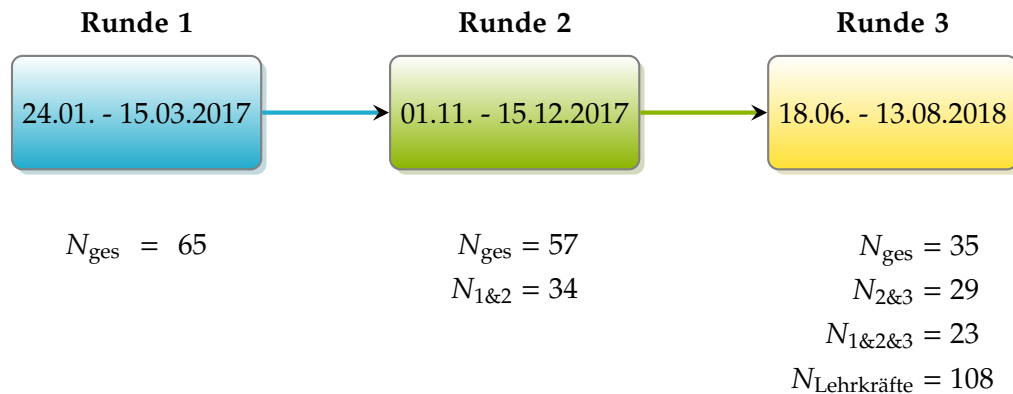


Abbildung 4.10: Verlauf der Befragungszeiträume und Anzahl der Teilnehmenden für die drei Befragungsrunden: N_{ges} gibt die Anzahl an teilnehmenden Personen an, $N_{1\&2}$ alle Personen, die an Runde 1 und 2, $N_{1\&2\&3}$ alle Personen, die an Runde 1, 2 und 3 teilgenommen haben und $N_{\text{Lehrkräfte}}$ die Zahl der in Befragungsrunde 3 teilnehmenden Lehrkräfte.

Schließlich wurden für die Personengruppe aus der Öffentlichkeitsarbeit (Gruppe 3) sowohl Mitarbeitende in Wissenschaftsmuseen (z.B. aus dem Deutschen Museum in Bonn) als auch Autorinnen und Autoren ausgewählt, welche populärwissenschaftliche Bücher sowie sonstige Texte zu teilchenphysikalischen Themengebieten verfasst haben.

Insgesamt ergab sich für die drei beschriebenen Personengruppen unter den Expertinnen und Experten eine Gesamtanzahl von $N = 175$ Personen, welche mithilfe des in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Verfahrens im Rahmen des Programms *SoSci Survey* via E-Mail zu jeder der drei Befragungsrunden eingeladen wurden. Die Befragungszeiträume sind in Abbildung 4.10 graphisch dargestellt. Dabei wurden neben der Einladungs-E-Mail zum Start der Zeiträume jeweils nach vier Wochen sowie eine Woche vor Ende der Befragungen Erinnerungs-E-Mails an alle Personen verschickt, die noch nicht an der jeweiligen Befragung teilgenommen hatten. In Abbildung 4.10 sind ebenfalls die absoluten Zahlen an Personen aufgelistet, welche schlussendlich an den Befragungen teilgenommen und den Online-Fragebogen jeweils vollständig ausgefüllt haben. Es lässt sich feststellen, dass in Befragungsrunde 1 mit $N = 65$ Personen ca. ein Drittel aller Eingeladenen teilgenommen hat. In Runde 2 hat sich die Zahl auf $N = 57$ reduziert, von denen jedoch ca. 60 % bereits in Runde 1 partizipiert haben. Die Teilnehmendenzahl in Runde 3 betrug $N = 35$. Darunter waren ca. 83 % bereits in Runde 2 beteiligt. Von allen Expertinnen und Experten in Runde 3 haben zusätzlich ca. 66 % an allen drei Befragungsrunden teilgenommen. Es ist demnach zu einem gewissen Grad die Konstanz der Teilnehmenden im Expertise-

gremium bestätigt, welche in Kapitel 4.1.3 als eine erfolgsentscheidende Bedingung für Delphi-Befragungen hervorgehoben wurde.

Als ausschlaggebendes Qualifizierungskriterium für die an der Lehrkräftebefragung teilnehmenden Lehrkräfte wurde in Abschnitt 4.1.3 der Grad an Erfahrung im Unterrichten teilchenphysikalischer Themen erarbeitet. Da im Vorfeld der Befragungen nicht ohne Weiteres herauszufinden war, welche Lehrkräfte an welchen Schulen in welchen Ländern bereits Teilchenphysik unterrichtet haben, wurde die Rekrutierung für die Befragung nicht durch einen direkten Kontakt mit den Lehrkräften, sondern über eine Multiplikationsstelle durchgeführt: Von der für Workshops für Lehrkräfte sowie für Schülerinnen und Schüler verantwortlichen Abteilung des CERN in Genf wurden international alle Lehrkräfte zur Befragung via E-Mail eingeladen, welche bereits an mindestens einem mehrtägigen Fortbildungsprogramm am CERN teilgenommen hatten. Es ist davon auszugehen, dass diese Population bereits Teilchenphysik unterrichtet bzw. ein sehr starkes Interesse an dem Thema hat. Im Gegensatz zur Befragung des Expertisegremiums standen die potenziellen Teilnehmenden der Lehrkräftebefragung vorab weder anzahlmäßig noch namentlich fest und erhielten daher mithilfe eines unpersönlichen Links Zugang zum Fragebogen. Insgesamt bearbeiteten $N = 108$ Lehrkräfte den für die Lehrkräftebefragung konzipierten Online-Fragebogen vollständig.

Es kann zusammenfassend noch einmal festgehalten werden, dass die Datenerhebungen selbst im vorgestellten Projekt durch die Bearbeitung der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Online-Fragebögen durch die hier beschriebenen Gruppen von Expertinnen und Experten sowie Lehrkräften stattfanden. Mithilfe des Programms *SoSci Survey* wurden die erhobenen Daten nach Abschluss der Erhebungszeiträume nach Variablen sortiert zusammengefasst und als SPSS-Datei für die weitere Analyse heruntergeladen. Die Auswertung aller Daten wurde mithilfe des Statistik-Programms *R* (R Core Team, 2018) durchgeführt (siehe Kapitel 5).

Stichprobencharakteristika der Expertisegremien

Nachfolgend werden die Stichprobeneigenschaften der Expertinnen und Experten zusammengefasst, welche im Rahmen der Frageblöcke zu den demographischen Eckdaten der Teilnehmer innerhalb der Online-Fragebögen 1 bis 3 erhoben wurden.

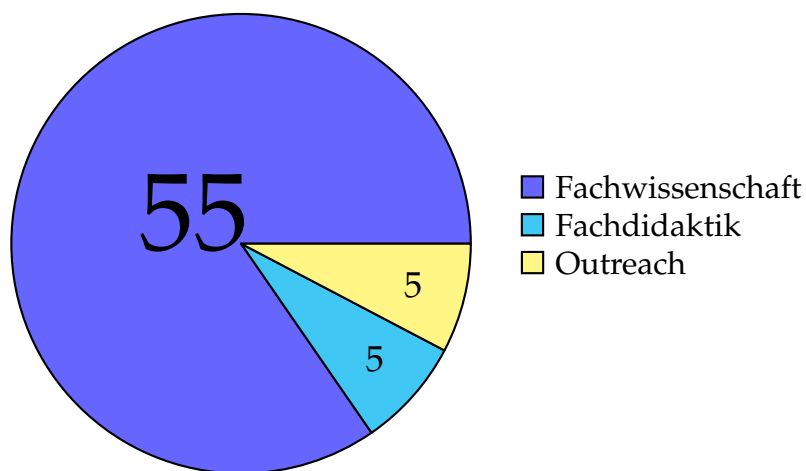
In Abbildung 4.11 sind zunächst für alle drei Befragungsrunden des Expertisegremiums die Verteilungen der drei beschriebenen Berufsgruppen unter den teilneh-

menden Personen dargestellt. Die abgebildeten Daten wurden mithilfe von Item 1 in Online-Fragebogen 1, Item 2 im Online-Fragebogen 2 sowie Item 4 im Online-Fragebogen 3 erhoben³ (siehe Items in Kapitel 4.3). Es lässt sich feststellen, dass in allen drei Befragungen der Anteil an Personen aus Berufsgruppe 1 (Fachwissenschaft) mit einem relativen Anteil zwischen 79 % (in Runde 2) und 86 % (in Runde 3) gegenüber den anderen beiden Gruppen (Fachdidaktik und *Outreach*) überwiegt. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 erläutert, wurde das Ungleichgewicht erwartet und in Kauf genommen, um möglichst viele Expertinnen und Experten für die Teilnahme zu gewinnen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Ungleichgewicht teilweise ausgeglichen, indem der Meinung von Teilnehmenden aus den beiden schwächer vertretenen Berufsgruppen ein höheres Gewicht bei der Benennung von Schlüsselkonzepten in Runde 1 beigemessen wird (siehe Auswertung zu Runde 1 in Kapitel 5.1). Des Weiteren wird in der Auswertung der quantitativen Items aus den Runden 2 und 3 untersucht werden, ob sich überhaupt signifikante Unterschiede in den Meinungen von Personen aus unterschiedlichen Berufsgruppen zeigen (siehe Kapitel 5.2 und 5.3)⁴ Wie an den Kreisdiagrammen in Abbildung 4.11 ebenfalls ablesbar ist, bleibt die relative Häufigkeit der vertretenen Berufsgruppen über alle Runden hinweg annähernd konstant, womit nach der Diskussion in Kapitel 4.1.3 eine wichtige Bedingung für den Erfolg der Delphi-Befragung erfüllt ist.

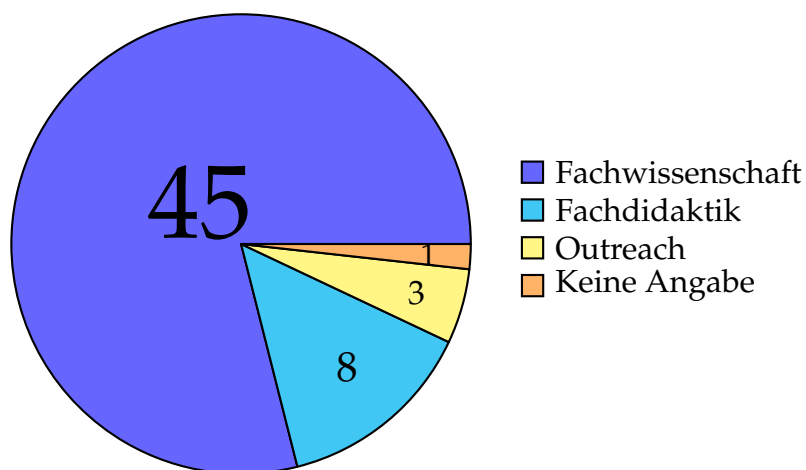
Analog zu den Berufsgruppen sind in Abbildung 4.12 die Verteilungen der Länder dargestellt, in welchen die in den Runden 2 und 3 teilnehmenden Expertinnen und Experten hauptsächlich mit der Teilchenphysik „sozialisiert“ wurden (siehe Definition eines „Sozialisierungslands“ in Kapitel 4.1.3). Die Daten wurden mithilfe von Item 1 im Online-Fragebogen 2 sowie mit Item 3 im Online-Fragebogen 3 erhoben (siehe entsprechende Abschnitte zur Instrumentbeschreibung). Erkennbar dominiert in beiden Befragungsrunden der Anteil an Teilnehmenden mit Deutschland als Sozialisierungsland: In Runde 2 macht die Gruppe „Deutschland“ ca. 61 % und in Runde 3 ca. 66 % der jeweiligen Gesamtstichprobe aus. Die Dominanz wurde erwartet, da sich unter den zur Befragung eingeladenen Personen eine Mehrheit an Deutschen befand. Wie in Kapitel 4.1.3 erörtert, stellt es ein interessantes Forschungsanliegen dar, ob sich bei den Ergebnissen der Fachwissensmodellierung Unterschiede

³ Die zuvor angekündigte Verwendung von Tätigkeitsfeldern zur eindeutigen Zuordnung in Berufsgruppen in Runde 1 war aufgrund der sehr detaillierten Berufsbezeichnungen, welche die Expertinnen und Experten angegeben haben, nicht nötig. Das entsprechende Item in Runde 1 wurde im Rahmen der Studie daher nicht weiter ausgewertet.

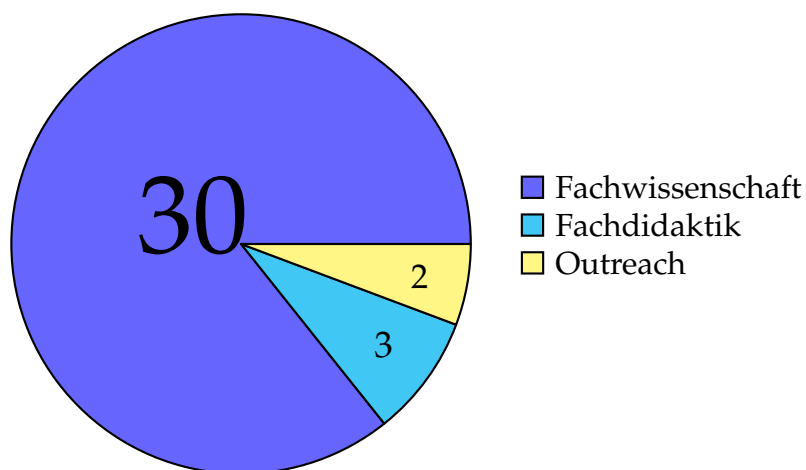
⁴ In Befragungsrunde 1 wurden noch keine statistischen Gruppenunterschiede untersucht, da die erste Befragung qualitativ auf die Benennung teilchenphysikalischer Themen ausgerichtet war.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4.11: Absolute Teilnahmehzahlen der drei Berufsgruppen unter den teilnehmenden Expertinnen und Experten in a) Befragungsrunde 1, b) Befragungsrunde 2 und c) Befragungsrunde 3. „Fachwissenschaft“ bezeichnet wissenschaftliches Hochschulpersonal aus der Teilchenphysikforschung, „Fachdidaktik“ das wissenschaftliche Hochschulpersonal aus der Physikdidaktik und „Outreach“ Mitarbeitende aus der teilchenphysikbezogenen Öffentlichkeitsarbeit.

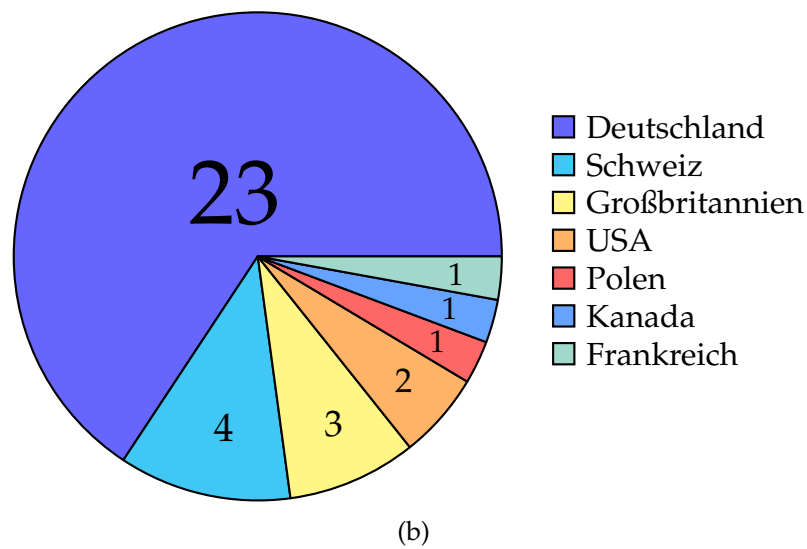
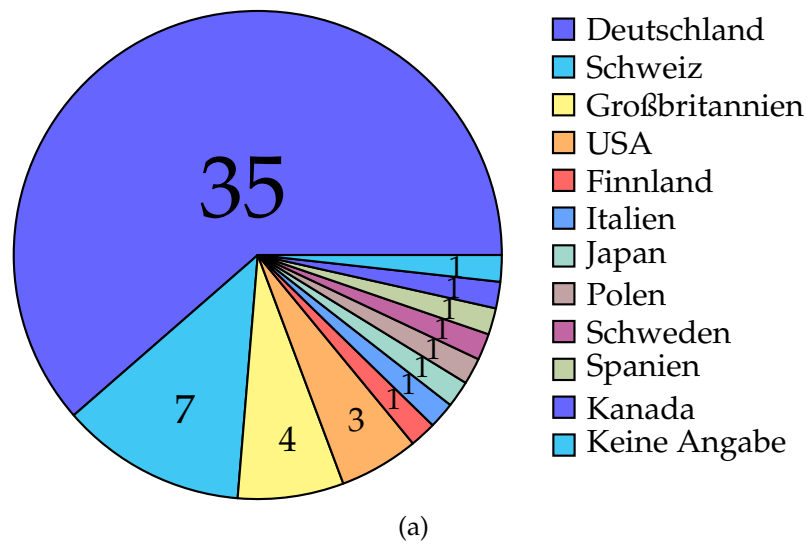


Abbildung 4.12: Absolute Zahlen an teilnehmenden Expertinnen und Experten aus den verschiedenen „Teilchenphysik-Sozialisierungsländer“ in a) Befragungsrunde 2 und b) Befragungsrunde 3

in den Meinungen von Personen mit unterschiedlichen Sozialisierungsländern - insbesondere zwischen Deutschland und anderen Ländern - zeigen. Dieser Frage wird im Rahmen der Auswertung der Befragungsrunden 2 und 3 nachgegangen (siehe Kapitel 5.2 und 5.3). Bezüglich der dargestellten Verteilungen der Länder in Abbildung 4.12 lässt sich ebenfalls feststellen, dass sich in den Befragungsrunden 2 und 3 eine ähnliche Zusammensetzung von relativen Häufigkeiten bestimmter Länder zeigt: Nach der Dominanz von Deutschland gaben die meisten Teilnehmenden in absteigender Reihenfolge die Schweiz, Großbritannien oder die USA als Sozialisierungsland an. Es kann somit ein weiteres Mal die annäherungsweise Konstanz von Stichprobencharakteristika über Befragungsrunden hinweg bestätigt werden.

Als letzte erhobene demographische Variable in den Expertisebefragungen sind in Abbildung 4.13 Häufigkeitsverteilungen des prozentualen Arbeitszeitanteils dargestellt, welchen die Teilnehmenden der drei Runden mit außeruniversitärer Wissenschaftsvermittlung (*Outreach*) verbringen. Wie in Kapitel 4.3.2 erläutert, soll mithilfe dieser Größe festgestellt bzw. überprüft werden, in wie weit bzw. ob die Expertinnen und Experten die Qualifizierungsbedingung „teilweise berufliche Beschäftigung mit der schulniveau-adäquaten Außendarstellung von Teilchenphysik“ erfüllen. Die gezeigten Verteilungen repräsentieren die Daten, welche durch Item 3 in Online-Fragebogen 1, Item 3 in Online-Fragebogen 2 sowie durch Item 5 in Online-Fragebogen 3 erhoben wurden. Während der Arbeitszeitanteil in Runde 1 lediglich durch eine Mehrfachauswahl auf einer diskreten Skala mit vier äquidistanten Bereichen zwischen 0 % und 100 % ermittelt wurde, konnten Teilnehmende den Anteil in den Runden 2 und 3 auf einer kontinuierlichen Skala mit ganzzahlig-einstellbaren Werten zwischen 0 % und 100 % angeben. Grund für die Veränderung in späteren Runden war das Ziel einer differenzierteren Aufklärung der recht uniformen Verteilung mit sehr vielen Werten im niedrigsten Bereich in Runde 1, welcher einen Anteil zwischen 0 % und 25 % beinhaltet (siehe Abbildung 4.13a). Vergleicht man die Verteilungen aller Runden miteinander, so zeigt sich ein sehr ähnliches Bild: Darin beschäftigt sich ein Großteil der Teilnehmenden mit einem Anteil von maximal 20 % mit der außeruniversitären Wissenschaftsvermittlung und es finden sich geringere Anzahlen ungefähr gleichverteilt über die restliche Skala. Die Verteilungen des *Outreach*-Anteils sind angesichts der Berufsgruppenverteilungen in den Runden zu erwarten, da der Hauptteil der Teilnehmenden der fachwissenschaftlichen Forschung entspringt, in welcher außeruniversitäre Wissenschaftsvermittlung in der Regel nur ein sehr kleines Arbeitsfeld darstellt. Es kann jedoch durch den Vergleich der Verteilungen augenscheinlich eine annähernd konstante Zusammensetzung des

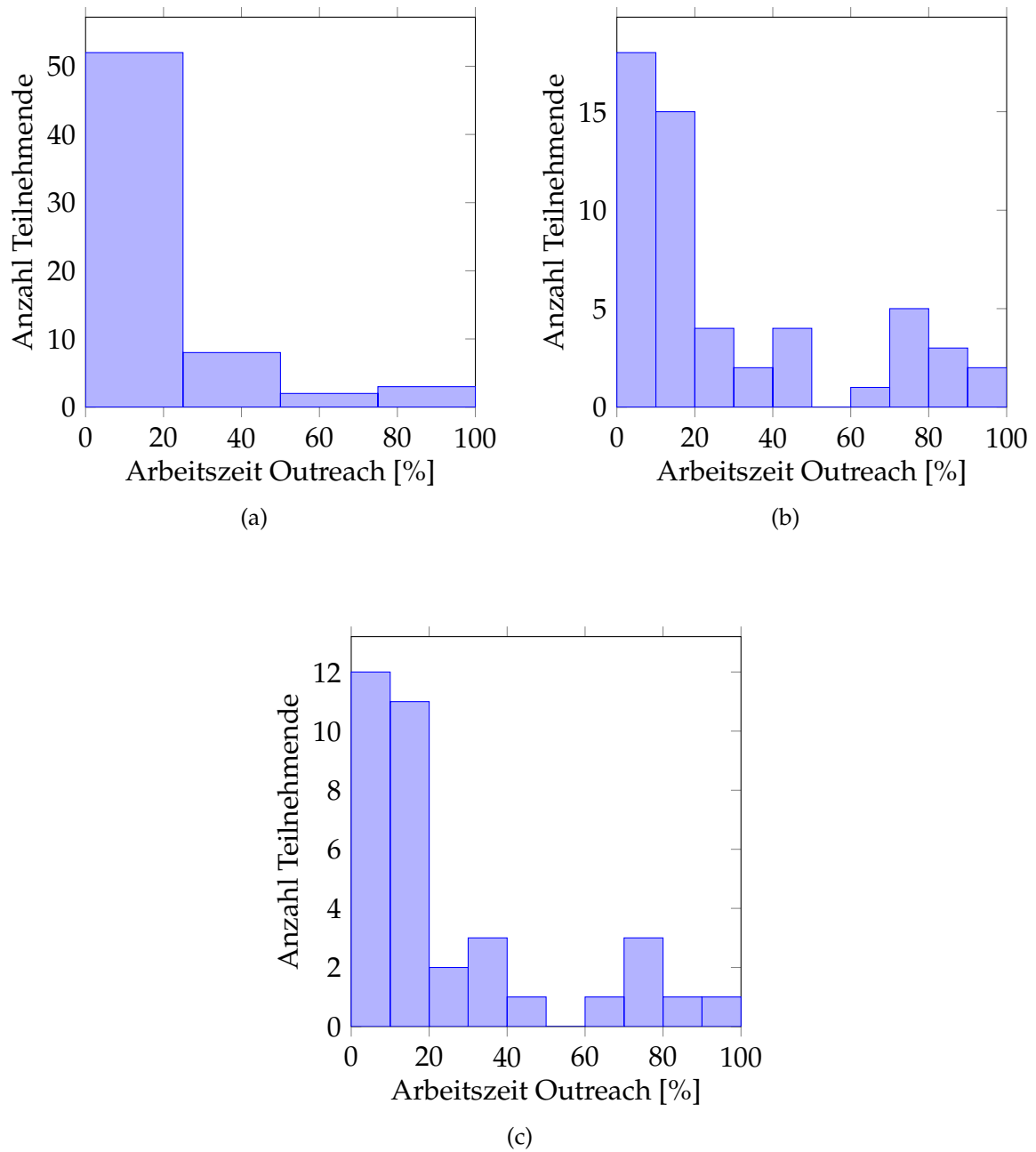


Abbildung 4.13: Verteilungen der prozentualen Arbeitszeit, die mit außeruniversitärer Wissenschaftsvermittlung (*Outreach*) verbracht wird von den Expertinnen und Experten in a) Befragungsrunde 1, b) Befragungsrunde 2 und c) Befragungsrunde 3.

Outreach-Anteils unter den Teilnehmenden über alle Runden hinweg bestätigt werden. Zusätzlich lässt sich feststellen, dass mit Mittelwerten der Verteilungen von $M \approx 21\%$ (Runde 1)⁵, $M \approx 27\%$ (Runde 2) sowie $M \approx 24\%$ (Runde 3) das Qualifikationskriterium für die Expertinnen und Experten - eine vorhandene Beschäftigung mit außeruniversitärer Wissenschaftsvermittlung - erfüllt ist.

Stichprobencharakteristika der Lehrkräftebefragung

Im Folgenden sind die Eigenschaften der Lehrkräftestichprobe beschrieben, welche im Rahmen des Frageblocks zu den demographischen Eckdaten der Teilnehmenden innerhalb des Online-Fragebogens zur Lehrkräftebefragung erhoben wurden (siehe Abschnitt 4.3.4).

Analog zur Expertisebefragung wurden bei den Lehrkräften mithilfe von Item 2 zunächst die Länder ermittelt, in welchen die Teilnehmenden aktuell unterrichten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Es zeigt sich wiederum eine Dominanz deutscher Lehrkräfte (44 %), jedoch im Vergleich zu den Expertisebefragungen weniger stark ausgeprägt. Insgesamt ergibt sich eine Fülle an 32 verschiedenen Ländern, in welchen die Lehrkräfte unterrichten. Die Vielfalt gibt Hinweise auf die Internationalität, mit welcher Lehrkräfteprogramme am *CERN* durchgeführt werden. In Kapitel 5.3 wird untersucht, ob sich Unterschiede in der eingeschätzten Relevanz bestimmter teilchenphysikalischer Themen insbesondere zwischen deutschen und nicht-deutschen Teilnehmenden zeigen.

Wie in Kapitel 4.3.4 herausgearbeitet, ist das Lehrkräftegremium zur Beantwortung der Delphi-Fragestellung geeignet, wenn es Erfahrung im Unterrichten teilchenphysikalischer Themen und dementsprechend Wissen über die schulrelevante Teilchenphysik besitzt. Um den Grad an Erfahrung und Wissen messbar zu machen, wurden in der Lehrkräftebefragung einerseits objektive Kenngrößen wie die Unterrichtsfächer (Item 4), die Anzahl an Schuljahren (Item 3), eine absolvierte Teilchenphysikausbildung (Item 5), besuchte Teilchenphysikfortbildungen (Item 6) sowie gehaltener Unterricht zur Teilchenphysik (Item 7) erhoben. Es wird von einer qualifizierten Lehrkraft erwartet, dass sie Physik unterrichtet, seit einer gewissen Zeit im Schuldienst tätig ist, mindestens eine Fortbildung besucht oder eine Teilchenphysikausbildung absolviert sowie bereits Unterricht zur Teilchenphysik gehalten hat.

⁵ Der Mittelwert in Runde 1 ergibt sich durch die Mittelpunkte der vier Prozentbereiche gewichtet mit der jeweiligen Personenanzahl. Für die beiden anderen Runden sind die Mittelwerte direkt durch die konkreten Prozentangaben der Personen berechenbar.

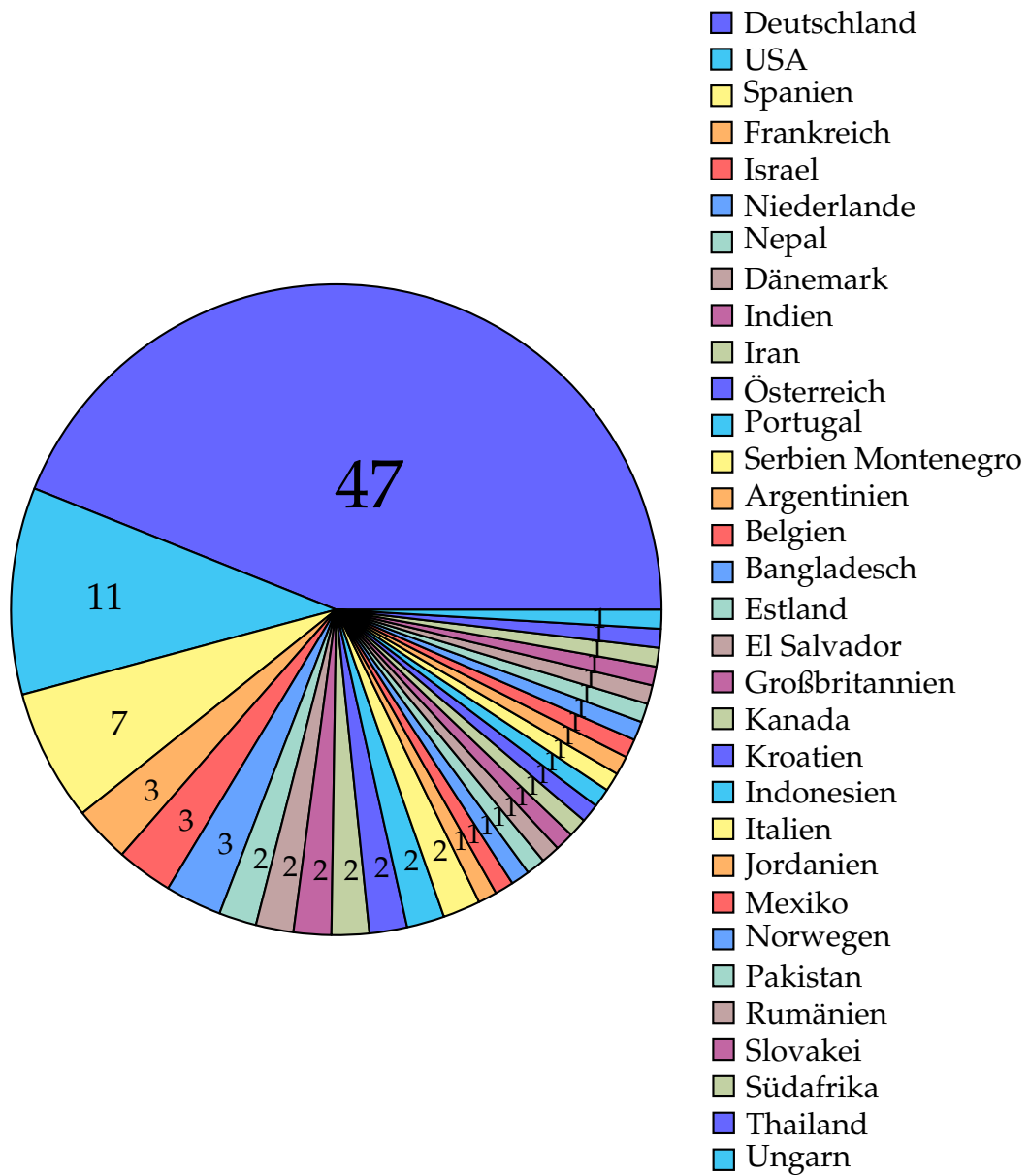


Abbildung 4.14: Diagramm zu absoluten Häufigkeiten, mit welchen die Teilnehmenden in der Lehrkräftebefragung die verschiedenen Unterrichtsländer angegeben haben

Andererseits wurde die Kompetenz der Lehrkräfte bezüglich der schulrelevanten Teilchenphysik im Lehrkräftefragebogen auch subjektiv durch Selbsteinschätzung der Vertrautheit mit dem Thema (Item 8) erhoben.

Die Auswertung der beschriebenen relevanten demographischen Variablen ergab zunächst die Feststellung, dass alle teilnehmenden Lehrkräfte das Fach Physik unterrichten.

Die Verteilung der geleisteten Schuldienstjahre ist in Abbildung 4.15a dargestellt und belegt mit einem Mittelwert von ca. 21 Jahren, dass es sich insgesamt um ein sehr erfahrenes Gremium handelt.

Die Selbstauskunft der Teilnehmenden darüber, ob sie eine Teilchenphysikausbildung oder -fortbildung absolviert bzw. bereits Unterricht zur Teilchenphysik gehalten haben, ergibt folgendes Bild: Während sich bereits ein Großteil von Lehrkräften (69 %) in der Ausbildung mit dem Thema beschäftigt hat, nahmen sogar 96 % der Teilnehmenden an mindestens einer Fortbildung teil und ein überwältigender Anteil von 94 % hat bereits Teilchenphysik im Unterricht thematisiert.

Schließlich findet sich in Abbildung 4.15b eine Verteilung der selbst eingeschätzten Vertrautheit mit der schulrelevanten Teilchenphysik auf der dargestellten sechsstufigen Skala von „überhaupt nicht vertraut“ bis „sehr vertraut“. Augenscheinlich fühlt sich die Mehrheit der Lehrkräfte - bis auf einige wenige Ausnahmen - mindestens „eher vertraut“ (Stufe 4) und fast die Hälfte aller Teilnehmenden fühlt sich „vertraut“ (Stufe 5) mit dem Thema.

Insgesamt kann demnach sowohl durch objektive als auch durch subjektive Maße bestätigt werden, dass die Lehrkräftestichprobe den Bedingungen gerecht wird, welche sie als ein Gremium mit für die vorgestellte Delphi-Studie entsprechender Expertise qualifiziert.

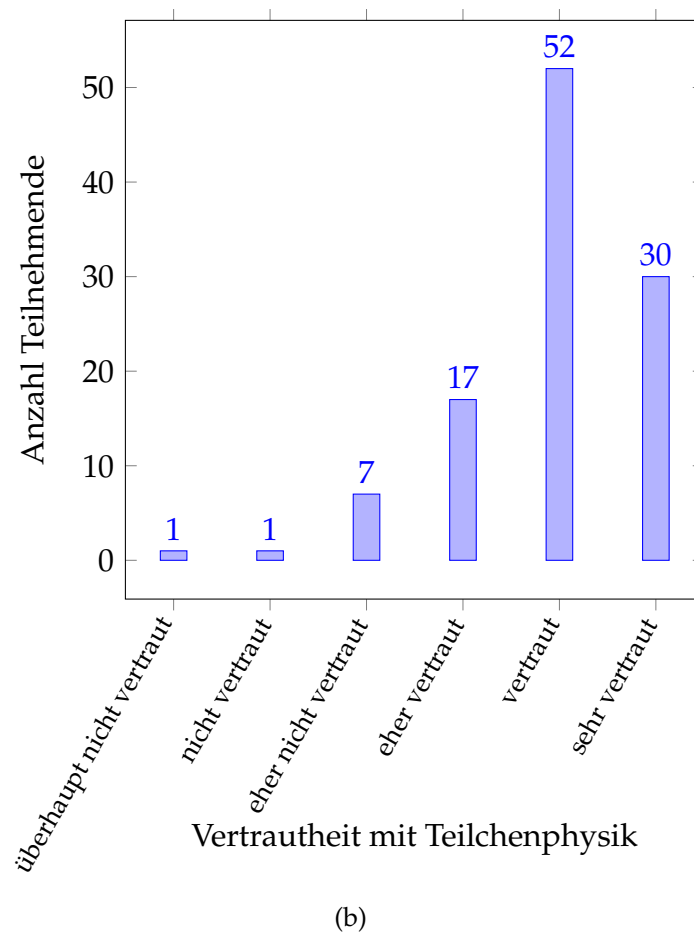
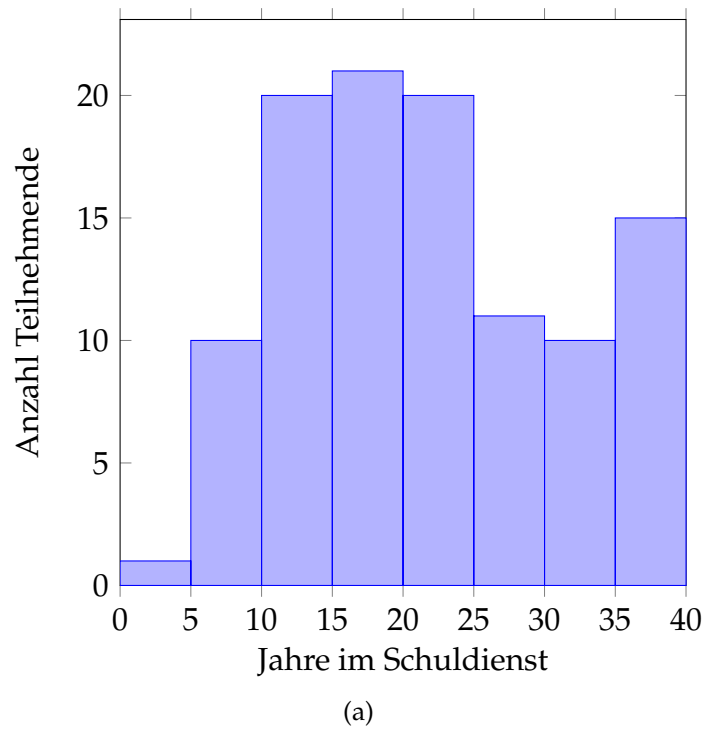


Abbildung 4.15: Stichprobencharakteristika der Lehrkräftebefragung: a) Verteilung von Anzahl an geleisteten Jahren im Schuldienst, b) Verteilung der eingeschätzten Vertrautheit mit der schulrelevanten Teilchenphysik

5

Auswertung und sukzessive Ergebnisbildung

Ziel dieses Kapitels ist die Ergebnisdarstellung der vorgestellten Delphi-Studie sowie die Beschreibung der Analyseschritte und Zwischenergebnisse, welche im Delphi-Forschungsdesign sukzessiv zur Ergebnisbildung und damit zur Beantwortung der in Kapitel 3 formulierten Forschungsfragen beigetragen haben.

Nachfolgend wird zunächst getrennt über die Datenauswertungen berichtet, die nach jeder der drei Befragungsrunden durchgeführt wurden und deren Ergebnisse jeweils als Evaluationsgrundlage für die Befragungsteilnehmenden der Folgerunde dienten (siehe Ablauf des Forschungsdesigns in Kapitel 4.2). Die Struktur der Abschnitte 5.1 bis 5.3 folgt daher dem gleichen Aufbau: Es wird zu Beginn noch einmal die Forschungsleitfrage aufgegriffen, welche durch die betreffende Befragungsrunde beantwortet werden soll. Auf Basis der Leitfrage wird eine Analysestrategie für die jeweils erhobenen Daten entwickelt und die Anwendung der Analyseschritte wird anschließend getrennt im Detail beschrieben. Schließlich werden die Analyseergebnisse im Hinblick auf die Beantwortung der Forschungsfragen bzw. den aktuellen Status des zu modellierenden Fachwissen sowie im Hinblick auf eine weitere Verwendung in der nächsten Befragungsrunde interpretiert. Die finalen Ergebnisse der Modellierung der Fachwissensdimension *Inhaltsbereich* für die Teilchenphysik sind in Abschnitt 5.3.6 zusammengefasst. In Abschnitt 5.4 wird daran anknüpfend die theoriegeleitete Modellierung der Dimension *Wissensarten* beschrieben.

5.1 Auswertung Runde 1: Themenfeldstrukturierung

Wie in Kapitel 4.2 ausführlich dargelegt, befasst sich die erste Phase der Delphi-Studie mit der Strukturierung des von Lehrkräften benötigten Fachwissens in der Dimen-

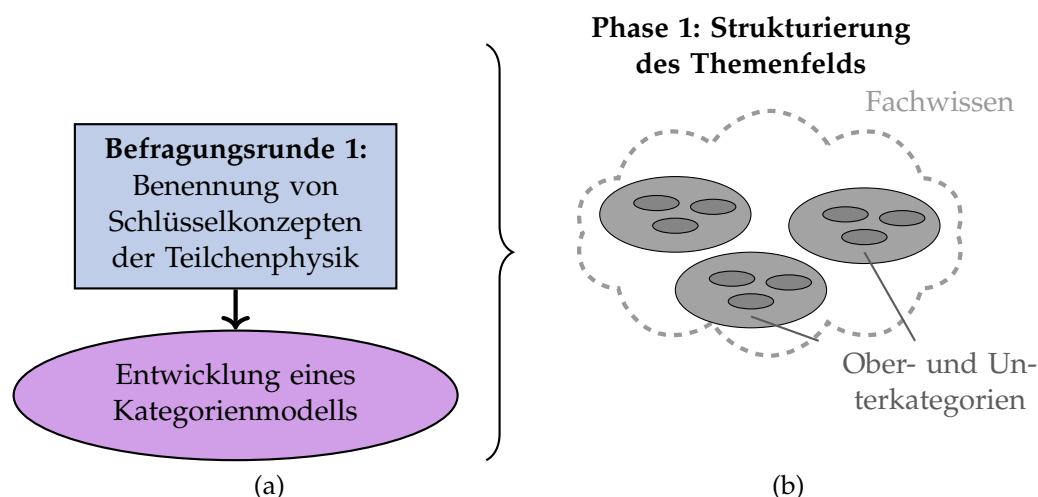


Abbildung 5.1: Ausschnitt aus dem Forschungsdesign für die erste Phase der Delphi-Studie: a) Befragungsrunde und Auswerteabschnitt, b) Status des zu modellierenden Fachwissens

sion *Inhaltsbereich* für die Teilchenphysik. Eine Vorstellung des korrespondierenden Fragebogeninstruments, welches zur Datenerhebung in der ersten Befragungsrunde des Expertisegremiums eingesetzt wurde, fand bereits in Kapitel 4.3.2 statt. Der für Phase 1 relevante Ausschnitt aus dem Forschungsdesign der vorgestellten Arbeit ist zur Übersicht noch einmal in Abbildung 5.1 dargestellt.

Für das Strukturierungsziel wurde an früherer Stelle Leitfrage L1 erarbeitet, die mithilfe des Expertisegremiums in Befragungsrunde 1 beantwortet werden soll:

Leitfrage 1 (L1): Welche Themen sind als fundamental wichtige Schlüsselkonzepte der Teilchenphysik potenziell relevant für das Fachwissen von Lehrkräften, die Teilchenphysik unterrichten?

Die Frage zielt zunächst auf eine Benennung bzw. eine Identifikation der potenziell relevanten Themen ab. Das zu modellierende Fachwissen erlangt durch die Identifikationen eine erste Form von Strukturierung, in dem zentrale Schlüsselkonzepte aus der Masse aller Themen des Fachwissensbereichs ausgezeichnet bzw. herausgegriffen werden. Der Grad an Struktur kann mithilfe einer Zusammenfassung inhaltlich stark zusammenhängender Themen zu größeren Oberthemen zusätzlich erhöht werden. Wie nachfolgend beschrieben, findet die Identifikation und Zusammenfassung während der Auswertung der in Befragungsrunde 1 erhobenen Daten vorrangig mithilfe einer sogenannten Qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring, 2015) statt. Der Forschungslogik der Inhaltsanalyse folgend (siehe unten), werden die herausgearbeitenden Themen und Oberthemen innerhalb des Fachwissens im weiteren Verlauf als *Kategorien* und *Hauptkategorien* bezeichnet.

Die **Datengrundlage**, auf Basis derer die Identifikation von relevanten Kategorien für das Lehrkräftefachwissen durchzuführen ist, wurde mithilfe von Item 4 im Online-Fragebogen 1 generiert, welches im Fragetyp „Offene Nennung“ nach den potenziell relevanten teilchenphysikalischen Schlüsselkonzepten fragt (siehe Kapitel 4.3.2). Für jedes genannte Schlüsselkonzept stand den Teilnehmenden ein neues Eingabefeld für Freitextantworten ohne Zeichenbeschränkung zur Verfügung und die Anzahl an Nennungen pro Person war nicht begrenzt. Alle $N = 65$ teilnehmenden Expertinnen und Experten in Befragungsrunde 1 machten mindestens eine Angabe bei der Beantwortung von Item 4. Maximal wurden 14 Nennungen von einer Person angegeben. Insgesamt umfassen die auf diese Weise erhobenen Daten 364 separate Texteinheiten, welche einen variierenden Umfang zwischen einem einzigen Wort und mehreren Sätzen aufweisen. Es handelt sich somit um nicht-numerisches qualitatives Datenmaterial, auf Grundlage dessen mithilfe qualitativer Auswertemethodik die potenziell relevanten Fachwissenskategorien herausgearbeitet werden sollen.

Wie in Kapitel 4.1.3 festgelegt, soll bei der Identifikation der Fachwissenskategorien der Meinung von Personen aus schwächer vertretenen Berufsgruppen ein höheres Gewicht bei der Benennung von Schlüsselkonzepten in Runde 1 beigemessen werden. In die Datengrundlage für die nachfolgend beschriebene Auswertung wird daher ebenfalls die mithilfe von Item 1 im Online-Fragebogen erhobene Berufsgruppe eines jeden Teilnehmenden miteinbezogen. Die als Freitextantworten vorliegenden Berufsbezeichnungen wurden hierzu bei der Datenaufbereitung in drei verschiedene Berufsgruppen eingeteilt. Sie repräsentieren die Bereiche Fachwissenschaft, Fachdidaktik und Öffentlichkeitsarbeit. Die Berufsangaben liegen demnach zur weiteren Datenanalyse als Faktor mit drei Level vor. Eine Übersicht der Verteilung der Berufsgruppen innerhalb der Stichprobe aus Runde 1 findet sich in Abbildung 4.11a in Kapitel 4.4.

Für die Auswertung der vorgestellten Daten wurde eine vierschrittige Analysestrategie entwickelt, welche nachfolgend im Detail erläutert und begründet wird:

1. Qualitative Inhaltsanalyse mit induktiver Kategorienbildung (Mayring, 2015)
2. Triangulation der Kategorien mit Standardliteratur
3. Kategorienreduktion
4. Aufbereitung des Kategoriensystems für Befragungsrunde 2

Schritt 1: Die Qualitative Inhaltsanalyse

Für die Identifikation von Fachwissenskategorien aus den offenen Antworten der Expertinnen und Experten wird aus nachfolgend erläuterten Gründen die Methode der Qualitativen Inhaltsanalyse eingesetzt, wie sie in der speziellen Form „mit induktiver Kategorienbildung“ für den deutschsprachigen Raum maßgeblich von Mayring (2015) geprägt wurde.

Wie auch in der vorgestellten Arbeit liegt einer qualitativen Datenanalyse zumeist eine offene Fragestellung zugrunde, wodurch die Analyse im Forschungsprozess einen explorativen Charakter erhält und zur Theoriebildung dient. Unter dem Einsatz interpretativer Techniken zielt die Analyse in der Regel auf das Auffinden mehr oder minder distinktiver Kategorien in textbasierten bzw. kommunikationsbasierten Dokumenten ab. Für die Kategorienfindung stehen verschiedene Verfahren wie beispielsweise die *Qualitative Inhaltsanalyse* (Mayring, 2015), die *Interpretative Phänomenologische Analyse* (Smith, 1996) oder die *Grounded-Theory-Methodologie* (Glaser & Strauss, 1967) zur Verfügung, welche vorrangig der Psychologie bzw. der Soziologieforschung entspringen. Wie ein großer Teil der Autorenschaft betonen z.B. auch Döring und Bortz, dass „eine generelle Überlegenheit einer Methode ... nicht zu konstatieren (ist), vielmehr sind die Passung der Methode hinsichtlich Forschungsproblem und Datenmaterial entscheidend.“ (Döring & Bortz, 2016, S. 600). Die Qualitative Inhaltsanalyse wurde als Auswertemethode für das vorgestellte Datenmaterial und die durch Leitfrage L1 formulierte Forschungsfragestellung gewählt, da sie aufgrund ihres fokussierten Ablaufmodells für die ökonomische Analyse von Datensätzen mit einer größeren Anzahl an Personen bzw. Fällen geeigneter erscheint als andere qualitative Methoden (siehe Ablaufmodell im nächsten Kapitel). Des Weiteren kann die Qualitative Inhaltsanalyse im Gegensatz zu vielen anderen Methoden nicht nur dazu eingesetzt werden, um latente Textinhalte wie beispielsweise indirekt geäußerte Gefühle und Stellungnahmen der Textverfassenden zu identifizieren. Vielmehr können mit diesem Verfahren auch ausschließlich im Text benannte manifeste Inhalte wie beispielsweise teilchenphysikalische Konzepte herausgearbeitet werden. Schließlich erlaubt die Qualitative Inhaltsanalyse durch ihr Endprodukt eines systematischen Kategoriensystems einen in der vorliegenden Arbeit erwünschten, vereinfachten Übergang zu quantitativen Methoden wie unter anderem Häufigkeitsanalysen zu den Anzahlen von Nennungen zu bestimmten Kategorien im Text.

Im Rahmen der Studie zu Befragungsrunde 1 wird aus den genannten Gründen eine Qualitative Inhaltsanalyse durchgeführt, um fachwissenschaftliche Kategorien

zu identifizieren und in Form eines Kategoriensystems mit thematischen Haupt- und Unterkategorien zusammenzustellen. Als besondere Auswerteform wird nach Mayring (2015) die *induktive Kategorienbildung* gewählt. Hierbei werden die Kategorien ausschließlich auf Basis von Informationen aus den auszuwertenden Texteinheiten konstruiert. Ein weiteres charakteristisches Merkmal dieser speziellen Auswerteform liegt darin, dass unter dem Ziel der Textzusammenfassung nur Textelemente berücksichtigt und analysiert werden, welche ein bestimmtes Qualifizierungskriterium erfüllen (Mayring, 2015, S. 68). Im vorliegenden Fall werden nur Texteinheiten ausgewertet, in welchen Aussagen zu potenziell für das Fachwissen relevanten Schlüsselkonzepten gemacht werden. Abschnitt 5.1.1 berichtet über das konkrete Ablaufmodell sowie die Ergebnisse der Qualitativen Inhaltsanalyse.

Schritt 2: Triangulation der Kategorien mit Standardliteratur

Obgleich bei der Kategorienbildung ein induktives Vorgehen unter weitestgehender Vernachlässigung theoretischer Vorkenntnisse über das Fachwissen gewählt wird, so muss dennoch berücksichtigt werden, dass es sich bei teilchenphysikalischem Fachwissen um kein gänzlich unbekanntes Konstrukt handelt. Wie bereits in Kapitel 2 angesprochen, setzt sich das Fachwissen von Lehrkräften aus denselben zentralen Schlüsselkonzepten zusammen, um welche - zumindest teilweise - auch das Fachwissen von Teilchenphysikforschenden organisiert ist. Es ist deshalb unerlässlich die rein induktiv gefundenen Fachwissenskategorien noch einmal auf ihre Konsistenz mit der Fachwissenschaft hin zu überprüfen.

Hierzu wird im zweiten Schritt der Analysestrategie nach der Qualitativen Inhaltsanalyse eine Triangulation der Kategorien mit Standardliteratur durchgeführt. Die Triangulation basiert auf einem Abgleich der Titel bzw. des Inhalts der Kategorien mit universitärer Einführungsliteratur zur Teilchenphysik. Solch ein Vorgehen zur Triangulation von Analyseergebnissen mit Fachliteratur findet sich häufig in der qualitativen Forschung. Wie bereits erläutert, argumentieren z.B. Döring und Bortz (2016), dass bei qualitativen Datenanalysen die Anpassung der Forschungsmethodik an das Datenmaterial und an die Forschungsfragestellung von entscheidender Bedeutung ist. Im Zuge dessen werden in der Regel verschiedene Analysestrategien miteinander kombiniert, was unter anderem eine sogenannte Theorietriangulation der Ergebnisse aus weiteren eingesetzten Methoden beinhalten kann. Durchführung und Ergebnisse der Triangulation werden in Abschnitt 5.1.1 im Anschluss an die Qualitative Inhaltsanalyse beschrieben.

Schritt 3: Kategorienreduktion

Der dritte Schritt in der Analysestrategie fokussiert auf eine Verminderung der Anzahl an konstruierten Kategorien.

Wie sich im Folgenden zeigen wird, umfasst das durch die Inhaltsanalyse etablierte Kategoriensystem aufgeteilt in 10 Hauptkategorien eine Vielzahl von 59 Unterkategorien. Diese wurden als kleinste unterscheidbare thematische Einheiten aus den Textantworten der Expertinnen und Experten herausgearbeitet. Da ein gut strukturierter, übersichtlicher Evaluationsgegenstand als Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Konsensfindungen eines Gremiums in Delphi-Befragungen zu betrachten ist (siehe Kapitel 4.1.1), bietet sich eine Reduktion der Anzahl an Kategorien im konstruierten Kategoriensystem an. Hierdurch steht ein übersichtlicherer Modellentwurf für das Fachwissen als Evaluationsgrundlage in der anschließenden Befragungsrunde zur Verfügung.

Die Reduktion findet in der vorgestellten Arbeit auf Basis einer Analyse der Häufigkeiten statt, mit welchen einzelne Kategorien von den Befragten in Runde 1 genannt wurden. Es findet somit ein Übergang von der *Qualitativen* Inhaltsanalyse hin zu einer *Quantitativen* Inhaltsanalyse (siehe z.B. Früh, 2011) statt. Letztere zielt in der Regel darauf ab, Merkmale eines Dokumentes bzw. allgemein von qualitativem Datenmaterial auf Basis eines bereits etablierten Kategoriensystems zu quantifizieren. Aus der hier implementierten und nachfolgend im Detail erläuterten Häufigkeitsanalyse lässt sich die angestrebte Kategorienreduktion erreichen, indem Kategorien, deren fachwissenschaftlicher Inhalt selten von den Expertinnen und Experten genannt wurde - bis hin zu nur einer Nennung von einer einzigen Person - eher vom Kategoriensystem auszuschließen sind als häufig genannte Kategorien.

Zusätzlich werden jedoch Kategorien, welche von Personen aus schwächer vertretenen Berufsgruppen genannt wurden, ein höheres Gewicht bei der Häufigkeitsanalyse gegeben und demzufolge trotz seltener Nennung in manchen Fällen von der Reduktion ausgeschlossen. Durch die ungleiche Gewichtung der Nennungen von Expertinnen und Experten aus verschiedenen Berufsgruppen wird dem bereits diskutierten Ausgleich der zahlenmäßig ungleichen Verteilung von Berufsgruppen innerhalb der Expertisestichprobe Rechnung getragen. Die Durchführung der Häufigkeitsanalyse und die daraus resultierende Kategorienreduktion sind Gegenstand von Abschnitt 5.1.2.

Schritt 4: Aufbereitung des Kategoriensystems

Als letzter Schritt in der Analysestrategie der Daten aus Befragungsrunde 1 findet die Aufbereitung des verbliebenen Kategoriensystems für eine Darstellung in der zweiten Befragungsrunde statt. Um die Darstellungsweise des Systems über die Kategorienreduktion hinaus noch übersichtlicher zu gestalten, wurden hierzu Unterkategorien zusammengefasst, welche inhaltlich sehr stark zusammenhängen oder sich in Teilaspekten sogar exakt überschneiden. Im Rahmen der Aufbereitung des verbliebenen Kategoriensystems wurden schließlich für alle Haupt- und Unterkategorien Kurzbeschreibungen erarbeitet, welche über den reinen Titel hinaus weitere Informationen zum jeweiligen Kategorieninhalt enthalten. Als Grundlage für die Kurzbeschreibungen diente das in Analyseschritt 1 entworfene Kodiermanual, welches zur ursprünglichen Konstruktion der Kategorien verwendet wurde. Die vollständige Aufbereitung des Kategoriensystems für Befragungsrunde 2 ist am Ende von Abschnitt 5.1.2 beschrieben.

5.1.1 Konstruktion eines Kategorienmodells

Der nachfolgende Abschnitt stellt zunächst die Qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) vor, durch welche anhand des von den Expertinnen und Experten in Befragungsrunde 1 generierten Textmaterials induktiv fachwissenschaftliche Kategorien gebildet wurden, die als erster Entwurf für das inhaltlich von Lehrkräften benötigte Fachwissen aufzufassen sind. Daran anknüpfend berichtet der zweite Teil des Abschnitts über den Prozess der Triangulation der gefundenen Kategorien mit Standardliteratur der Teilchenphysik.

Nach Mayring (2015) befasst sich die Qualitative Inhaltsanalyse mit der Untersuchung von Kommunikationsdokumenten und zeichnet sich bei den im Mittelpunkt stehenden Kategorien durch ein systematisches, theorie- und regelgeleitetes Vorgehen aus. Die Systematik der Methode manifestiert sich in einem vor der Analyse festzulegenden Ablaufmodell für die Untersuchungsschritte, welches eine intersubjektive Nachvollziehbarkeit bzw. Nachprüfbarkeit der Analyseschritte und Ergebnisse erlaubt. In Anlehnung an das von Mayring (2015, S. 62) vorgeschlagene allgemeine inhaltsanalytische Ablaufmodell wurde unter der Wahl der speziellen Auswerteform der induktiven Kategorienbildung ein Modell aus insgesamt neun konsekutiven Analyseschritten entworfen und auf das bereits vorgestellte qualitative Datenmaterial angewandt. Die verschiedenen Schritte werden nachfolgend erläutert.

1. Bestimmung des Ausgangsmaterials

Die Festlegung des Materials und seiner formalen Charakteristika unter Berücksichtigung der Entstehungssituation wurden bereits im vorangegangenen Abschnitt zur Datenvorstellung beschrieben. Es sei hier noch einmal zusammengefasst, dass es sich um Freitextantworten von Expertinnen und Experten handelt, die im Online-Fragebogen 1 das Item 4 vom Typ „offene Nennung“ bearbeitet haben. Die Bearbeitung war freiwillig, die Frage wurde jedoch von jedem der N=65 Teilnehmenden beantwortet. Die insgesamt 364 Textabschnitte entstammen 364 Freitextfeldern. Laut Fragebogenanweisung sollte für jedes zu nennende Schlüsselkonzept ein neues Feld verwendet werden¹. Die Textabschnitte liegen zur Analyse als fortlaufendes Textdokument mit markierten Textabschnittsrändern vor. Das Textdokument listet alle Nennungen einer Person vor allen Nennungen der nächsten Person auf.

2. Richtung der Analyse

Als Richtung bzw. Ziel der Analyse wurde bestimmt, dass nur im Text beschriebene Gegenstände analysiert und keine Aussagen über das Dokument als Ganzes oder über Intentionen bzw. Gefühlsäußerungen der sich äussernden Personen getätigt werden.

3. Theoriegeleitete Differenzierung der Fragestellung

Die der Analyse zugrundeliegende Fragestellung entspricht der Leitfrage L1 („Welche Themen sind als fundamental wichtige Schlüsselkonzepte ... relevant für das Fachwissen von Lehrkräften ...?). L1 wurde in der bisher vorgestellten Arbeit bereits aus der Theorie abgeleitet (siehe z.B. Kapitel 4.2). Durch den Frageoperator „Welche ...“ wird nach Mayring (2015, S. 85) die Wahl für eine induktive statt deduktive Kategorienbildung impliziert.

4. Festlegung des Selektionskriteriums des Materials und des Abstraktionsniveaus der zu bildenden Kategorien

Als Selektionskriterium für den Einbezug von Textabschnitten in die Analyse wurde ebenfalls bereits festgelegt, dass die auszuwählenden Abschnitte Informationen zu teilchenphysikalischen Schlüsselkonzepten enthalten müssen².

¹ Wie sich in der späteren Analyse gezeigt hat, wurde die Anweisung häufig ignoriert, so dass manche Personen nur ein Textfeld verwendeten, in welchem verschiedene Kategorien identifiziert wurden.

² Gegenanzeige: Trotz der eindeutigen Fragestellung im Fragebogen benannten einige Expertinnen und Experten keine teilchenphysikalischen Konzepte, sondern verwendeten die Freitextfelder beispielsweise um eine Rückmeldung zu den Zielen der Befragung zu äußern.

Das Abstraktionsniveau gibt an, wie konkret bzw. abstrakt die zu bildenden Kategorien formuliert werden sollen. Es wurde für die angestrebten thematischen Kategorien definiert, dass sie entweder auf Basis eines direkt benannten physikalischen Begriffs oder durch die eindeutige Beschreibung eines physikalischen Konzepts auch ohne direkte Nennung im Text gebildet werden sollen.

5. Definition der Analyseeinheiten

Als letzter vorbereitender Schritt wurden die Analyseeinheiten bestimmt. Als Kodiereinheit gilt der kleinste auszuwertende Textteil, der zu einer Kategorie gezählt werden darf. Im vorliegenden Fall stellt die Kodiereinheit ein einziges Substantiv dar. Die Kontexteinheit gibt dagegen den größten auszuwertenden Textteil an und hierfür wurde eine ganze Nennung, sprich der Text aus einem ganzen freien Textfeld, festgelegt.

Schließlich wurde für die Reihenfolge der Analyseeinheiten, in welcher die Textteile untersucht werden, dafür entschieden, zunächst alle von einer Person produzierten Texte und danach erst die Texte der nächsten Person auszuwerten. Dadurch können eventuell erklärende Zusammenhänge einzelner uneindeutiger Aussagen aufgelöst werden.

6. Durcharbeitung des Materials: Kategorienbildung

Der zentrale Schritt in der Qualitativen Inhaltsanalyse stellt die Durcharbeitung des Materials dar, wobei nach Mayring (2015, S. 87) nacheinander alle Analyseeinheiten dahingehend untersucht werden, ob sie das Selektionskriterium erfüllen. Tritt dieser Fall ein, wird eine Kategorie induktiv sehr nah am Text formuliert. Ist das Kriterium das nächste Mal erfüllt, wird untersucht, ob es sich um eine bereits vorhandene Kategorie handelt oder eine neue Kategorie gebildet werden muss.

Auf diese Weise wurde das vorgestellte Ausgangsmaterial untersucht und ein Satz aus insgesamt 59 Kategorien gebildet. Im Gegensatz zu Mayrings Empfehlung wurde dabei die Neubildung von Kategorien jedoch nicht nach ca. 50 % an durchgearbeitetem Text abgebrochen, wonach die bestehenden Kategorien nur noch in bestimmten Punkten ergänzt werden sollten. Es zeigte sich stattdessen, dass sich die Antworten der Expertinnen und Experten derart vielfältig und unterschiedlich darstellten, dass die induktive Neubildung von Kategorien bis zum Ende der Durcharbeitung des gesamten Materials fortgesetzt wurde.

7. Zusammenstellung der Ergebnisse

Das Ergebnis der Materialdurcharbeitung ist ein Kategoriensystem, zu welchem für jede Kategorie korrespondierende Textpassagen im Ausgangsmaterial vorliegen. Wie bereits erwähnt, ergab sich eine Anzahl von 59 Kategorien, die in den Abbildungen 5.2 und 5.3 als hellgrau-unterlegte Kästen dargestellt sind.

8. Interpretation der Ergebnisse

Die konstruierten Kategorien als Ergebnis der Inhaltsanalyse müssen nach Mayring (2015) noch einmal in Bezug auf das ursprüngliche Forschungsanliegen interpretiert werden.

Neben dem ersten Forschungsanliegen der reinen Identifikation von relevanten Schlüsselkonzepten für das Fachwissen von Lehrkräften wurde zu Beginn von Kapitel 5.1 die Bedeutung einer Zusammenfassung von Kategorien zu größeren thematischen Komplexen im Hinblick auf eine Erhöhung des Grads an Strukturiertheit für das zu modellierende Fachwissen herausgearbeitet. Im Zuge dessen wurden die 59 konstruierten Kategorien nach der Inhaltsanalyse insgesamt 10 größeren Hauptkategorien zugeordnet, welche als dunkelgrau-unterlegte Kästen in den Abbildungen 5.2 und 5.3 dargestellt sind. Die Zuordnung und Benennung der Hauptkategorien fand auf Basis thematisch starker Zusammenhänge zwischen den Kategorien statt.

Wie bereits in Kapitel 2 diskutiert, ist auch die hier vollzogene Zuordnung von Themen zu größeren Themenkomplexen nicht ausschöpfend eindeutig, eine Validierung des vorgeschlagenen Zuordnungsschemas durch das Expertisegremium ist jedoch Ziel der nachfolgenden Befragungsrunde 2.

9. Anwendung der Gütekriterien

Abschließend muss überprüft werden, ob die durchgeführte Inhaltsanalyse forschungsmethodischen Gütekriterien entspricht.

Die Gültigkeit bzw. die Validität der Methode wird - wie bereits angedeutet - Gegenstand von Befragungsrunde 2 sein: Eine Überprüfung der Inhaltsvalidität des konstruierten Kategoriensystems geht hierzu der Frage nach, ob das System auch wirklich das zu modellierende Fachwissen in all seinen Aspekten abbildet. In Bezug auf die Zuverlässigkeit bzw. Reliabilität der durchgeführten Inhaltsanalyse andererseits hebt Mayring (2015) die sogenannte *Intercoderreliabilität* als Quantifizierungsmaß für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hervor. Die Intercoderreliabilität gibt an, in wie weit die Zuordnungen von Kategorien zu

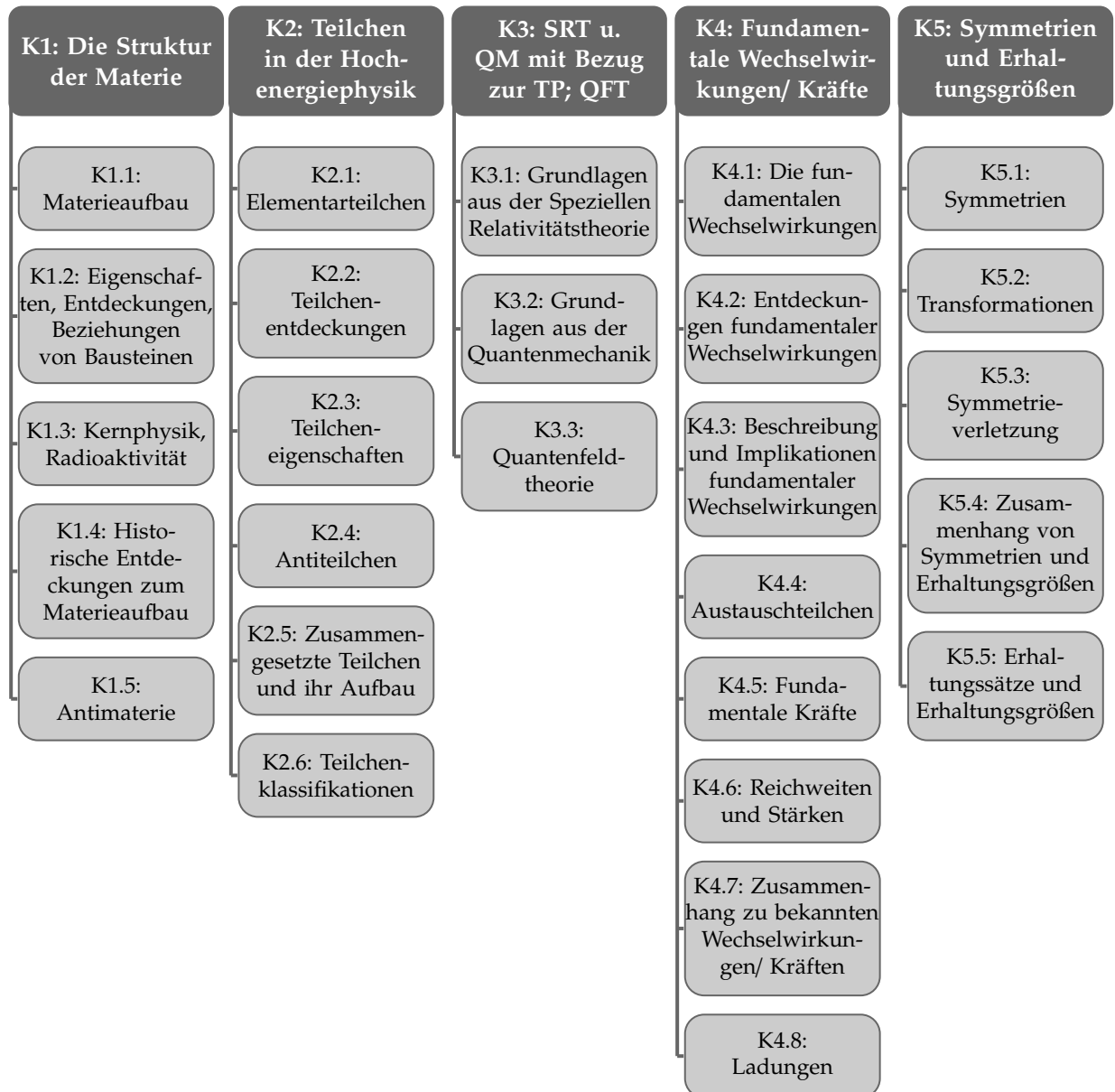


Abbildung 5.2: Teil 1 des Kategoriensystems aus der Qualitativen Inhaltsanalyse der Daten aus Befragungsrunde 1: Die von den Expertinnen und Experten benannten Schlüsselkonzepte sind in Hauptkategorien (dunkelgrau) und Unterkategorien (hellgrau) geordnet.

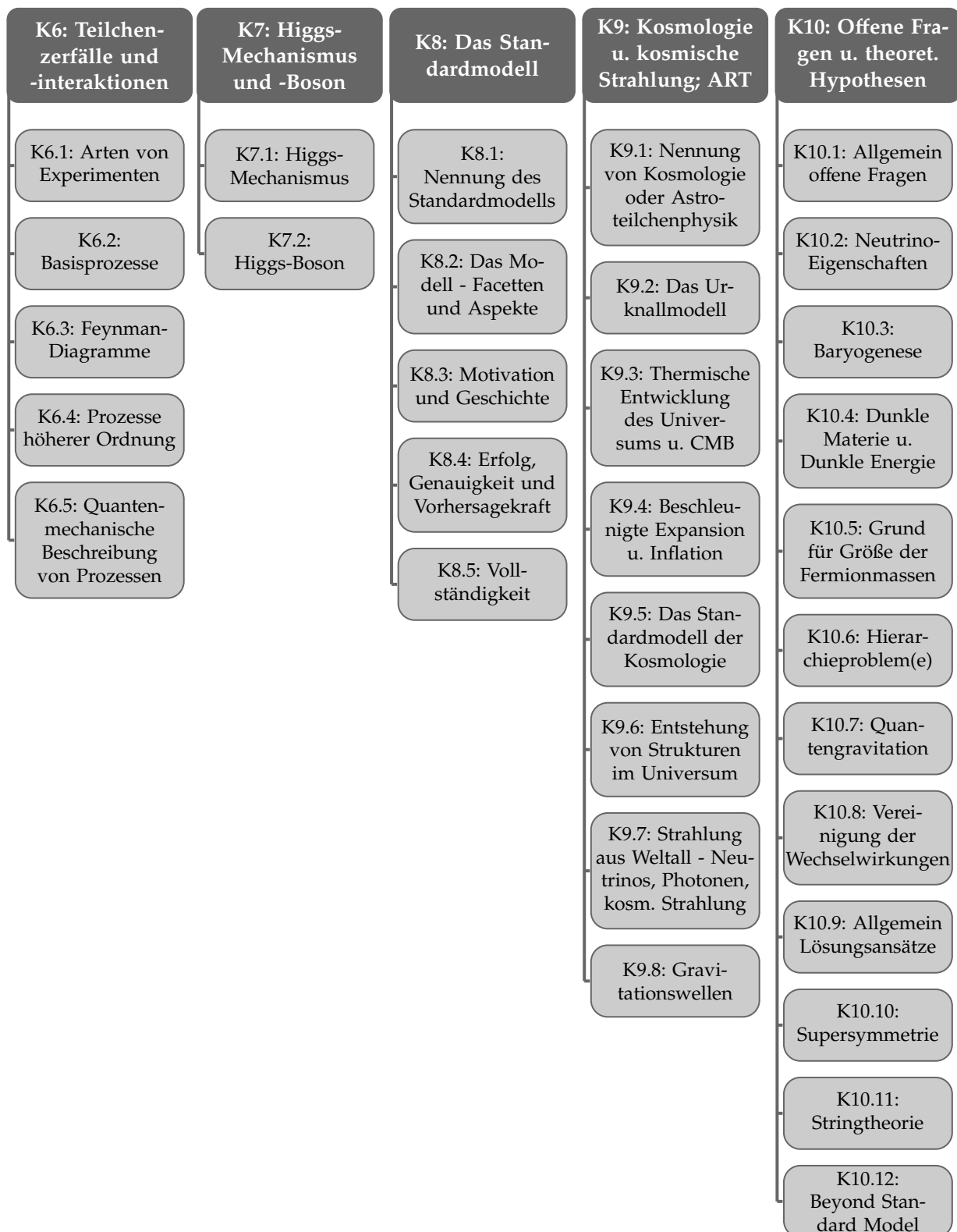


Abbildung 5.3: Teil 2 des Kategoriensystems aus der Qualitativen Inhaltsanalyse der Daten aus Befragungsrunde 1: Die von den Expertinnen und Experten benannten Schlüsselkonzepte sind in Hauptkategorien (dunkelgrau) und Unterkategorien (hellgrau) geordnet.

Textstellen (*Codes*) von zwei unabhängig arbeitenden Personen (*Codern*) übereinstimmen, die das gleiche Kategoriensystem, jedoch unbearbeitetes Rohdatenmaterial zur Zuordnung erhalten. Für die Berechnung der InterCoderreliabilität für nominalskalierte Kategoriensysteme empfehlen Wirtz und Caspar (2002) die Größe *Cohens* κ , welche folgendermaßen definiert ist:

$$\kappa = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e} \quad (5.1)$$

Hierbei bezeichnet p_0 den relativen Anteil an Fällen, in welchen zwei Personen Textstellen die gleiche Kategorie zuordnen und p_e den geschätzten relativen Anteil an Übereinstimmungen, der durch zufällige Codezuweisungen entsteht. Im einfachsten Fall wird p_e durch den Kehrwert der Gesamtanzahl aller vergebenen Codes berechnet. κ kann Werte zwischen ± 1 annehmen, wobei Wirtz und Caspar (2002) in Anlehnung an weitere Autoren bei Werten von $\kappa > .6$ von einer guten und bei Werten von $\kappa > .75$ von einer sehr guten Übereinstimmung berichten.

Die InterCoderreliabilität für das vorgestellte Kategoriensystem konnte im Rahmen der vorliegenden Studie durch folgendes Vorgehen berechnet werden: Zunächst wurde auf Basis der konstruierten Kategorien mit den zusammenhängenden Textpassagen ein sogenannter Kodierleitfaden erstellt, welcher - geordnet nach den Hauptkategorien - zu jeder Unterkategorie eine Kurzbeschreibung, Ankerbeispiele und spezielle Kodierregeln enthält. Ziel des Leitfadens ist eine Anleitung zur Kategorienzuzuweisung von Textmaterial, welche so eindeutig ist, dass beliebig viele Personen denselben Textpassagen immer dieselbe Kategorie zuweisen würden. Der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Kodierleitfaden ist in den ersten vier Spalten der Tabelle in Anhang B.1 abgebildet.

Mithilfe des Kodierleitfadens ordneten zwei auf die Verwendung des Kodierleitfadens trainierte Personen Textpassagen aus dem gesamten Ausgangsmaterial der Inhaltsanalyse Kategorien zu. Die sogenannte Kodierung wurde mithilfe des Programms MAXQDA (VERBI Software, 1989-2019) durchgeführt. Programmintern konnte im Anschluss die Zahl an Gesamtcodes und an Codeübereinstimmungen zwischen den Personen bestimmt werden. Daraus resultierend ergab sich für den Einbezug aller Kategorien eine InterCoderreliabilität von $\kappa = .95$, was nach obigen Ausführungen als sehr gute Übereinstimmung und damit als Überprüfung der Reliabilität der Inhaltsanalyse aufzufassen ist.

Abschließend sei erwähnt, dass eine hohe Übereinstimmungsrate erwartet wurde, da sich die auszuwertenden Kategorien auf manifeste physikalische Inhalte beziehen, welche vermutlich weniger Raum für Zweideutigkeiten bei der Kategorienzuweisung erlauben als latente Inhalte.

Nach der Erstellung und Überprüfung des Kategoriensystems im Rahmen der Qualitativen Inhaltsanalyse wurden die erarbeiteten fachwissenschaftlichen Kategorien im zweiten Schritt der übergeordneten Analysestrategie einer Triangulation mit Standardliteratur aus der Teilchenphysik unterzogen. Die Triangulation fand auf einem Abgleich der Kategorien mit den Themen statt, die in weitverbreiteter universitärer Einführungsliteratur zur Teilchenphysik auftauchen. Als Quellen für den Abgleich wurden die Lehrwerke von Berger (2014), von Bleck-Neuhaus (2013), von Demtröder (2017) sowie von Povh, Rith, Scholz, Zetsche und Rodejohann (2014) verwendet. Die Titel jeder einzelnen erarbeiteten Kategorie bzw. bekannte Synonyme der in den Titeln enthaltenen Begriffe wurden zunächst im Rahmen der Kapitelüberschriften der Lehrwerke gesucht. Wurde keine Übereinstimmung in den Titeln gefunden, so wurde in den Kapitelinhalten nach Beschreibungen der Konzepte recherchiert, welche den Kategoriendefinitionen zugrunde liegen. Durch das beschriebene Vorgehen konnte die Existenz aller 59 Kategorien aus der Inhaltsanalyse mit mindestens einer Nennung in einem der Lehrwerke belegt werden. Beispielbelege für jede Kategorie finden sich in der letzten Spalte in der Tabelle in Anhang B.1.

5.1.2 Modellentwurf für die Fachwissensdimension

Inhaltsbereich

Das im vorangegangenen Abschnitt etablierte System aus fachwissenschaftlichen Kategorien dient im Rahmen der vorgestellten Arbeit als Grundlage für einen ersten Modellentwurf für die Inhaltsdimension des von Lehrkräften potenziell benötigten Fachwissens in der Teilchenphysik. Der Entwurf soll - dem entwickelten Forschungsdesign folgend - von einem Expertisegremium in der zweiten Befragungsrunde inhaltlich validiert werden. Um das System nebeneinander stehender Kategorien - wie es in den Abbildungen 5.2 und 5.3 dargestellt wurde - in einen übersichtlichen Modellentwurf für die weitere Evaluation durch Expertinnen und Experten zu überführen, vervollständigen die nachfolgend beschriebenen Schritte der **Kategorienreduktion** sowie der **Aufbereitung des Kategoriensystems** die entwickelte Analysestrategie der Daten aus Befragungsrunde 1.

Wie zu Beginn des Kapitels erläutert, basiert die Reduktion der Kategorien - genauer gesagt der 59 Unterkategorien - auf einer Analyse der Häufigkeiten, mit welchen die Expertinnen und Experten in Befragungsrunde 1 Themen genannt haben, die den Kategorien zuzuordnen sind. Vereinfacht formuliert, wird hierbei die Zahl an Nennungen pro Kategorie ausgezählt, wodurch der angesprochene Übergang zu einer Quantitativen Inhaltsanalyse des vorgestellten Datenmaterials vollzogen wird. Auf Basis der Auszählungen sollen Kategorien vom System ausgeschlossen werden, welche deutlich seltener von den Teilnehmenden genannt wurden als andere Kategorien. Ausgehend von der Annahme, dass Personen, deren Antworten im Fragebogen insgesamt weniger Kategorien zugeordnet werden konnten, jeder Kategorie eine größere Bedeutung bzw. Relevanz für das Lehrkrätfachwissen beimessen, wird für die Auszählung der Häufigkeiten pro Kategorie nicht jeder Nennung das gleiche Gewicht gegeben. Stattdessen wird jede Nennung mit einem Personenfaktor gewichtet, welcher sich aus dem Kehrwert der Anzahl an Nennungen der Person zusammensetzt, die die entsprechende Nennung geäußert hat. Hat eine Person beispielsweise fünf verschiedene Nennungen gemacht, so ist ihr Personenfaktor $0,2$. Für jede Kategorie werden alle Nennungen - jeweils gewichtet mit den korrespondierenden Personenfaktoren - aufaddiert. Die Beispielperson trägt zu den aufsummierten Häufigkeiten für jede Kategorie, die sie benannt hat, jeweils nicht den Wert 1 sondern $1 * 0,2 = 0,2$ bei. Es ist zu betonen, dass bis hierhin für die derart berechneten Häufigkeiten alle Berufsgruppen gleichgewichtig berücksichtigt wurden.

In Abbildung 5.4 sind die auf diese Weise entstandenen Summen der gewichteten Anzahlen an Nennungen als Säulendiagramm für alle 59 fachwissenschaftlichen Unterkategorien dargestellt. Hierbei werden die Unterkategorien auf der horizontalen Achse durch ihre in Abschnitt 5.1.1 zugeordneten Kürzel symbolisiert. Zur Erstellung der gezeigten Verteilung - im Weiteren auch als *Rankingplot* bezeichnet - wurden die Unterkategorien in absteigender Reihenfolge nach der Größe der Summe der gewichteten Nennungen sortiert. Links im Schaubild befinden sich dabei Kategorien, welche von sehr vielen Teilnehmenden benannt wurden und ganz rechts nur vereinzelt benannte Kategorien. In der übersichtlichen Darstellungsweise der gewichteten Häufigkeiten in Abbildung 5.4 könnten nun ausgehend vom rechten Schaubildrand die Unterkategorien mit den niedrigsten Häufigkeitswerten aus dem Kategoriensystem ausgeschlossen werden. Wird berücksichtigt, dass rechts von der Unterkategorie K 10.8 („Vereinigung der Wechselwirkungen“) alle Unterkategorien auch nur von einer einzigen Person genannt wurden, so könnte dafür plädiert werden, alle Unterkategorien ab K 5.2 („Transformationen“) auszuschließen.

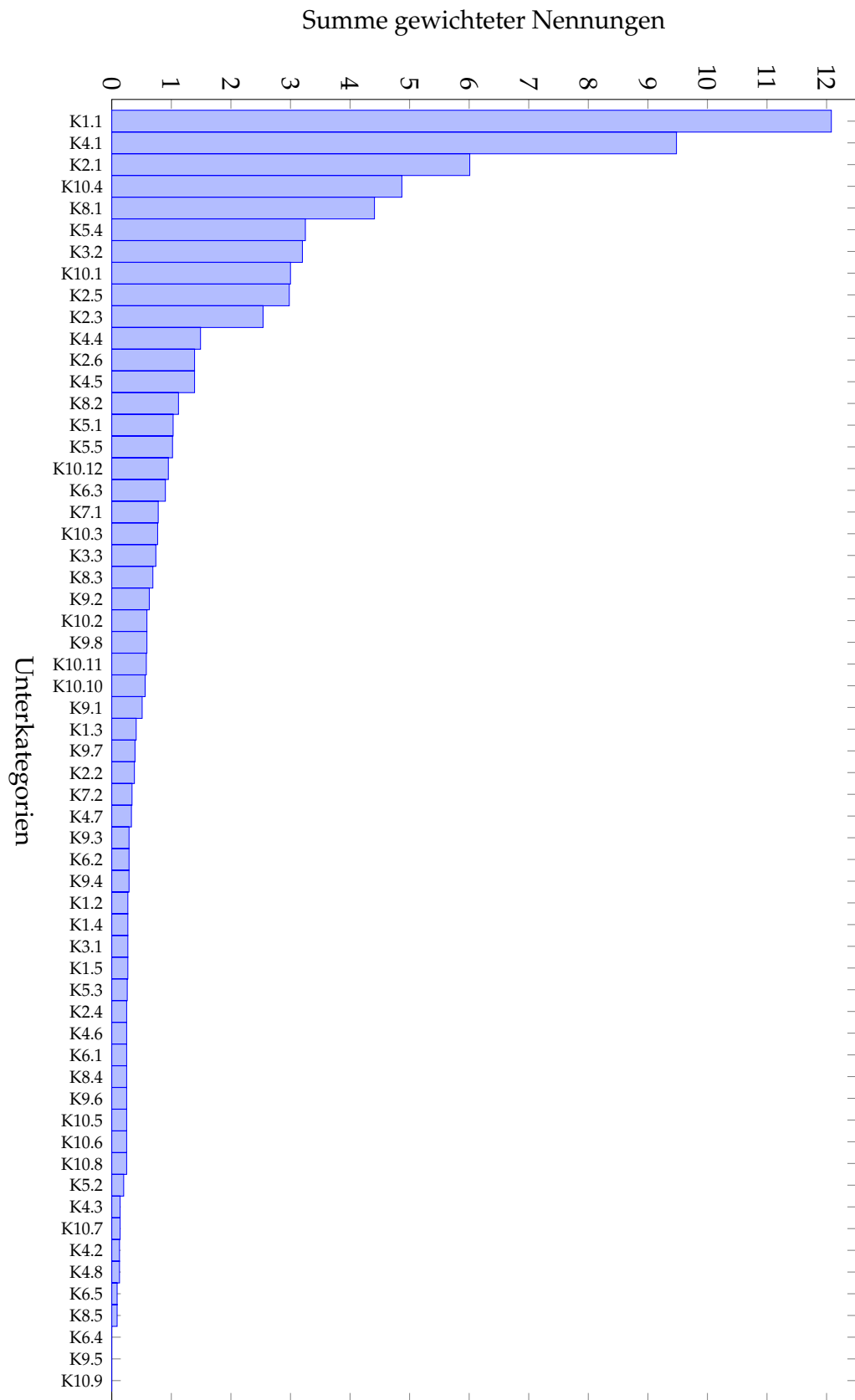
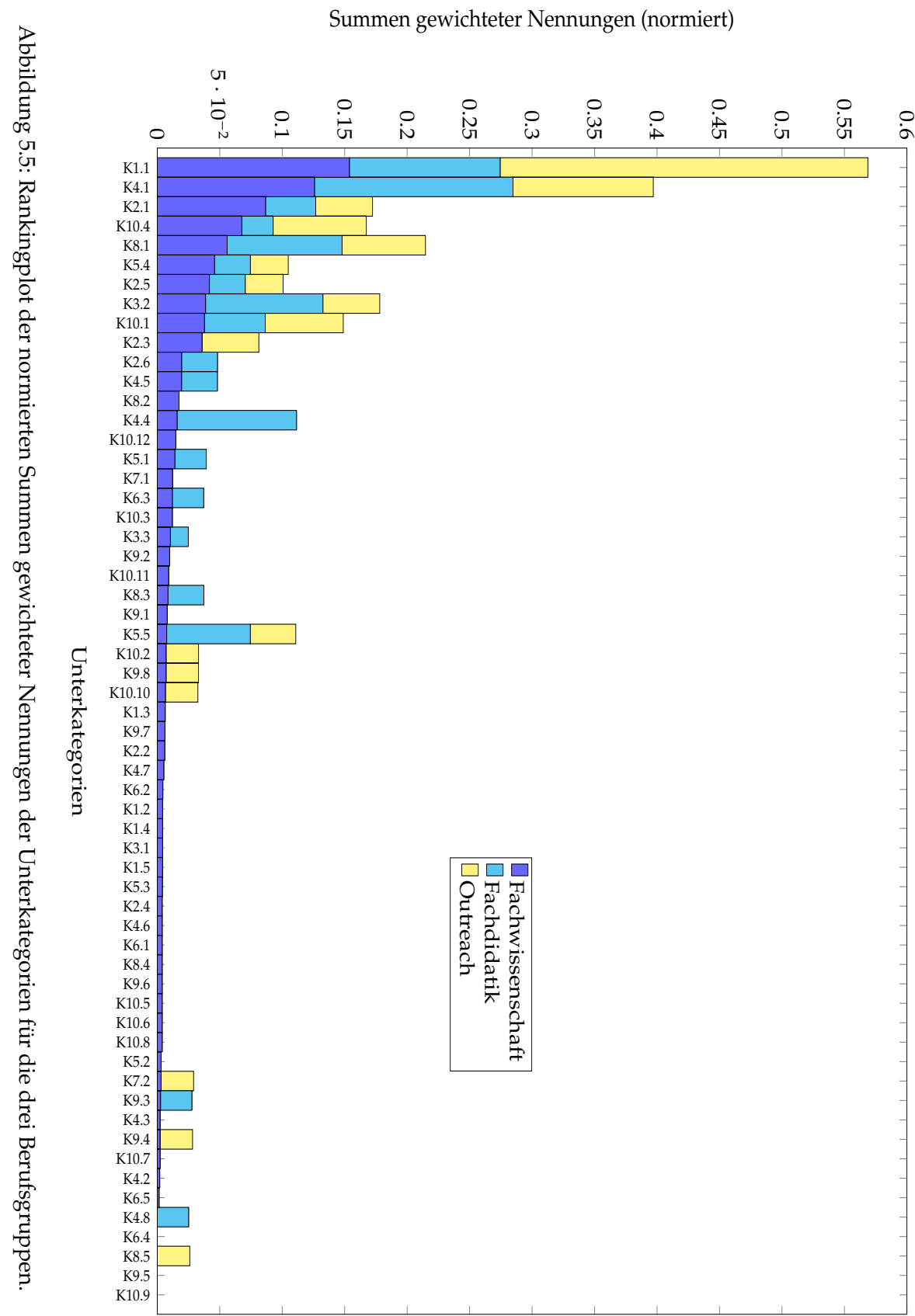


Abbildung 5.4: In absteigender Reihenfolge sortierte Häufigkeiten, mit welchen die Teilnehmenden in Runde 1 die Unterkategorien aus Abschnitt 5.1.1 benannt haben. Zur Summenbildung wurden die Nennungen mit Personenfaktoren gewichtet (siehe Fließtext).

Es muss jedoch noch eine weitere Überlegung in den Reduktionsvorgang miteinbezogen werden. Wie in der Analysestrategie festgehalten, soll der Meinung von Teilnehmenden aus schwächer vertretenen Berufsgruppen ein größeres Gewicht bei der Erstellung des Fachwissensmodells in Befragungsrunde 1 zukommen. In Kapitel 4.4 wurde analysiert, dass Personen aus den beiden Berufsgruppen „Fachdidaktik“ und „Outreach“ mit jeweils einem relativen Anteil von ca. 8 % gegenüber Personen aus der Gruppe „Fachwissenschaft“ mit ca. 85 % in der Stichprobe aus Runde 1 schwächer vertreten sind. Der Meinung von Mitgliedern aus den Gruppen „Fachdidaktik“ und „Outreach“ soll im Rahmen der diskutierten Häufigkeitsanalyse dadurch ein höheres Gewicht verliehen werden, dass Unterkategorien, die eigentlich der Reduktion unterliegen, doch im Kategoriensystem verbleiben, wenn Personen aus diesen beiden Gruppen die Kategorien verhältnismäßig häufig benannten (siehe unten).

Für die Häufigkeitsanalyse getrennt nach Berufsgruppen wurde zunächst wieder auf die zuvor beschriebene Weise je ein Rankingplot der gewichteten Häufigkeiten aller Unterkategorien für jede der drei Berufsgruppen erstellt, wobei der an früherer Stelle beschriebene Faktor Beruf zur Zuordnung der Antworten von Personen zu Berufsgruppen verwendet wurde. Die drei Rankingplots sind gemeinsam in Abbildung 5.5 dargestellt, wobei für die Sortierung der Unterkategorien auf der horizontalen Achse die gewichteten Häufigkeitswerte der Gruppe „Fachwissenschaft“ verwendet wurde. Zusätzlich wurden die Säulendiagramme aller drei Berufsgruppen auf den Wert 1 normiert, um einen besseren Vergleich von relativen Verteilungsunterschieden zu ermöglichen. Bei Untersuchung der Rankingplots in Abbildung 5.5 fallen bei einzelnen Kategorien für die Gruppen „Fachdidaktik“ und „Outreach“ Spitzenwerte in den Häufigkeiten auf, welche sich aus der gleichmäßig abfallenden Verteilung für die Gruppe „Fachwissenschaft“ herausheben. Sehr prominente Beispiele sind hier die Kategorien K 4.4 („Austauschteilchen“) und K 5.5 („Erhaltungssätze und Erhaltungsgrößen“), welche von der Personengruppe aus dem Bereich der Fachdidaktik verhältnismäßig häufiger genannt wurden als aus der Fachwissenschaftsgruppe. Auf der rechten Seite des Schaubilds - rechts der ursprünglich definierten Ausschlussgrenze zwischen K 10.8 und K 5.2 - zeigen sich ebenfalls deutliche Spitzenwerte in den Gruppen „Fachdidaktik“ und „Outreach“. Aufgrund der zuvor beschriebenen Argumentation, sind die entsprechenden fünf folgenden Kategorien nicht von der Reduktion und dem Ausschluss aus dem Kategoriensystem betroffen: K 7.2 („Higgs-Boson“), K 9.3 („Thermische Entwicklung des Universums und CMB“), K 9.4 („Beschleunigte Expansion und Inflation des Universums“), K 4.8 („Ladungen“) und K 8.5 („Vollständigkeit des Standardmodells“). Alle anderen Kategorien, welche



sich rechts der zuvor definierten Ausschlussgrenze befinden, werden aus dem im vorangegangenen Abschnitt etablierten Kategoriensystem entfernt. Die Reduktion betrifft die Kategorien K 5.2 („Transformationen“), K 4.3 („Beschreibung und Implikationen fundamentaler Wechselwirkungen“), K 10.7 („Quantengravitation“), K 4.2 („Entdeckungen fundamentaler Wechselwirkungen“), K 6.5 („Quantenmechanische Beschreibung von Prozessen“), K 6.4 („Prozesse höherer Ordnung“), K 9.5 („Das Standardmodell der Kosmologie“) und K 10.9 („Allgemeine Lösungsansätze“).

Nach der Kategorienreduktion wurde das verbliebene Kategoriensystem im letzten Schritt der Analyse der Daten aus Runde 1 für eine Verwendung in der zweiten Befragungsrunde aufgearbeitet. Ziel der Aufarbeitung ist die übersichtliche und klar umrissene Darstellung des Kategoriensystems als ersten Modellierungsentwurf für das Fachwissen von Lehrkräften.

In einem ersten Schritt der Aufarbeitung wurden inhaltlich sehr stark zusammenhängende Unterkategorien bzw. Unterkategorien, die sich sogar in Teilaspekten überschneiden bzw. synonym zueinander stehen, zusammengefasst. Beispielsweise erscheint die Unterscheidung von fundamentalen Wechselwirkungen (K 4.1) und fundamentalen Kräften (K 4.5) als nicht praktikabel, da die Mehrheit der fachwissenschaftlichen Literatur die Begriffe synonym verwendet. Genauso erscheint beispielsweise die Existenz der Kategorie K 8.1 („Nennung des Standardmodells“) zweckfrei, da die Kategorie durch die „reine Nennung“ inhaltslos ist und das Modell selbst noch einmal in K 8.2 („Das Modell mit seinen Facetten und Aspekten“) beschrieben wird.

Nach der Implentation der zuvor beschriebenen Kategorienreduktion und der hier erläuterten Zusammenfassung von Kategorien, ergibt sich ein finales Kategoriensystem aus Befragungsrunde 1 mit insgesamt 41 Unterkategorien zu den beibehaltenen 10 Hauptkategorien. Das Kategoriensystem ist in den Abbildungen 5.6 und 5.7 dargestellt und findet sich darüber hinaus im Online-Fragebogen zu Runde 2 (siehe Kapitel 4.3.3).

Zusätzlich zur Zusammenfassung von Kategorien umfasst die Aufbereitung des Kategoriensystems für Runde 2 die Erstellung von Kurzbeschreibungen für jede Kategorie. Wie in der Beschreibung des Befragungsinstruments zu Runde 2 in Kapitel 4.3.3 erläutert, dienen die Kurzbeschreibungen den teilnehmenden Expertinnen und Experten für einen erweiterten Überblick über den Inhalt der Kategorien und tragen so zu einer fundierteren Meinungsäußerung bei. Für die Erarbeitung der Kurzbeschreibungen wurde der Kodierleitfaden verwendet, welcher im Rahmen

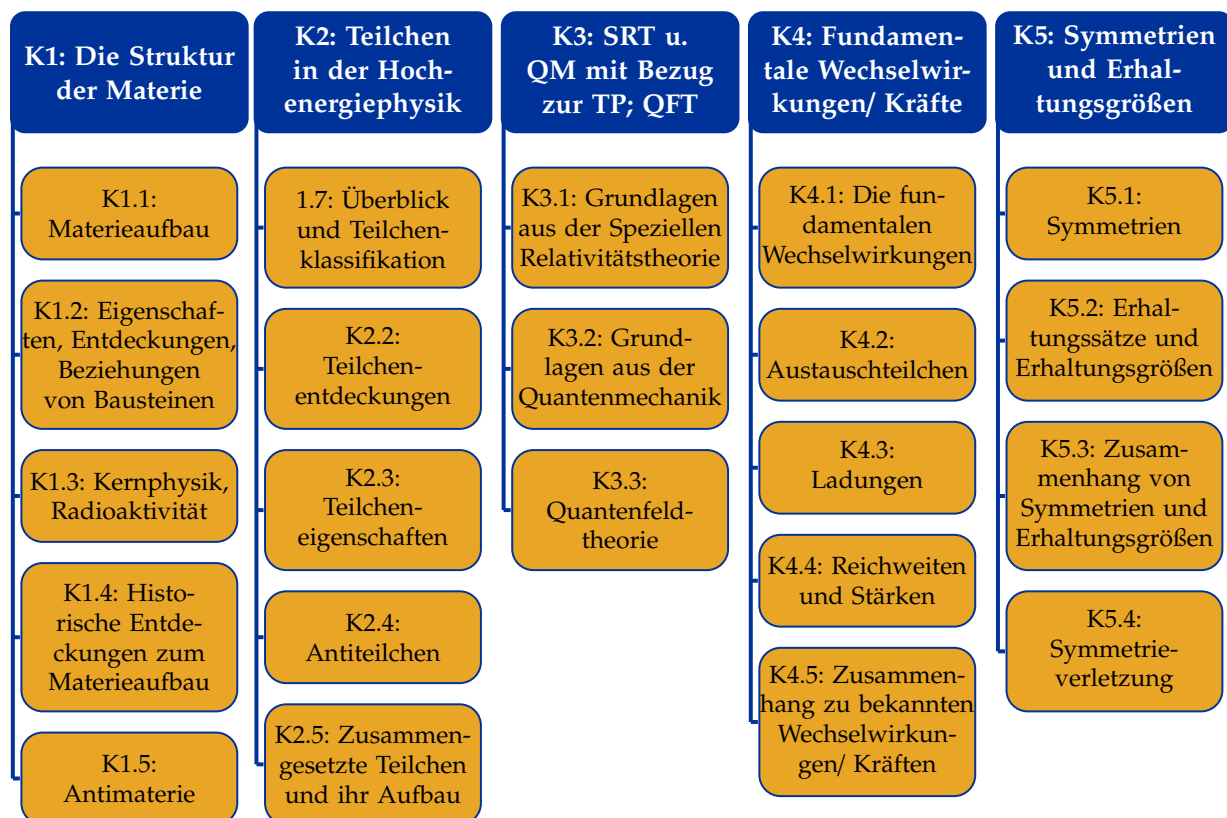


Abbildung 5.6: Teil 1 des finalen Systems an Fachwissenskategorien, welches als Modellentwurf für das Fachwissen von Lehrkräften mithilfe des Expertisegremiums in Runde 1 erarbeitet wurde. Hauptkategorien sind blau und Unterkategorien gelb dargestellt.

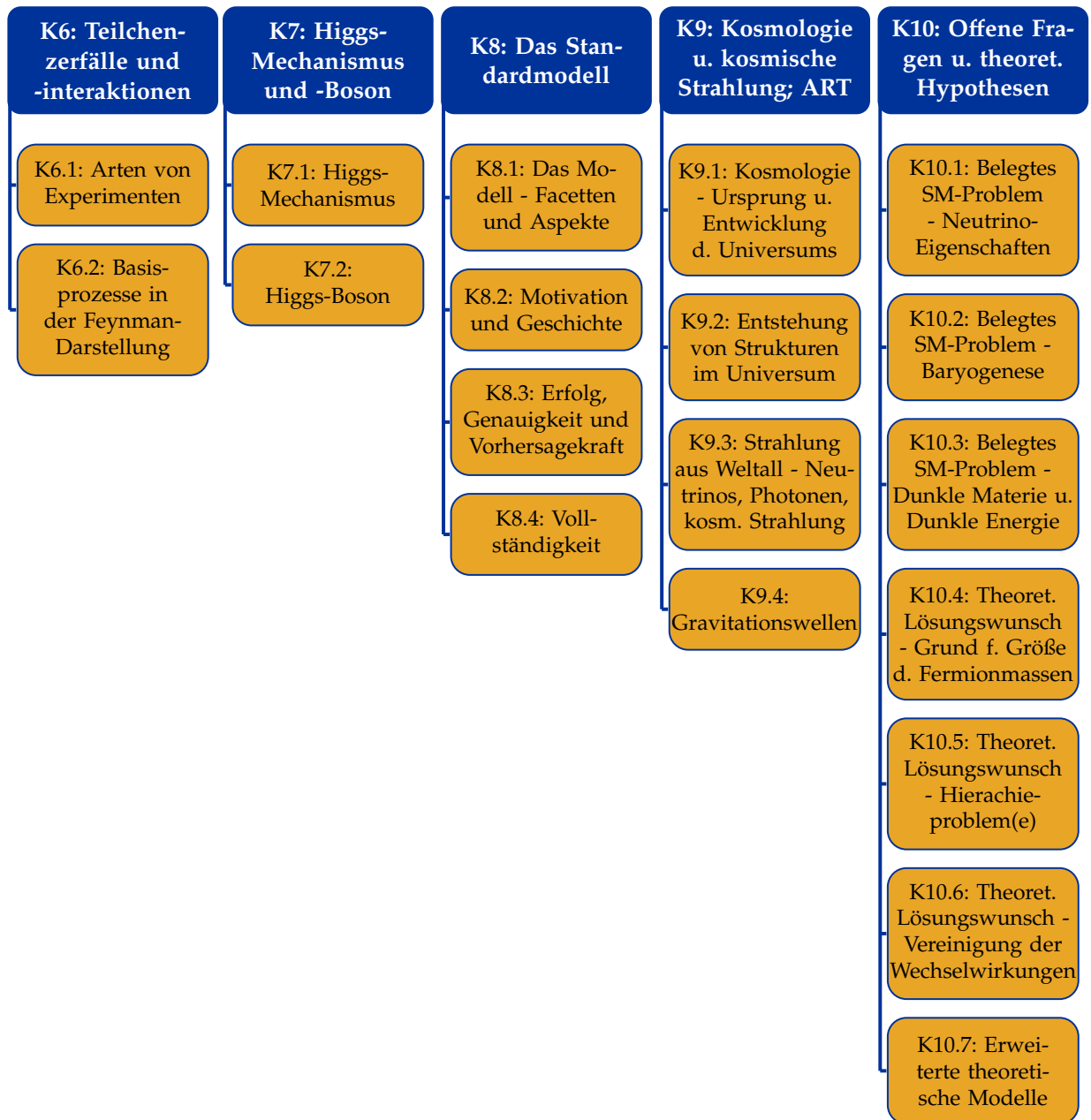


Abbildung 5.7: Teil 2 des finalen Systems an Fachwissenskategorien, welches als Modellentwurf für das Fachwissen von Lehrkräften mithilfe des Expertisegremiums in Runde 1 erarbeitet wurde. Hauptkategorien sind blau und Unterkategorien gelb dargestellt

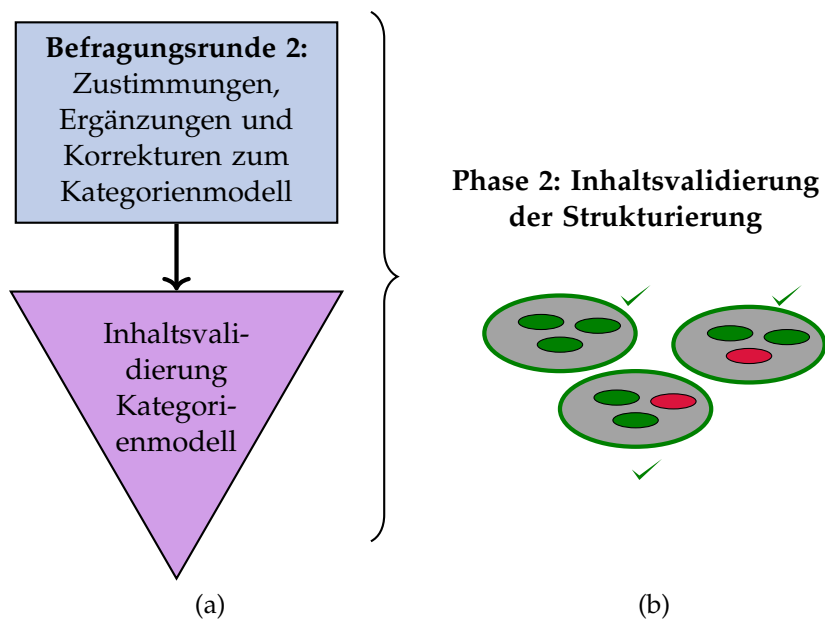


Abbildung 5.8: Ausschnitt aus dem Forschungsdesign für die zweite Phase der Delphi-Studie: a) Befragungsrunde und Auswerteabschnitt, b) Status des zu modellierenden Fachwissens

der Qualitativen Inhaltsanalyse (siehe vorangegangener Abschnitt) erstellt wurde und in Anhang B.1 abgebildet ist. Die Kurzbeschreibungen umfassen jeweils ein bis mehrere Sätze und basieren auf den Kategorienbeschreibungen in der zweiten Spalte des Kodierleitfadens. Die erarbeiteten Kurzbeschreibungen sind in Anhang A.1 abgedruckt.

5.2 Auswertung Runde 2: Inhaltsvalidierung

In der Auswertung der Daten aus Befragungsrunde 2 des Expertisegremiums steht die Inhaltsvalidierung des gewonnenen Systems aus Haupt- und Unterkategorien als Modell für das Fachwissen von Lehrkräften im Mittelpunkt. Zur Datenerhebung wurde der Online-Fragebogen 2 verwendet, welcher bereits in Kapitel 4.3.3 vorgestellt wurde. Der entsprechende Ausschnitt zu Phase 2 aus dem Gesamtforschungsdesign ist zur Übersicht noch einmal in Abbildung 5.8 dargestellt.

Ziel der Inhaltsvalidierung ist die Überprüfung dahingehend, ob das vorgeschlagene Fachwissensmodell auch tatsächlich das abbildet, was es vorgibt abzubilden: Das von Lehrkräften benötigte Fachwissen aus dem Bereich der Teilchenphysik. Die entsprechende Forschungsleitfrage lautet:

Leitfrage 2 (L2): Erfasst das in Phase 1 der Delphi-Befragung konstruierte System aus Wissenskategorien und -unterkategorien das zu modellierende Fachwissen in allen Aspekten und nur in diesen?

Die **Datengrundlage**, anhand derer L2 beantwortet werden soll, wurde im Online-Fragebogen 2 mithilfe der Items 5, 6 und 7 (siehe Kapitel 4.3.3) erhoben.

Wie bereits erläutert, zielt Item 5 zunächst auf eine generelle Zustimmung bzw. Ablehnung der Expertinnen und Experten bezüglich des Kategoriensystems aus Runde 1 ab. Operationalisiert wurde die Zustimmung durch den anzugebenden Abdeckungsgrad, mit welchem nach Ansicht der Teilnehmenden die jeweils angezeigten, zu einer Hauptkategorie gehörenden, Unterkategorien das Fachwissen abbilden, welches Lehrkräfte zur entsprechenden Hauptkategorie besitzen sollten. Werte des Abdeckungsgrads konnten dabei ganzzahlig zwischen 0 % ("überhaupt keine Abdeckung") bis zu 100 % („vollständige Abdeckung“) angegeben werden. Die Frage nach dem Abdeckungsgrad wurde für jede der zehn Hauptkategorien ausgetrennt an das Expertisegremium gestellt. Aus den erwähnten Überlegungen zur Minimalhaltung des Aufwands für die Fachleute erhielt jedoch jeder Teilnehmende zufällig nur drei Hauptkategorien zur Bewertung. Als Resultat beurteilten von den $N = 57$ Teilnehmenden in Runde 2 nur zwischen 10 und 16 Personen dieselbe Hauptkategorie. Die statistische Analyse der Daten zum Abdeckungsgrad wird im nachfolgenden Abschnitt 5.2.1 diskutiert.

Neben der generellen Zustimmung bzw. Ablehnung einzelner Haupt- bzw. Unterkategorien wurden durch die Items 6 und 7 in Online-Fragebogen 2 mithilfe freier Texteingabefelder Korrektur- bzw. Ergänzungsvorschläge zur Liste der angezeigten Unterkategorien erhoben. Dieselbe Untergruppe des Gremiums, die bereits Item 5 für eine Hauptkategorie beantwortet hatte, erhielt nun auch die Items 6 und 7 für die betreffende Hauptkategorie. Die offenen Fragen zielten konkret auf fälschlicherweise aufgelistete oder fehlende Unterkategorien ab. Durch das Auffinden eines hohen Abdeckungsgrads (durch Item 5) soll eine Bestätigung des Systems durch das Gremium erfolgen. Anhand der erhobenen Korrektur- und Ergänzungsvorschläge kann jedoch zusätzlich dem Wunsch nach einem optimierten Kategoriensystem entsprochen werden, welches das Fachwissen der Lehrkräfte noch besser abbildet. Die insgesamt mithilfe der Freitextfelder erhobenen Antworten der Expertinnen und Experten zu den Items 6 und 7 umfassen zwischen 5 Textpassagen (für Hauptkategorie 4) und 12 Textpassagen (für Hauptkategorie 10). Die Textpassagen besitzen dabei

einen Umfang zwischen 2 Wörtern und bis zu 100 Wörtern. Letzteres entspricht etwa 6 Sätzen. Während Item 5 eine quantitative statistische Analyse impliziert, handelt es sich bei den Daten aus den Items 6 und 7 wie auch in Runde 1 um nicht-numerisches, qualitatives Datenmaterial, aus welchem mithilfe qualitativer Auswertemethodik die Veränderungsvorschläge des Gremiums herausgearbeitet werden müssen.

In Kapitel 4.1.3 wurde die Frage aufgeworfen, ob sich in den Delphi-Befragungen Unterschiede in den Einschätzungen von Expertinnen und Experten aus verschiedenen Berufsgruppen oder aus unterschiedlichen Ländern bezüglich des zu modellierenden Fachwissens zeigen. Für die Ergebnisse aus Runde 2 soll die Frage dahingehend konkretisiert und beantwortet werden, ob statistisch signifikante Unterschiede in der Variablen Abdeckungsgrad unter den genannten Personengruppen bestehen. Für die Analyse wird daher ebenfalls die Zugehörigkeit der Teilnehmenden zu einer Berufsgruppe (Faktor mit 3 Levels) und zu einem „Sozialisierungsland mit der Teilchenphysik“ (Faktor mit 12 Levels) berücksichtigt. Die entsprechenden Daten wurden für die Stichprobe in Runde 2 mithilfe von Item 2 (Beruf) und Item 1 (Land) im Online-Fragebogen 2 als Freitextantworten erhoben und in der Datenaufbereitung faktorisiert. Verteilungen der Berufsgruppen und der Länder für die Stichprobe sind in Kapitel 4.4 zusammengefasst worden.

Aufbauend auf den soeben vorgestellten Daten wurde zur Beantwortung von Leitfrage **L2** eine Analysestrategie mit zwei großen Analyseschritten entwickelt, die hier in Kürze und in den nachfolgenden Abschnitten im Detail beschrieben wird:

1. Ermittlung der Zustimmung des Expertisegremiums

Die Zustimmung des Gremiums zum vorgeschlagenen Kategoriensystem wird mithilfe der Analyse der Daten zum Abdeckungsgrad für die zehn Hauptkategorien bestimmt. Der Abdeckungsgrad wird zunächst auf Basis deskriptiver statistischer Kennwerte untersucht und insbesondere durch die Mittelwerte der prozentualen Angaben aller Personen getrennt für jede Hauptkategorie ermittelt. Ein hoher mittlerer Abdeckungsgrad für eine Hauptkategorie zeugt hierbei von einer generellen Zustimmung der Expertinnen und Experten zu der betreffenden Hauptkategorie sowie den dazugehörenden Unterkategorien.

a) Aussagekraft des Abdeckungsgrads

Um die Aussagekraft der Ergebnisse zum Abdeckungsgrad angesichts der geringen Stichprobengrößen zu bestimmen, wird quantifiziert, wie stark die Daten von Ergebnissen aus einem zufälligen Zustimmungsverhalten

der Expertinnen und Experten abweichen. Hierzu werden die Verteilungen der erhobenen Daten zum Abdeckungsgrad unter anderem mithilfe eines *Kolmogorov-Smirnoff-Anpassungstests* (siehe z.B. Hedderich & Sachs, 2018) mit einer zufällig erwarteten Gleichverteilung verglichen (siehe Abschnitt 5.2.1).

b) Personengruppenvergleiche

Schließlich wird mithilfe eines *Wilcoxon-Rangsummen-Tests* (siehe z.B. Field, Miles & Field, 2012) - einem Pendant zum unabhängigen t-Test für nicht-gaußverteilte Daten - überprüft, ob sich für die Hauptkategorien signifikante Unterschiede im mittleren Abdeckungsgrad zwischen Personen unterschiedlicher Berufsgruppen bzw. mit verschiedenen Sozialisierungsländern zeigen. Aufgrund der geringen Stichprobengrößen werden hierbei zum einen nur Vergleiche zwischen der Berufsgruppe „Fachwissenschaft“ und der kombinierten Gruppe aus den anderen beiden Berufsgruppen („Fachdidaktik“ und „Outreach“) angestellt, was einem Vergleich von schulfernen gegenüber schulnahen Berufsgruppen entspricht. Da im Gremium viele Länder nur einzeln vertreten sind, werden zum anderen nur Unterschiede zwischen Personen aus Deutschland und Personen, die nicht in Deutschland mit der Teilchenphysik sozialisiert wurden, gezogen. Der reduzierte Vergleich erlaubt dennoch die Frage zu beantworten, ob ein Einbezug internationaler Expertise für die Beantwortung der Delphi-Fragestellung geeignet ist. Sollten sich nämlich Unterschiede zwischen Deutschland und dem internationalen Raum zeigen, muss noch einmal die Personenauswahl reflektiert werden.

Alle bis hierhin beschriebenen Analyseschritte beziehen sich auf die Analyse des Abdeckungsgrads, deren Durchführung in Abschnitt 5.2.1 beschrieben ist.

2. Optimierung des Kategorienmodells

Für die Optimierung des Kategoriensystems hin zu einem noch inhaltsvaliderem Modell werden wiederkehrende, gut begründete Muster von Veränderungsvorschlägen zum Kategoriensystem mithilfe einer sogenannten inhaltlich-strukturierenden Qualitativen Inhaltsanalyse (Kuckartz, 2016) aus den Freitextantworten der Expertinnen und Experten zu den Items 6 und 7 im Online-Fragebogen 2 herausgearbeitet. Die Veränderungsvorschläge beziehen sich dabei auf den Inhalt sowohl von (Unter-) Kategorientiteln als auch auf die korrespondierenden Kurzbeschreibungen, welche ebenfalls in Runde 1 für jede

Hauptkategorie	<i>N</i>	<i>M</i> [%]	<i>SD</i> [%]	<i>SE</i> [%]
K 1: Die Struktur der Materie	12	92.67	9.12	2.63
K 2: Teilchen in der Hochenergiephysik	16	89.62	16.43	4.11
K 3: SRT u. QM mit Bezug zur TP; QFT	10	79.70	24.47	7.74
K 4: Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte	15	85.33	21.40	5.53
K 5: Symmetrien und Erhaltungsgrößen	13	92.85	11.04	3.06
K 6: Teilchenzerfälle und -interaktionen	11	78.45	23.43	7.06
K 7: Higgs-Mechanismus u. -Boson	15	90.60	16.20	4.18
K 8: Das Standardmodell	14	85.00	12.70	3.39
K 9: Kosmologie u. kosm. Strahlung; ART	14	79.79	18.24	4.87
K 10: Offene Fragen u. theoret. Hypothesen	15	77.20	19.24	4.97

Tabelle 5.1: Deskriptive statistische Kennwerte der erhobenen Daten in Runde 2 zum Abdeckungsgrad für die Hauptkategorien aus Runde 1: Dargestellt ist der Stichprobenumfang *N*, der Mittelwert *M*, die Standardabweichung *SD* sowie der Standardfehler *SE*.

(Unter-) Kategorie formuliert wurden. Durchführung und Ergebnisse der Inhaltsanalyse werden in Abschnitt 5.2.2 diskutiert. Aus den Veränderungsvorschlägen wird im letzten Schritt der Inhaltsanalyse ein konsistentes Set an Veränderungen herausgearbeitet, welche durch das Gremium häufig genannt und nachvollziehbar gut begründet sind. Das Set von Veränderungen wird abschließend auf das Kategoriensystem angewandt. Das resultierende, inhaltlich validierte und optimierte System wird in Abschnitt 5.2.3 vorgestellt. Es wurde in der dargestellten Form als Evaluationsgrundlage in Befragungsrunde 3 verwendet.

5.2.1 Zustimmung des Expertisegremiums

Wie zuvor erläutert, lässt sich die Zustimmung des Expertisegremiums in Runde 2 zu den vorgeschlagenen Fachwissenshaupt- und dazugehörigen Fachwissensunterkategorien durch Analyse der Daten zum Abdeckungsgrad ermitteln.

Um erste Aussagen bezüglich der generellen Zustimmung aller Expertinnen und Experten zu den Hauptkategorien treffen zu können, wurden in Tabelle 5.1 zunächst deskriptive statistische Kennwerte der erhobenen Daten zum Abdeckungsgrad aufgelistet. Der mittlere Abdeckungsgrad, mit dem die jeweiligen Personen die 10 Hauptkategorien aus Runde 1 beurteilten, ist anhand der Mittelwerte *M* ablesbar. Mit einem minimalen Wert von 77.2 % (Hauptkategorie 10) und einem maximalen

Wert von 92.85 % (Hauptkategorie 5) lässt sich feststellen, dass nach durchschnittlicher Gremiumsansicht die Unterkategorienauflistungen für alle Hauptkategorien das zu modellierende Fachwissen zu über drei Vierteln abdecken. Es ist demnach auf den ersten Blick generell eher eine Zustimmung als eine Ablehnung aller Hauptkategorien durch die Expertinnen und Experten anzunehmen.

Des Weiteren liefern die deskriptiven Kennwerten auch erste Informationen zur Aussagekraft der gemessenen Mittelwerte: Die Werte für den mittleren Abdeckungsgrad sind nämlich nicht nur durchweg hoch, sondern auch für keine einzige Hauptkategorie innerhalb des Standardfehlers *SE* verträglich mit einem Wert von 50 %. Ein Mittelwert von 50 % würde sich ergeben, falls die Expertinnen und Experten für den Abdeckungsgrad zufällige Werte im möglichen Bereich zwischen 0 % und 100 % angegeben hätten. Es ist demnach zunächst nicht von einem zufälligen, sondern einem aussagekräftigen Antwortverhalten der Teilnehmenden auszugehen. Weitere Verfahren zur Quantifizierung der Aussagekraft der Ratingergebnisse werden in den nachfolgenden Teilabschnitten vorgestellt.

Eine Bemerkung zur Beurteilerübereinstimmung

Die Erhebung der Zustimmung zum Kategoriensystem via des Abdeckungsgrades im Online-Fragebogen basiert auf der Beurteilung mehrerer Objekte (hier mehrerer Kategorien) durch mehrere Personen (auch englisch als *Rater* bezeichnet). Die im Rahmen der Beurteilung erhobenen Rating-Daten mit numerischen Werten zwischen 0 % und 100 % erfüllen die Vorgaben für Intervallskalenniveau. In solch einem Fall wird unter anderem nach Wirtz und Caspar (2002) in der Regel für die Quantifizierung der Beurteilerübereinstimmung - die sogenannte *Interraterreliabilität*³ - als geeignetes Maß die *Intraklassenkorrelation ICC* berechnet. Die ICC gibt einerseits an, „wie gut die Werte eines individuellen Raters mit einem beliebigen anderen korrelieren“ (Wirtz & Caspar, 2002, S. 158). Sie lässt sich andererseits auffassen als „ein Maß dafür, welcher Anteil der Varianz der wahren Merkmalsausprägung aufgrund der Beurteilung durch einen Rater aufgeklärt wird“ (Wirtz & Caspar, 2002, S. 160).

Die Berechnung der ICC basiert auf Varianzanalysen und findet im vorliegenden Fall der Daten zum Abdeckungsgrad, in welchem nicht alle Rater die gleichen Kategorien beurteilt haben, gemäß Wirtz und Caspar (2002) durch Anwendung folgender

³ In der Auswertung zu Befragungsrunde 1 wurde im Rahmen der Qualitativen Inhaltsanalyse die *Interraterreliabilität* auch als *Intercoderreliabilität* bezeichnet. In Runde 1 erfüllten die erhobenen Daten jedoch nur Nominalskalenniveau, weshalb Cohens κ und nicht die ICC als Maß zur Quantifizierung der Übereinstimmung herangezogen wurde.

Formel statt:

$$ICC = \frac{MS_{zw} - MS_{inn}}{MS_{zw} + (k - 1) \cdot MS_{inn}} \quad (5.2)$$

Hierbei gibt MS_{zw} die Varianz der Einschätzungen zwischen den Kategorien, MS_{inn} die Varianz der Einschätzungen innerhalb von Kategorien und k die Anzahl an Ratern an. Die ICC in der vorliegenden Form kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei 1 einer vollständigen, 0 überhaupt keiner Übereinstimmung entspricht und negative Werte keinen Sinn besitzen (Wirtz & Caspar, 2002).

Anhand von Gleichung 5.2 zeigt sich die problematische Verwendung des ICC zur Bestimmung der Beurteilerübereinstimmung in der vorgestellten Studie: Je größer die Varianz zwischen den Kategorien und je kleiner die Varianz zwischen Ratern wird, desto größer wird die ICC . Jedoch wäre die hier angestrebte ideale Beurteilung der Kategorien durch die Expertinnen und Experten ein Szenario, in welchem alle Personen allen Kategorien den höchstmöglichen Abdeckungsgrad von 100% beimesen, was in einer minimalen Varianz zwischen Kategorien und damit in einer niedrigen ICC resultieren würde. Aus den genannten Überlegungen heraus wird daher die Bestimmung der Intraklassenkorrelation in der vorliegenden Teilstudie als nicht zielführend erachtet.

Aussagekraft des Abdeckungsgrads

In der vorangegangenen Analyse der deskriptiven statischen Kennwerte der Daten zum Abdeckungsgrad wurden bereits auf Basis von Mittelwerten und Standardabweichungen erste Aussagen bezüglich der Aussagekraft des mittleren Abdeckungsgrads pro Hauptkategorie getroffen. Aussagekräftig in Bezug auf die Zustimmung des Gremiums sind die Ergebnisse dann, wenn Sie nicht einem zufälligen Rating-Verhalten der Teilnehmenden entspringen können.

Im Anschluss soll noch einmal durch geeignete statistische Testverfahren überprüft bzw. quantifiziert werden, wie stark die gemessenen Daten tatsächlich von einem gänzlich zufallsbedingten Ergebnis abweichen. Wie in den nachfolgenden Abschnitten ausführlich beschrieben, werden hierzu zwei Testverfahren durchgeführt, die eine unterschiedliche Menge an Informationen aus den gemessenen Daten zum Abdeckungsgrad verwenden.

Vergleich von Mittelwerten

Zunächst wird lediglich untersucht, wie wahrscheinlich es ist, dass die Mittelwerte der gemessenen Daten zum Abdeckungsgrad pro Hauptkategorie einem zufälligen Zustimmungsverhalten der Expertinnen und Experten entspringen. Da die Untersuchung kein typisches statistisches Testverfahren in der Physikdidaktikforschung darstellt, wird das Verfahren im Folgenden im Detail erläutert.

Im Grenzfall unendlich vieler zufällig antwortender Personen würde sich eine Gleichverteilung der Daten im Bereich von $\alpha = 0\%$ bis $\beta = 100\%$ gemäß folgender Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (WDF) ergeben:

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\alpha - \beta} \quad (5.3)$$

Die WDF f besitzt hierbei folgende Werte für Mittelwert M und Varianz V :

$$M = \frac{1}{2} \cdot (\alpha + \beta) = 50\% \quad V = \frac{1}{12} \cdot (\beta - \alpha)^2 = \frac{10000}{12}\% \quad (5.4)$$

Zieht man nun gemäß der WDF f sehr oft Datensätze und ermittelt jeweils den Mittelwert pro Datensatz, so würden nach dem zentralen Grenzwertsatz die Mittelwerte folgender gaussverteilter WDF folgen:

$$g(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.5)$$

Hierbei gelten für Erwartungswert μ und Standardabweichung σ folgende Beziehungen:

$$\mu = \frac{\alpha + \beta}{2} = 50\% \quad \sigma^2 = \frac{V}{N} \quad , \quad (5.6)$$

wobei N dem Stichprobenumfang pro Einzeldatensatz entspricht, aus dem die Mittelwerte jeweils berechnet werden. Für den vorliegenden Fall soll nun untersucht werden, wie verträglich die tatsächlich gemessenen Mittelwerte des Abdeckungsgrads (nachfolgend als x_{mess} bezeichnet) mit der Nullhypothese H_0 sind.

In H_0 wird vermutet, dass die Mittelwerte der WDF g für zufällig verteilte Ursprungsdaten entspringen. Hierfür wird wie bei anderen Hypothesentests auch der p -Wert bestimmt, welcher die Wahrscheinlichkeit angibt, Daten zu beobachten, die genauso oder weniger verträglich wären mit H_0 . Demnach wird p über folgende

Hauptkategorie	N	M [%]	$p(t = M)$	$d_{n,max}$	$p(t = d_{max})$
K 1: Die Struktur der Materie	12	92.67	< .001 ***	0.72	< .001 ***
K 2: Teilchen in der Hochenergiephysik	16	89.62	< .001 ***	0.68	< .001 ***
K 3: SRT u. QM mit Bezug zur TP; QFT	10	79.70	< .001 ***	0.49	.013 *
K 4: Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte	15	85.33	< .001 ***	0.59	< .001 ***
K 5: Symmetrien und Erhaltungsgrößen	13	92.85	< .001 ***	0.69	< .001 ***
K 6: Teilchenzerfälle und -interaktionen	11	78.45	< .001 ***	0.55	.003 **
K 7: Higgs-Mechanismus u. -Boson	15	90.60	< .001 ***	0.62	< .001 ***
K 8: Das Standardmodell	14	85.00	< .001 ***	0.61	< .001 ***
K 9: Kosmologie u. kosm. Strahlung; ART	14	79.79	< .001 ***	0.50	.002 **
K 10: Offene Fragen u. theoret. Hypothesen	15	77.20	< .001 ***	0.45	.003 **

Tabelle 5.2: Kennwerte und Ergebnisse aus der Aussagekraftprüfung der Daten zum Abdeckungsgrad für die Hauptkategorien aus Runde 1: Stichprobenumfang N , Mittelwerte M , p -Werte $p(t = M)$ aus dem Mittelwertvergleich mit zufällig erwarteten Gleichverteilungen sowie Teststatistik $d_{n,max}$ und dazugehörige p -Werte aus dem Kolmogorov-Smirnoff-Anpassungstest der Daten an Gleichverteilungen.

Formel berechnet:

$$p = \int_{-\infty}^{-x_{mess}} g(x|H_0) dx + \int_{x_{mess}}^{\infty} g(x|H_0) dx \quad (5.7)$$

Hierbei entspricht g der Gauss-WDF aus Gleichung 5.6. Bei der Berechnung von p werden für N und für x_{mess} für alle Hauptkategorien getrennt die Werte des jeweiligen Stichprobenumfangs und Mittelwerts eingesetzt. Die resultierenden p -Werte sind in der Spalte mit Titel „ $p(t = M)$ “ in Tabelle 5.2 dargestellt.

Es ist anhand der p -Werte aus dieser ersten Form von Testverfahren festzustellen, dass die gemessenen Datenmittelwerte des Abdeckungsgrads für alle Hauptkategorien hochsignifikant von der Verteilung der Mittelwerte im Fall einer Gleichverteilung der Daten abweichen. Daraus lässt sich ableiten: Auf Basis der alleinigen Mittelwertinformationen ist es fast unmöglich, dass die Expertinnen und Experten das entsprechende Item in Online-Fragebogen 2 zufällig beantworteten.

Anpassung von Gleichverteilungen an die Daten

In einem zweiten Schritt wird überprüft, ob nicht nur die gemessenen Mittelwerte des Abdeckungsgrads, sondern die gesamten Datenverteilungen signifikant von zufällig

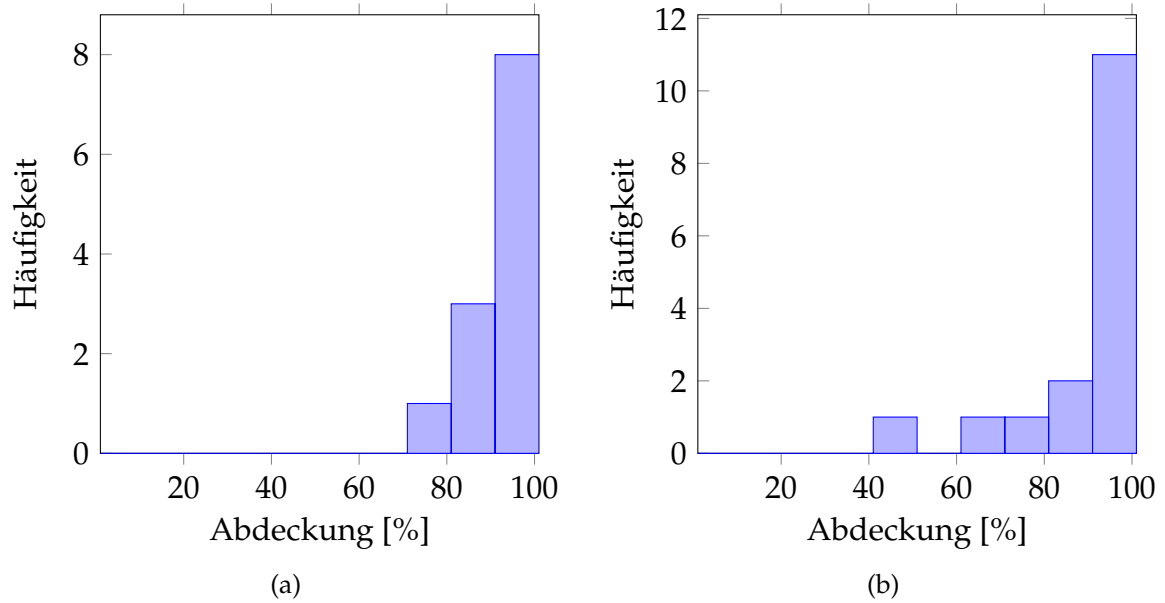


Abbildung 5.9: Verteilungen der Daten zum Abdeckungsgrad als Histogramme mit Histogrammklassenbreiten von 10 % für a) Hauptkategorie 1 und b) Hauptkategorie 2 des Kategoriensystems aus Runde 1.

erwarteten Gleichverteilungen im Bereich von 0 % bis 100 % abweichen. Um den zu ziehenden Vergleich zu verdeutlichen, sind in Abbildung 5.9 für zwei Hauptkategorien die Verteilungen der Daten zum Abdeckungsgrad dargestellt. Die gezeigten Daten werden mit Gleichverteilungen verglichen, die im Histogramm durch Balken mit konstanter Höhe über den gesamten Bereich repräsentierbar wären.

Mithilfe eines *Kolmogorov-Smirnoff-Anpassungstests*, eines sogenannten KSA-Tests (siehe z.B. Hedderich & Sachs, 2018), wird für jede Hauptkategorie getrennt überprüft, ob die gemessenen Daten einer Gleichverteilung entspringen können⁴. Die zu untersuchende Teststatistik des KSA-Tests ist für einen gegebenen Datenvektor x mit nach aufsteigender Größe sortierten Einträgen x_i gegeben durch:

$$d_{n,max} = \max(|S_n(x_i) - F(x_i)|) \quad (5.8)$$

Hierbei bezeichnet F die Kumulativfunktion der theoretischen Verteilungsvorhersage f , mit der die Daten verglichen werden sollen. f entspricht hierbei einer Gleichverteilung (siehe Funktion in Gleichung 5.3). S_n als sogenannte *Empirische Verteilungs-*

⁴ Der KSA-Test wird in diesem Fall gegenüber weiteren Anpassungstests wie beispielsweise dem χ^2 -Test bevorzugt, da er unabhängig von der Form der Grundgesamtheit der gemessenen Daten ist. Insbesondere setzt er keine Normalverteilung der Daten voraussetzt und ist daher auch für die hier vorhandenen geringen Stichprobengrößen geeignet.

funktion entspricht dagegen folgender normierter Stufenfunktion, die sich aus den n Einträgen im geordneten Datenvektor x berechnet:

$$S_n(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i < x_1 \\ \frac{i}{n} & x_1 \leq x_i \leq x_{n-1} \\ 1 & x_i > x_n \end{cases} \quad (5.9)$$

Die Stufenfunktion gibt demnach den relativen Anteil aller Dateneinträge an, die kleiner oder gleich groß wie x_i sind und daraus folgend entspricht $d_{n,max}$ dem betragsmäßig größten Abstand zwischen Kumulativfunktion der Theorievorhersage und der Stufenfunktion der Daten. Im vorliegenden Fall wurden die gemessenen Daten für den Abdeckungsgrad für jede Hauptkategorie in insgesamt zehn *Histogrammbins* (dt. Histogrammklassen, nachfolgend verkürzt *Bins* genannt) mit Breiten von 10 % eingeteilt und die Teststatistik $d_{n,max}$ gemäß Gleichung 5.8 berechnet. Die Ergebnisse sind in der vorletzten Spalte in Tabelle 5.2 aufgelistet.

Dem Verfahren des KSA-Tests folgend, lassen sich nun die errechneten Werte für die Teststatistik mit tabellierten Werten d_α für ein vorgegebenes Signifikanzniveau α vergleichen. Dabei wird die Nullhypothese H_0 - dass die Daten einer Gleichverteilung entspringen - mit einem Signifikanzniveau von α abgelehnt, sofern $d_{n,max} > d_\alpha$. Alternativ lassen sich mithilfe von Statistikprogrammen wie *R* (R Core Team, 2018) auch direkt zu $d_{n,max}$ korrespondierende p -Werte angeben. Die p -Werte für alle zehn Hauptkategorien sind in der letzten Spalte in Tabelle 5.2 aufgelistet. Anhand der Werte lässt sich ablesen, dass für alle Hauptkategorien die Daten mindestens signifikant - für sechs Kategorien sogar hochsignifikant - von einer Gleichverteilung abweichen.

Demnach ist auch unter Einbezug aller Informationen aus den Datenverteilungen des Abdeckungsgrads ein zufälliges Antwortverhalten der Teilnehmenden widerlegt und damit die Aussagekraft der Ergebnisse aus dem Abdeckungsgrad bestätigt.

Personengruppenvergleiche

Als letzter Analyseschritt der Daten zum Abdeckungsgrad wird überprüft, ob sich Unterschiede in den Einschätzungen der Kategorien durch Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen Berufsgruppen bzw. mit unterschiedlichen Ländern zeigen, in welchen die Personen mit der Teilchenphysik „sozialisiert“ wurden. Die entsprechenden Verteilungen über Berufe und Länder innerhalb der Stichprobe von Runde 2 wurden bereits in Abschnitt 4.4 vorgestellt.

Um den angestrebten Vergleich bezüglich des Abdeckungsgrads zu verdeutlichen, sind in Abbildung 5.10 beispielhaft für die Hauptkategorien 3 und 4 die Datenverteilungen für die unterschiedlichen Personengruppen im Gremium dargestellt. Wie bereits angemerkt, wird aufgrund der geringen Stichprobengröße, die jeweils eine Hauptkategorie beurteilt hat, einerseits nur ein Vergleich zwischen Angehörigen der Fachwissenschaft (schulfern) gegenüber der kombinierten Gruppe aus Fachdidaktik und Outreach (schulnah) durchgeführt. Andererseits werden nur die Einschätzungen von Personen mit Deutschland als Sozialisierungsland mit den Einschätzungen von Personen mit internationalen Sozialisierungsländern verglichen.

Die angestrebte Inhaltsvalidierung des Kategoriensystems in Befragungsrunde 2 wurde vorrangig durch die Interpretation der mittleren prozentualen Abdeckungsgrade überprüft, mit welcher nach Ansicht der Teilnehmenden die konstruierten Unterkategorien das Fachwissen einer Lehrkraft zur entsprechenden Hauptkategorie abdecken (siehe vorangegangene Abschnitte). Daher werden im Rahmen der Personengruppenvergleiche nachfolgend lediglich die Mittelwerte des Abdeckungsgrads, nicht jedoch ganze Verteilungen, zwischen den unterschiedlichen Gruppen untersucht. In Folge dessen ist eine Normierung der Daten auf gleiche Stichprobengrößen innerhalb der Untergruppen für einen angemessenen Vergleich nicht nötig.

Die Prüfung der Mittelwerte des Abdeckungsgrads zwischen verschiedenen Personengruppen auf Gleichheit wird mithilfe eines sogenannten *Wilcoxon-Rangsummentests*, eines sogenannten WRS-Tests (siehe z.B. Field et al., 2012), durchgeführt. Der Test eignet sich als nicht-parametrisches Pendant zum unabhängigen t-Test für den Vergleich von Mittelwerten bei kleinen Stichproben, bei welchen keine Normalverteilungen der Daten vorausgesetzt werden können. Die Teststatistik des WRS-Tests stellt die Größe W dar, die sich folgender Maßen berechnet:

$$W = RS - MR \quad (5.10)$$

Hierbei gibt RS die Rangsumme für jede der zu vergleichenden Gruppen, also die Summe aller Ränge, an, die den aufsteigend sortierten Datenwerten innerhalb der Gruppe vorab vergeben wurden. Der mittlere Rang MR berechnet sich dagegen aus der Anzahl N aller Werte innerhalb einer Gruppe nach:

$$MR = \frac{N(N + 1)}{2} \quad (5.11)$$

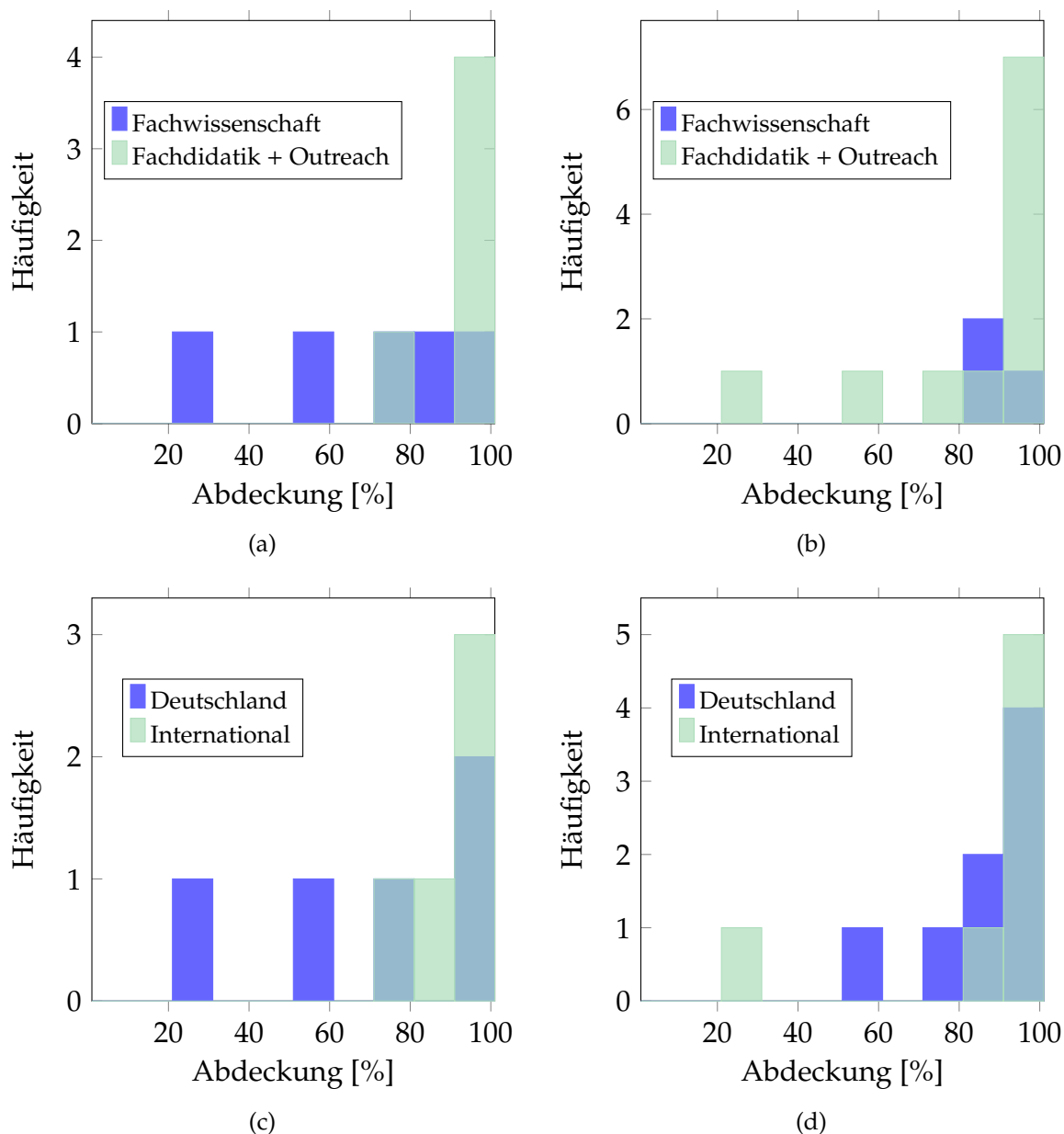


Abbildung 5.10: Beispielverteilungen der Daten zum Abdeckungsgrad für Hauptkategorie 3 in a) und c) sowie für Hauptkategorie 4 in b) und d), aufgeteilt nach unterschiedlichen Berufsgruppen der Expertinnen und Experten in a) und b) sowie nach unterschiedlichen Sozialisierungsländern mit der Teilchenphysik in c) und d).

W wird nach Gleichung 5.10 für jede der beiden zu vergleichenden Personengruppen berechnet und es wird der kleinere der beiden Werte als Teststatistik verwendet. Die im vorliegenden Fall berechneten Teststatistiken W sind in Tabelle 5.3 für den Berufsgruppenvergleich sowie in Tabelle 5.4 für den Ländervergleich dargestellt.

Analog zum diskutierten KSA-Test im vorangegangenen Abschnitt lassen sich im Rahmen des WRS-Tests entweder wieder die Werte von W mit tabellierten kritischen Werten W_α vergleichen. W_α gibt zu einem Signifikanzniveau von α die Wahrscheinlichkeit an, höchstens die beobachteten Werte für W zu erhalten, sollte die Nullhypothese - die Gleichheit der Stichprobenmittelwerte - stimmen. Alternativ lassen sich wieder mithilfe des Statistikprogramms R die direkt zu den Werten von W für die gegebenen Stichprobengrößen gehörenden p -Werte abschätzen. Letztere Alternative wurde verfolgt und die resultierenden p -Werte sind ebenfalls in den Tabellen 5.3 und 5.4 aufgelistet.

Um den WRS-Test zu vervollständigen, werden abschließend noch Effektstärken für die gezogenen Mittelwertvergleiche berechnet. Die Effektstärke berechnet sich aus dem standardisierten p -Wert z sowie der Stichprobengröße N nach folgender Formel:

$$r = \frac{z}{\sqrt{N}} \quad (5.12)$$

Die Effektstärken für die Personengruppenvergleiche sind ebenfalls wieder in den beiden Tabellen 5.3 und 5.4 aufgelistet.

Bei Analyse der Ergebnisse des WRS-Tests lässt sich auf Basis der p -Werte zunächst festhalten, dass sich für keine der Hauptkategorien aus Runde 1 - weder im Berufsgruppen noch im Ländervergleich - signifikante Unterschiede in den mittleren Abdeckungsgraden zeigen. Somit wäre einerseits bestätigt, dass die zahlenmäßig unterschiedlich vertretenen Berufsgruppen im Expertisegremium keinen Einfluss auf die Inhaltsvalidierung in Runde 2 besitzen. Andererseits können die ursprünglichen Bedenken bezüglich der landesmäßig heterogen zusammengesetzten Expertisegruppe in Bezug auf die Beantwortung der Delphi-Fragestellung ausgeräumt werden. Trotz der nicht-signifikanten p -Werte zeigen sich für einzelne Hauptgruppen in den Ergebnistabellen jedoch kleine bis mittlere Effektstärken. Vorhandene Effektstärken trotz nicht-signifikanter Tests sind bei kleinen Stichproben unter anderem nach Field et al. (2012) nicht unüblich. Dennoch sollten die entsprechenden Kategorien für weitere Personenvergleiche in Befragungsrunde 3 im Auge behalten werden.

Hauptkategorie	M_{FW} [%]	M_{FD+OR} [%]	W	p	r
K 1: Die Struktur der Materie	81.00	95.00	18	.09	-.40
K 2: Teilchen in der Hochenergiephysik	88.25	91.00	25	.48	-.18
K 3: SRT u. QM mit Bezug zur TP; QFT	68.40	91.00	19	.20	-.40
K 4: Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte	89.67	83.64	19	.75	-.08
K 5: Symmetrien und Erhaltungsgrößen	87.25	95.33	26	.22	-.34
K 6: Teilchenzerfälle und - interaktionen	72.86	88.25	18.5	.44	-.23
K 7: Higgs-Mechanismus u. - Boson	89.00	91.67	31	.64	-.12
K 8: Das Standardmodell	85.00	85.00	25	.79	-.07
K 9: Kosmologie u. kosm. Strahlung; ART	69.60	85.44	35	.11	-.43
K 10: Offene Fragen u. theoret. Hypothesen	82.50	75.27	19	.74	-.07

Tabelle 5.3: Kenngrößen des WRS-Tests zur Prüfung der Mittelwerte des Abdeckungsgrads zwischen Expertinnen und Experten aus Fachwissenschaft (M_{FW}) und aus Fachdidaktik bzw. Outreach (M_{FD+OR}) auf Gleichheit: Gelistet sind Teststatistik W , dazugehörige p -Werte p sowie Effektstärken r (siehe Fließtext).

Hauptkategorie	M_{DE} [%]	M_{INT} [%]	W	p	r
K 1: Die Struktur der Materie	93.00	92.33	17	.94	-.02
K 2: Teilchen in der Hochenergiephysik	88.86	95.00	14	1	0
K 3: SRT u. QM mit Bezug zur TP; QFT	68.20	91.20	6.5	.24	-.37
K 4: Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte	86.75	83.71	28.5	1	0
K 5: Symmetrien und Erhaltungsgrößen	93.11	92.25	22.5	.51	-.04
K 6: Teilchenzerfälle und - interaktionen	77.89	81.00	10	.09	-.04
K 7: Higgs-Mechanismus u. - Boson	90.56	90.67	30	.74	-.09
K 8: Das Standardmodell	87.82	74.67	25	.21	-.34
K 9: Kosmologie u. kosm. Strahlung; ART	79.89	79.60	23	1	0
K 10: Offene Fragen u. theoret. Hypothesen	77.11	77.33	29	.86	-.05

Tabelle 5.4: Kenngrößen des WRS-Tests zur Prüfung der Mittelwerte des Abdeckungsgrads zwischen Expertinnen und Experten aus Deutschland (M_{DE}) und aus dem internationalen Raum (M_{INT}) auf Gleichheit: Gelistet sind Teststatistik W , dazugehörige p -Werte p sowie Effektstärken r (siehe Fließtext).

5.2.2 Optimierung des Kategorienmodells

Die Analyse der mittleren Abdeckungsgrade in den vorangegangenen Abschnitten bezeugt bereits eine generell hohe Zustimmung des Expertisegremiums zu dem nach Befragungsrunde 1 etablierten Kategorienmodell als Fachwissensmodell für Lehrkräfte. Wie im Kontext der Analysestrategie erläutert, wird dennoch im folgenden Abschnitt im Rahmen der Datenanalyse zu den Items 6 und 7 aus Online-Fragebogen 2 eine Verbesserung des Kategoriensystem hin zu einem noch inhaltsvalideren Modell angestrebt. Hierzu sollen zunächst aus dem einleitend beschriebenen qualitativen Datenmaterial aus Runde 2 die von den Teilnehmenden vorgeschlagenen Veränderungsvorschläge zum Kategoriensystem herausgearbeitet werden.

Mit dem Ziel, die Freitextantworten zu den Items 6 und 7 kategorienbildend zu untersuchen und dadurch in einem ersten Schritt eine Form von übersichtlicher Strukturierung der Veränderungsvorschläge zu erreichen, könnte zwar - der Begründung zur Auswertung von Runde 1 in Abschnitt 5.1 folgend - hier ebenfalls eine qualitative Inhaltsanalyse mit zusammenfassender induktiver Kategorienbildung nach Mayring (2015) durchgeführt werden. Kerncharakteristik dieser Form von Qualitativer Inhaltsanalyse ist jedoch die Anwendung eines aus der Theorie abgeleiteten Selektionskriteriums, wobei nur diejenigen Textpassagen analysiert werden, welche das Kriterium erfüllen (siehe Abschnitt 5.1.1). Aus zwei hieraus resultierenden Gründen wird in der vorliegenden Studie stattdessen eine sogenannte inhaltlich-strukturierende Qualitative Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) durchgeführt, welche nachfolgend vorgestellt wird. Zum einen gestaltet sich die Auswahl und Anwendung eines Selektionskriteriums für Textpassagen in der Analyse der Daten zu den Items 6 und 7 nicht so sinnvoll wie in der Datenauswertung zu Runde 1. Es sollten hier hingegen sogar möglichst offen alle Textpassagen in die Analyse miteinbezogen werden, die Informationen zu der Meinung des Gremiums zum Kategoriensystem liefern, was fast dem vollständigen qualitativen Datenmaterial aus Befragungsrunde 2 entspricht. Der Einbezug aller Rohdaten ohne Vorab-Auswahl ist in der genannten Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) möglich und die von ihm vorgeschlagene Analysetechnik liefert darüber hinaus den zweiten entscheidenden Vorteil in Bezug auf die angestrebte Datenauswertung: Das Datenmaterial wird nicht in Gänze rein induktiv untersucht und interpretiert, sondern es findet eine ökonomische Mischform von deduktiv-induktiver Kategorienbildung statt. Hierbei werden zunächst auf Basis der Forschungsfrage sowie aus der Theorie heraus als Ausgangspunkt eine geringe Anzahl an Kategorien, die sogenannten *Hauptkategorien*, vor der

Auswertung festgelegt. Mithilfe der Hauptkategorien wird das Datenmaterial grob vorkategorisiert und es findet anschließend lediglich innerhalb jeder Hauptkategorie eine induktive Subkategorienbildung⁵ an ausgewähltem Material statt (Kuckartz, 2016, S. 96). Durch die Vorkategorisierung kann im vorliegenden Fall der Grad der Komplexität der Forschungsfrage dahingehend reduziert werden, dass nur jeweils Veränderungsvorschläge der Personen zu einer bestimmten Fachwissenshauptkategorie zusammengefasst und miteinander verglichen werden. Zusammenfassend wird aus Gründen der offenen Analysegrundeinstellung sowie der Vorstrukturierung des Datenmaterials eine inhaltlich-strukturierende Qualitative Inhaltsanalyse zur Herausarbeitung der Veränderungsvorschläge durch das Gremium durchgeführt.

Im Folgenden wird zunächst das Ablaufschema der Qualitativen Inhaltsanalyse gemäß den Vorgaben von Kuckartz (2016, vgl. S. 100) erläutert und bezüglich des Datenmaterials aus Runde 2 durchgeführt. Insbesondere wird im letzten Schritt der Inhaltsanalyse diskutiert, welche der herausgearbeiteten Veränderungsvorschläge auf das Fachwissensmodell aus Runde 1 zur Optimierung angewandt werden.

1. Entwickeln von thematischen Hauptkategorien

Nach einer initiierten Textarbeit zum Kennenlernen des Datenmaterials werden die thematischen Hauptkategorien aus der Forschungsfrage abgeleitet. Wie in der Einleitung des vorliegenden Kapitels beschrieben, zielt der qualitative Analyseteil zu Befragungsrunde 2 durch die Leitfrage L2 sowie deren Teiloperationalisierungen in den Items 6 und 7 in Online-Fragebogen 2 auf Ergänzungs- und Korrekturvorschläge der Teilnehmenden zum Kategoriensystem aus Runde 1 ab. Das Kategoriensystem enthält hierbei Fachwissenshaupt- und Unterkategorien und das Gremium wurde jeweils aufgefordert, die Liste von Unterkategorien zu einer angezeigten Fachwissenshauptkategorie zu kommentieren. Kommentare bezogen sich hierbei entweder auf Kategorientitel oder auf die ebenfalls angezeigten Kategorienkurzdefinitionen. An die Unterteilung der Befragung in verschiedene Fachwissenshauptkategorien anknüpfend, werden für

⁵ Im Rahmen der Beschreibung zur qualitativen Auswertung von Runde 2 werden die Begriffe *Haupt-* sowie *Unter-/Subkategorien* mit zweierlei Bedeutung verwendet: Zum einen handelt es sich weiterhin um die Bestandteile des nach Runde 1 etablierten Fachwissensmodells. Zum anderen werden die Veränderungsvorschläge zum Kategorienmodell der Expertinnen und Experten in Runde 2 innerhalb der Qualitativen Inhaltsanalyse in thematische Haupt- und Subkategorien eingeteilt. Die Begriffsambiguität lässt sich hier leider nicht vermeiden, der Zusammenhang sollte jedoch jeweils die Bedeutung klar machen. Außerdem wird bei Fachwissenskategorien weiterhin von *Unterkategorien* und bei Veränderungsvorschlägen von *Subkategorien* gesprochen.

die hier durchzuführende Qualitative Inhaltsanalyse 10 thematische Hauptkategorien für Personenaussagen definiert. Jede der Hauptkategorien soll dabei nur Aussagen zu Veränderungen thematisieren, die sich auf jeweils eine der 10 Fachwissenskategorien und/oder dazugehörenden (potenziellen) Unterkategorien aus Runde 1 beziehen (siehe Übersicht in Abbildungen 5.6 und 5.7). Beispielsweise soll Hauptkategorie 1 alle Aussagen zu Veränderungsvorschläge zu der ursprünglichen Fachwissenshauptkategorie 1, zu deren fünf Unterkategorien sowie zu potenziell hinzuzufügenden Unterkategorien beinhalten.

2. Codieren des gesamten Materials mit den Hauptkategorien

Zeile für Zeile wurde daran anschließend mithilfe des Programms MAXQDA (VERBI Software, 1989-2019) das gesamte, bereits einleitend beschriebene, qualitative Datenmaterial zu den Items 6 und 7 durchgearbeitet und die Textpassagen wurden den neu definierten Hauptkategorien zugeordnet. Wurde von einer Person hierbei eine gemeinsame Aussage zu verschiedenen Fachwissenshauptkategorien getätigt, so wurde diese den beiden entsprechenden neuen Hauptkategorien zugeordnet. Demnach waren Mehrfachzuweisungen möglich. Den Vorgaben von Kuckartz (2016) entsprechend fand die Zuteilung von Textpassagen im Zweifel durch Einschätzung auf Basis der gesamten Freitextantwort einer Person zu beiden Items in Online-Fragebogen 2 statt.

3. Zusammenstellung aller Textstellen zu jeder der Hauptkategorien

Für jede der 10 Hauptkategorien wurden alle zugeordneten ursprünglichen Textpassagen in getrennten Analysedokumenten zusammengestellt. Um Zusammenhänge deutlich zu machen, wurden dabei Aussagen derselben Person im Rahmen der Items 6 (Korrekturen) und 7 (Ergänzungen) vor allen Aussagen der nächsten Person aufgelistet.

4. Induktives Bestimmen von Subkategorien am Material

Für die Ausdifferenzierung von Subkategorien - also die induktive Bildung der kleinsten trennbaren Veränderungsvorschläge durch Personen - durchlief jedes der 10 Dokumente mit Textpassagen die gleichen Analyseschritte (Kuckartz, 2016, S. 83): Zunächst wurde festgelegt, dass Subkategorien von thematischer Art jeweils eine Aussage zu einer oder mehreren (potenziellen) Fachwissensunterkategorien beinhalten sollten. Zusätzlich sollte offen codiert werden ohne Annahmen über den Grad der Abstraktheit der Subkategorien. Als Kodiereinheit wurde eine Sinneinheit festgelegt, die genau eine Aussage enthält.

Nach den Festlegungen wurde jeweils am Material entlang eine ungeordnete Liste mit Subkategorien erstellt, die jeweils eine Aussage wie z.B. „Die historischen Entdeckungen sollten aus Kategorie 1 herausgenommen werden.“ umfassen. Neue herausgearbeitete Aussagen im Text wurden dabei jeweils unter bereits existierenden Subkategorien subsumiert oder es wurden neue Subkategorien gebildet. Nach vollständiger Durcharbeitung jedes der 10 Dokumente wurden die Subkategorien jeweils geordnet, durch Bündelungen gleicher Aussagen systematisiert und es wurden jeweils eine Überschrift, eine Definition und - bei sehr ähnlichen Subkategorien - weitere Erläuterungen und Beispielpassagen zur Unterscheidung formuliert. Der daraus entstandene Kodierleitfaden für die Subkategorien in allen 10 Hauptkategorien ist in Anhang B.2 abgedruckt. Er umfasst für jede Hauptkategorie zwischen 5 und 12 Subkategorien und demnach zwischen 5 und 12 unterscheidbare Veränderungsvorschläge bezüglich einer Hauptkategorie im Fachwissensmodell.

Wie im Rahmen der Analysestrategie erläutert, erscheint es nur zielführend, diejenigen Veränderungsvorschläge der Expertinnen und Experten auf das Fachwissensmodell aus Runde 1 anzuwenden, welche auffällig häufig und bzw. oder gut begründet erscheinen. Um bei der Kategorisierung der Teilnehmendenantworten bereits Informationen zu abgegebenen Begründungen abzubilden, wurde für jede Subkategorie im vorgestellten Kategoriensystem und Kodierleitfaden in Anhang B.2 eine weitere Unterteilung in „Keine Begründung gegeben“ (Subkategoriennummer mit Suffix „a“) oder „Begründung gegeben“ (Subkategoriennummer mit Suffix „b“) angesetzt. So werden beispielsweise Antworten, die die Entfernung derselben Unterkategorie forderten in unterschiedliche Subkategorien eingeteilt, je nachdem ob sie die Entfernung begründeten oder einfach nur forderten. Beispielbegründungen wurden ebenfalls in den Kodierleitfaden mit aufgenommen. Insgesamt ergibt sich somit die doppelte Anzahl an Subkategorien für jede Hauptkategorie.

5. Codieren des kompletten Materials mit ausdifferenzierten Kategorien

Nach der Ausdifferenzierung wird das gesamte ursprüngliche Datenmaterial - nicht mehr unterteilt in Einzeldokumente pro Hauptkategorie - mit dem entwickelten Kategoriensystem codiert. Um die Ergebnisse schnell und übersichtlich darzustellen, wurde hierzu wiederum *MaxQDA* verwendet.

Bevor jedoch erweiterte Analysen der Ergebnisse im nächsten Unterpunkt durchgeführt wurden, fand in Analogie zu dem in Abschnitt 5.1.1 vorgestell-

ten Vorgehen die Überprüfung des Kategoriensystems hinsichtlich der Interraterreliabilität bzw. der InterCoderreliabilität als ein forschungsmethodisches Gütekriterium mithilfe einer Zweitcodierung statt. Dabei wurde das Kategoriensystem auf das gleiche Datenmaterial durch zwei unterschiedliche Personen angewandt. Als Maß für die Übereinstimmung der Code-Zuteilungen durch die beiden Personen für das nominale Kategoriensystem wurde wiederum Cohens κ berechnet (siehe Gleichung 5.1). Unter Einbezug der Subkategorien über alle Hauptkategorien hinweg ergab sich hierbei ein Wert von $\kappa = .8$, was nach den bereits diskutierten Interpretationen von Wirtz und Caspar (2002) einer sehr guten Übereinstimmung entspricht.

6. Visualisierungen, Analysen

Den letzten Schritt des Ablaufschemas einer inhaltlich-strukturierenden Qualitativen Inhaltsanalyse widmet Kuckartz (2016) der Visualisierung und Analyse der erarbeiteten Kategorien und deren Vorkommen im Datenmaterial. Wie bereits erwähnt, liegt im vorliegenden Fall ein Interesse darin, die Vielzahl an Veränderungsvorschlägen durch die Expertinnen und Experten auf ein in sich konsistentes Set aus häufig auftauchenden sowie nachvollziehbar begründeten Vorschlägen zu reduzieren.

Informationen über die Häufigkeit an Codierungen pro Subkategorie liefert das Programm *MaxQDA* intern in Form eines sogenannten *Code-Matrix-Browsers*, der aufgrund seines Umfangs in Anhang B.3 abgebildet ist. Dem Browser lässt sich entnehmen, dass Subkategorien in der Regel nur einmal - demnach nur von einer einzigen Person - bis zweimal sowie in Einzelfällen bis zu fünfmal genannt wurden. Bei einer Zusammenfassung von Subkategorien zu Veränderungsvorschlägen mit und ohne Begründungen ergeben sich etwas höhere Häufigkeiten, jedoch auch nur bis maximal 6 Nennungen pro Subkategorie. Die niedrigen Zahlen sind natürlich vorrangig dadurch bedingt, dass jede Hauptkategorie nur von 10 bis maximal 16 Expertinnen und Experten evaluiert wurde (siehe z.B. Tabelle 5.2), wobei zusätzlich nur etwa jede zweite Person die offenen Items 6 und 7 beantwortet hat. Die niedrigen Zahlen erlauben jedoch keine Häufigkeitsanalysen zum Kategorienausschluss in der Auswerteform von Runde 1, bei welcher augenscheinliche „Sprünge“ in Häufigkeiten identifiziert wurden. Stattdessen wird angenommen, dass eine mehrfache - dreifache bzw. zweifache - Nennung der gleichen Veränderungen in Anbetracht der niedrigen Zahlen bereits eine gewisse Bedeutung besitzt.

Gemeinsam mit dem zweiten Auswahlkriterium von Subkategorien - das Vorhandensein guter Begründungen für Veränderungen - wurde folgende Qualifizierungsstrategie entwickelt, auf welche alle Subkategorien aus der vorangegangenen Inhaltsanalyse hin untersucht wurden:

- a) Es werden alle Subkategorien mit Veränderungsvorschlägen behalten, die insgesamt mindestens dreimal von Teilnehmenden genannt wurden.
- b) Es werden zusätzlich alle Subkategorien behalten, die mindestens zweimal genannt wurden, wobei mindestens eine nachvollziehbare gute Begründung gegeben wurde.
- c) Alle beibehaltenen Subkategorien müssen miteinander vereinbar sein; das Set muss in sich konsistent sein.

Durch das Auswahlverfahren wurden insgesamt 43 Subkategorien mit Veränderungsvorschlägen ausgewählt, wobei einige Vorschläge lediglich die Umbenennung einzelner Begriffe in Titeln und Kurzdefinitionen fordern und andere die Entfernung oder das Hinzufügen von Unterkategorien oder die Neudefinition von Hauptkategorien beinhalten. Da Subkategorien als kleinste unterscheidbare Veränderungsvorschläge definiert wurden, beziehen sich dabei häufig mehrere Subkategorien auf die gleiche größere Veränderung am Kategoriensystem. Die Vielzahl an ausgewählten Veränderungsvorschlägen wurde zur Übersicht graphisch in den Abbildungen 5.11 und 5.12 dargestellt. Um die eingearbeiteten Veränderungen im Einzelnen nachzuvollziehen, kann das in Abschnitt 5.1.2 vorgestellte Kategoriensystem aus Runde 1 mit dem im nachfolgenden Abschnitt gezeigten System als Endergebnis von Runde 2 verglichen werden.

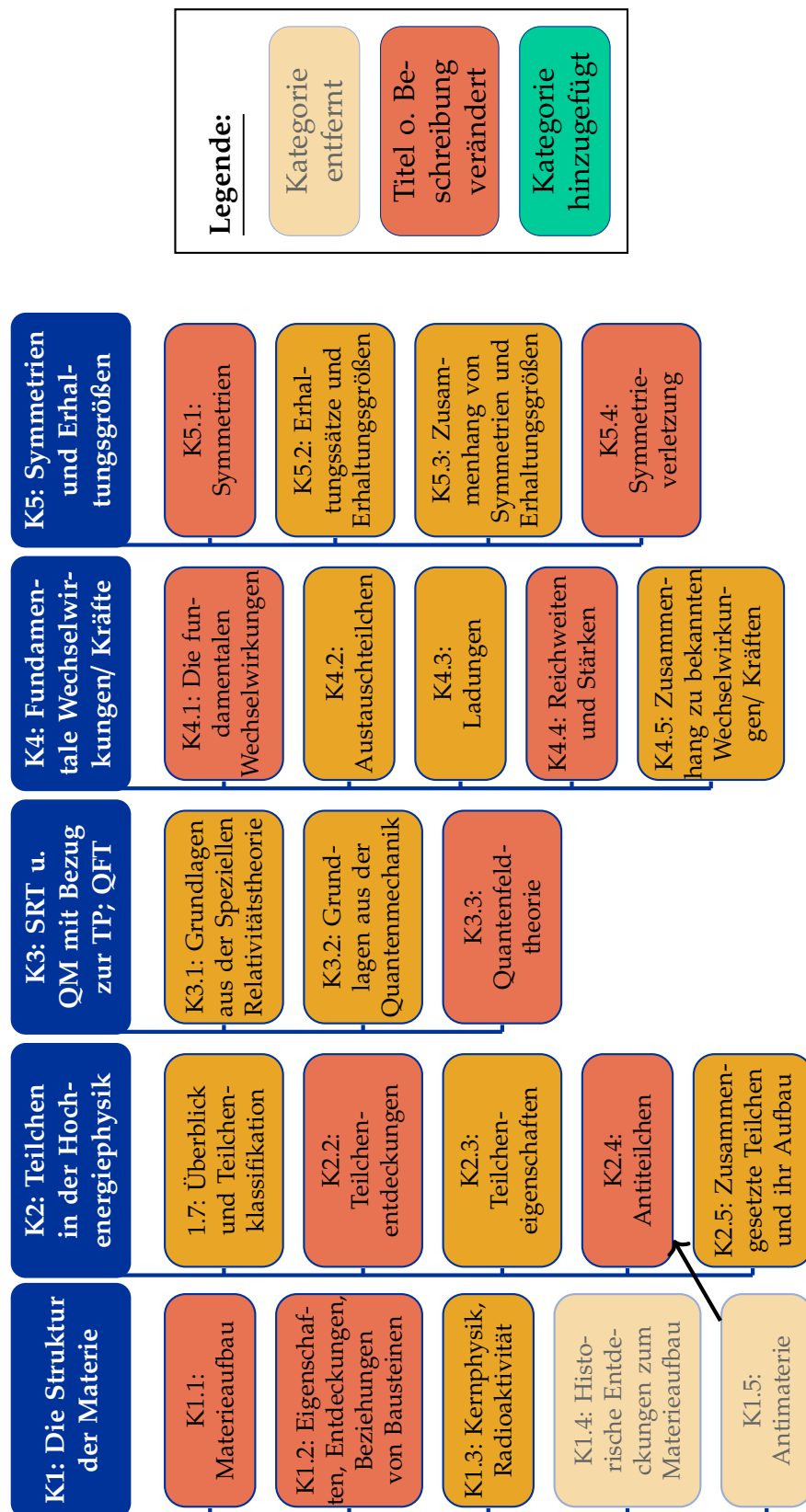


Abbildung 5.11: Teil 1 der Übersicht mit Veränderungsvorschlägen am Kategoriensystem der Teilnehmenden aus Runde 2

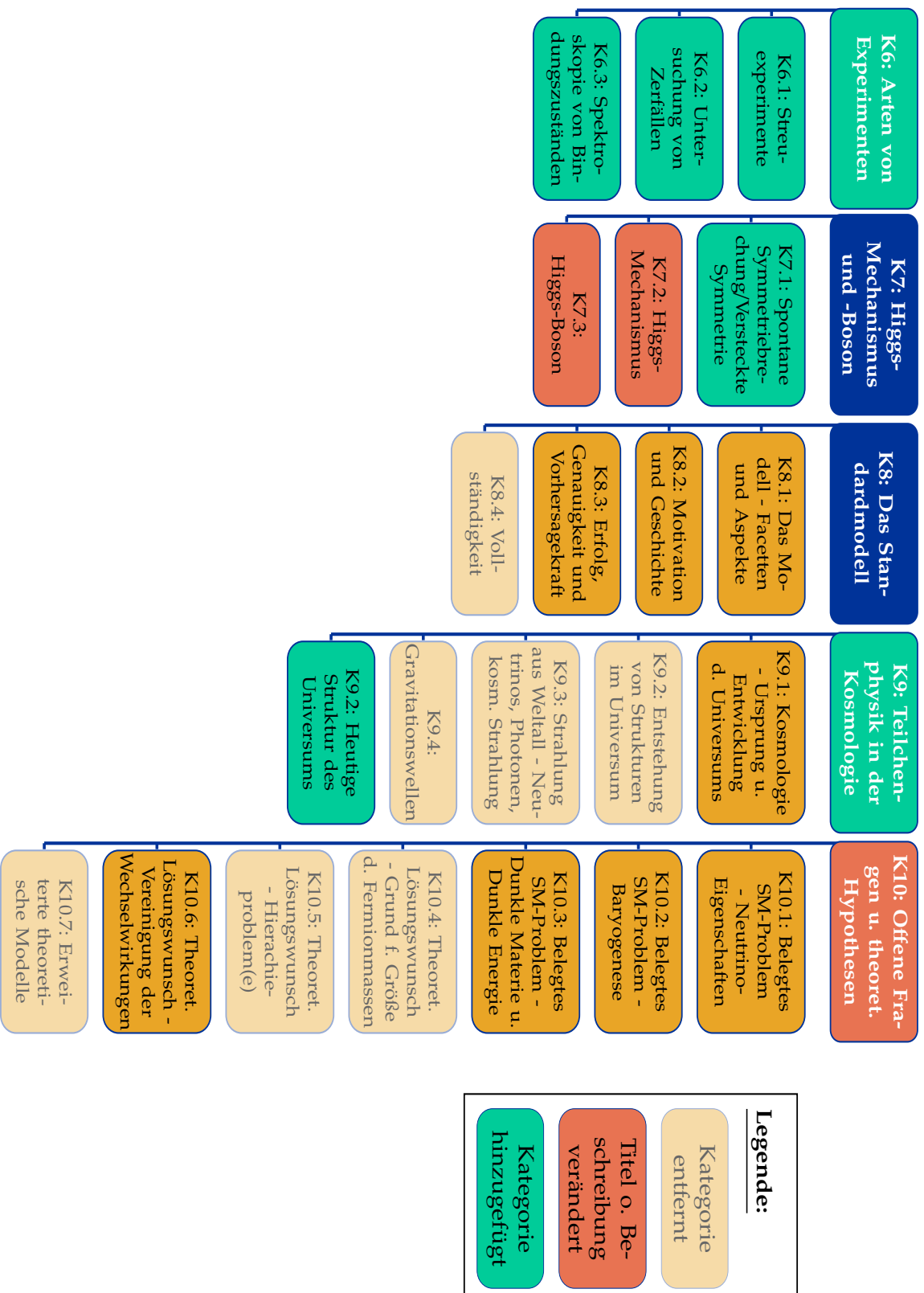


Abbildung 5.12: Teil 2 der Übersicht mit Veränderungsvorschlägen am Kategoriensystem der Teilnehmenden aus Runde 2

5.2.3 Ergebnis: Das inhaltlich validierte Modell

Werden die im vorangegangenen Abschnitt erarbeiteten finalen Veränderungsvorschläge des Expertise-Gremiums aus Befragungsrunde 2 auf das nach Runde 1 etablierte Kategoriensystem aus Fachwissenshaupt- und -unterkategorien angewandt, so ergibt sich das in Abbildung 5.13 dargestellte Kategoriensystem.

Insgesamt betrachtet umfasst das neue Kategoriensystem weiterhin 10 Hauptkategorien. Darüber hinaus wurde die Anzahl an Unterkategorien jedoch von 41 nach Runde 1 auf 35 Unterkategorien reduziert, was einen wichtigen Schritt im Hinblick auf eine Vereinfachung des Modells bedeutet. Im Vergleich zum Modell nach Runde 1 wurden die ursprünglichen Hauptkategorien 6 („Teilchenzerfälle und -interaktionen“) sowie 9 („Kosmologie und kosmische Strahlung; ART“) am grundlegendsten verändert. So erlangte einerseits die ehemalige Unterkategorie „Arten von Experimenten“ von Kategorie 6 als titelgebende neue Kategorie 6 größere Bedeutung nach Meinung des Gremiums, während die ehemalige Unterkategorie „Basisprozesse in der Feynman-Darstellung“ von Kategorie 6 in Kategorie 3 („Spezielle Relativitätstheorie und Quantenmechanik mit Bezug zur Teilchenphysik; Quantenfeldtheorie“) subsumiert wurde. Auf der anderen Seite wurde jeglicher fachwissenschaftlicher Inhalt aus dem Bereich der Allgemeinen Relativitätstheorie, wie z.B. die Gravitationswellen, aus Kategorie 9 mit der Begründung des nicht direkt ersichtlichen Zusammenhangs zu grundlegender Teilchenphysik entfernt. Zusätzlich wurde die Unterkategorie „Strahlung aus dem Weltraum ...“ von Kategorie 9 aus dem Kategoriensystem entfernt, da sie als natürliche Teilchenquelle für Hochenergieexperimente nach Ansicht des Gremiums eher in den Forschungszweig „experimentelle Methoden“ und nicht in den hier betrachteten Zweig „Erkenntnisse“ einzuordnen ist (siehe Forschungszweige in Kapitel 2). Die weiteren Unterkategorien der ursprünglichen Kategorie 9 („Ursprung und Entwicklung des Universums“ und „Heutige Struktur des Universums“) definieren die neue Hauptkategorie 9, welche sich nur noch mit dem Anteil der Teilchenphysik in der Kosmologieforschung beschäftigt.

Über die Kategorien 6 und 9 hinaus manifestieren sich die weiteren Veränderungen des Kategoriensystems hauptsächlich in der Entfernung, Umbenennung oder der Veränderung von Inhalten einzelner Unterkategorien. Nicht dargestellt in Abbildung 5.13 sind die neuen Kurzdefinitionen aller Haupt- und Unterkategorien, welche durch Einbezug der Veränderungen bezüglich der Definitionen durch die Expertinnen und Experten aus den Kurzdefinitionen nach Runde 1 hervorgegangen sind. Die neuen Kurzdefinitionen finden sich in Anhang A.2.

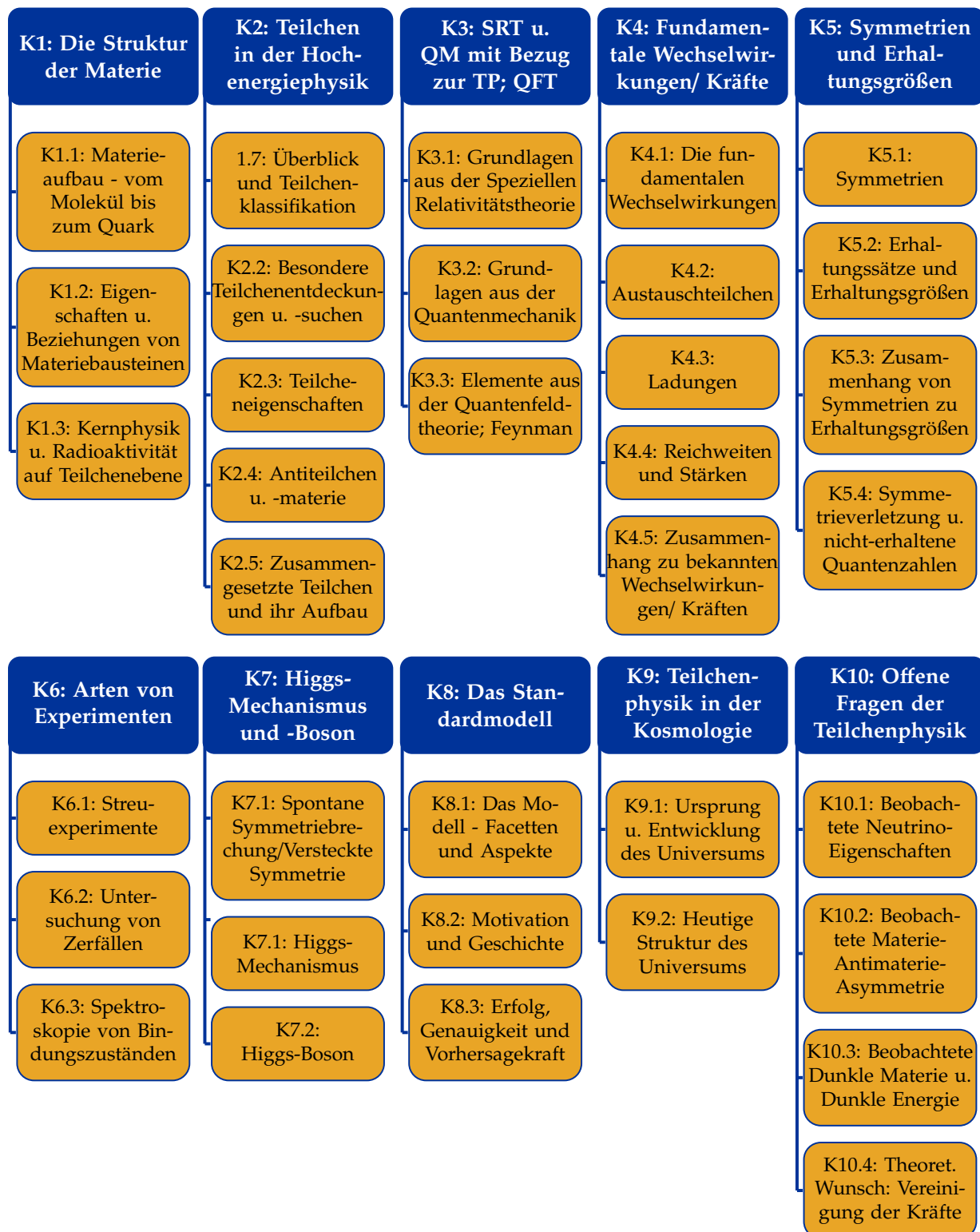


Abbildung 5.13: Finales System an Fachwissenskategorien, welches als inhaltlich validierter Modellentwurf für das Fachwissen von Lehrkräften mithilfe des Expertisegremiums in Runde 2 erarbeitet wurde. Hauptkategorien sind blau und Unterkategorien gelb dargestellt.

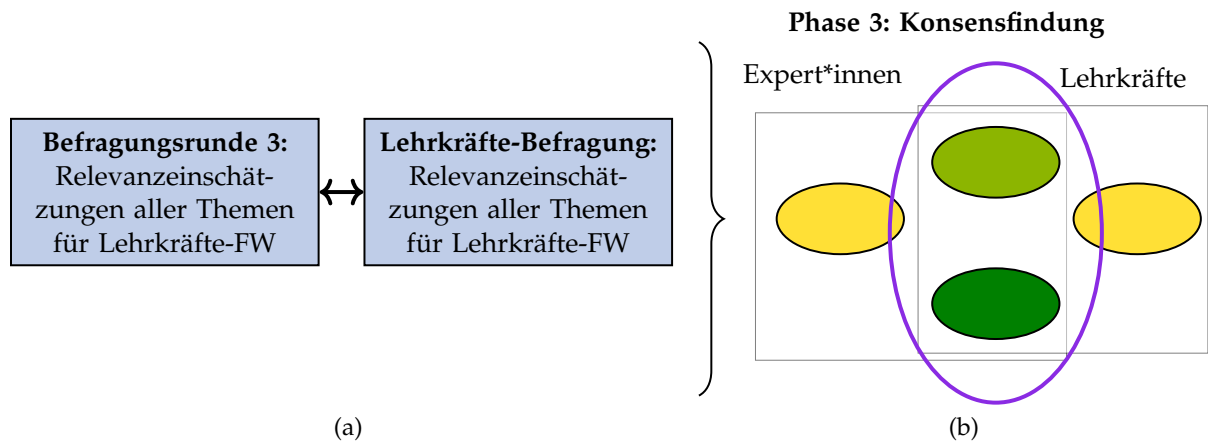


Abbildung 5.14: Ausschnitt aus dem Forschungsdesign für die dritte Phase der Delphi-Studie: a) durchgeführte Befragungen, b) Status des zu modellierenden Fachwissens. Ellipsen mit Schattierungen von grün bis gelb repräsentieren von den Teilnehmenden als relevant bis weniger relevant eingeschätzte Themen.

Das in Abbildung 5.13 dargestellte Kategoriensystem mit korrespondierenden Kurzdefinitionen bildet das inhaltlich validierte zweite Modell für das Fachwissen von Lehrkräften und wurde in der hier bzw. im Anhang dargestellten Form als Evaluationsgrundlage für Phase 3 des Delphi-Forschungsdesigns aus Kapitel 4.2 verwendet.

5.3 Auswertung Runde 3: Konsensfindung

Ziel der dritten Phase der Delphi-Befragung ist das Auffinden eines Konsenses unter den Expertinnen und Experten sowie unter den Lehrkräften zu den für das Lehrkräftefachwissen besonders relevanten teilchenphysikalischen Themen. Es soll dabei herausgearbeitet werden, ob und welche Themen in der Zusammenstellung aus den vorangegangenen Runden relevanter sind als andere. Statistisch signifikante Unterschiede werden auf Basis der Daten aus der dritten Befragung der Expertinnen und Experten sowie der Lehrkräftebefragung untersucht. Die entsprechenden Befragungsinstrumente wurden bereits in Kapitel 4.3.4 vorgestellt. Zur besseren Einordnung ist der für Phase 3 relevante Ausschnitt aus dem Gesamtforschungsdesign aus Kapitel 4.2 noch einmal in Abbildung 5.14 dargestellt.

In der Analysephase zur dritten Delphi-Befragung werden konkret folgende Forschungsleitfragen untersucht (siehe auch Kapitel 4.2):

Leitfrage 3a (L3a): Welche der in Phase 2 der Delphi-Befragung inhaltlich validierten Wissenskategorien sind besonders relevant für das Fachwissen von Lehrkräften?

Leitfrage 3b (L3b): Welche der vom Expertisegremium als besonders relevant eingeschätzten Themen können durch eine ähnliche Einschätzung der Lehrkräfte aus Praxissicht validiert werden?

Während **L3a** auf einen finalen Konsens unter den teilnehmenden Expertinnen und Experten über die fundamental wichtigsten fachwissenschaftlichen Themen abzielt, strebt **L3b** einen Abgleich mit der Einschätzung von Lehrkräften als den Expertinnen und Experten aus der Praxis an.

Für die benötigte **Datengrundlage** zur Beantwortung der beiden Leitfragen wurden die in Runde 3 teilnehmenden Expertinnen und Experten sowie Lehrkräfte in den Online-Fragebögen um eine Einschätzung aller 35 Unterkategorien mit teilchenphysikalischen Themen aus Runde 2 in Bezug auf ihre Relevanz für das Lehrkräftefachwissen gebeten. Die in Kapitel 4.3.4 beschriebene Einschätzung fand mittels Rating-Items auf sechsstufigen Likert-Skalen mit vorgegebenen verbalen Ankern von „1=überhaupt nicht relevant“ bis „6=sehr relevant“ statt. Wie bereits erläutert, sollte durch die Einschätzung aller Themen durch alle Teilnehmenden ein erhobener Datenumfang zur Auswertung erreicht werden, der im Gegensatz zu den vorangegangenen Befragungsrunden den Einsatz interferenzstatistischer Analyseverfahren zur Auffindung statistisch signifikanter Unterschiede in den Relevanzeinschätzungen zwischen verschiedenen Themen erlaubt. In der vorliegenden Analyse der Rating-Daten wurden Varianzanalysen (engl. *Analysis of Variance ANOVA*) zur Auffindung von Unterschieden eingesetzt. Insgesamt beantworteten 35 Expertinnen und Experten sowie 108 Lehrkräfte alle Rating-Items vollständig.

Für Befragungsrunde 3 wurde ebenfalls wie für Runde 2 in Kapitel 4.1.3 die Frage aufgeworfen, ob sich in den Delphi-Befragungen Unterschiede in den Einschätzungen von Personen aus verschiedenen Berufsgruppen oder von Teilnehmenden aus unterschiedlichen „Sozialisierungsländern mit der Teilchenphysik“ bezüglich des zu modellierenden Fachwissens zeigen. Für Runde 3 wird die Frage dahingehend konkretisiert und im Zuge der folgenden Auswertung nachgegangen, ob statistisch signifikante Unterschiede in den Rating-Ergebnissen der Kategorien unter verschiedenen Berufsgruppen (im Expertisegremium) sowie unter Teilnehmenden

aus verschiedenen Ländern (im Expertise- und Lehrkräftegremium) bestehen. Die für die Untersuchung benötigten Zugehörigkeiten wurden innerhalb der demographischen Frageblöcke in den Online-Fragebögen in Runde 3 erhoben, wobei die Variable Berufsgruppe im Expertisegremium einen Faktor mit drei Level (Fachwissenschaft, Fachdidaktik, Outreach) und das „Sozialisierungsland“ einen Faktor mit sieben Level (Expertisegremium) bzw. 32 Level (Lehrkräftegremium) bildet (siehe für Stichprobenverteilungen auch Kapitel 4.4).

Es wurde zur Beantwortung der beiden Forschungsleitfragen sowie der verschiedenen Personengruppenvergleiche folgende **Analysestrategie** auf die in Runde 3 erhobenen Daten angewandt, die hier in Kürze und in den verbleibenden Abschnitten des Kapitels im Detail beschrieben wird:

1. Zusammenfassung von Unterkategorien

Nach einer ersten kurzen deskriptiven Beschreibung der Rating-Daten für die Unterkategorien wird in Abschnitt 5.3.2 auf Basis des gemeinsamen Expertise- und Lehrkräftedatensatzes mithilfe von Reliabilitätsanalysen und explorativen Faktorenanalysen gezeigt, dass sich die Items zu den Unterkategorien jeweils einer Hauptkategorie zu einer Art Skala zusammenfassen lassen, die das gleiche zugrundeliegende Konstrukt - in diesem Fall die Relevanz der Hauptkategorie - messen. Daher kann die nachfolgende Analyse auf Basis der geringeren Anzahl an Hauptkategorien durchgeführt werden, was die Komplexität der Auswertung reduziert und das Treffen etwaiger praxisrelevanter Schlussfolgerungen vereinfacht. Für den neuen reduzierten Datensatz werden die Relevanzeinschätzungen der Hauptkategorien pro Person durch Bildung des Mittelwerts der Einschätzungen der Unterkategorien berechnet. Deskriptive Kennwerte des so gebildeten neuen Hauptkategoriedatensatzes werden in Abschnitt 5.3.3 vorgestellt und interpretiert.

2. Bildung und Vergleich von Relevanzgruppen unter Hauptkategorien

Mithilfe einer Varianzanalyse mit Messwiederholung (engl. *repeated measures ANOVA*) wird in Abschnitt 5.3.4 untersucht, ob sich Unterschiede in den mittleren Einschätzungen der Hauptkategorien durch die Expertinnen und Experten zeigen. Es handelt sich um eine Messwiederholung, da dieselben Personen alle Kategorien einschätzen. Mithilfe des ANOVA-Typs kann aufgelöst werden, welcher Anteil an Varianz in den Daten nur auf unterschiedliches Rating-Verhalten der Personen und welcher Anteil tatsächlich auf die Existenz der verschiede-

nen eingeschätzten Kategorien zurückzuführen ist. Mithilfe geeigneter Posthoc-Tests wird anschließend aufgedeckt, zwischen welchen Hauptkategorien sich die Unterschiede in den Einschätzungen befinden und welche Hauptkategorien relevanzbetreffend nicht voneinander zu unterscheiden sind. Letztere werden zusammengefasst zu sogenannten Relevanzgruppen. Die Gruppe(n) von Hauptkategorien mit höchster Relevanz beantworten Leitfrage **L3a** maßgeblich. Anschließend werden in gleicher Weise Relevanzgruppen für den Lehrkräftedatensatz herausgearbeitet. Die direkte Gegenüberstellung der höchstbewerteten Gruppen von Kategorien - sozusagen die Hitliste der teilchenphysikalischen Topthemen aus Expertise- und Lehrkräftesicht - liefert erste augenscheinliche Aufschlüsse bezüglich Leitfrage **L3b**.

3. Relevanzunterschiede zwischen Personengruppen

Um Leitfrage **L3b** abschließend zu beantworten, wird in Abschnitt 5.3.5 beschrieben, wie mithilfe einer zweifaktoriellen *Mixed*-ANOVA aufgeklärt werden kann, ob sich statistisch signifikante Unterschiede in den Einschätzungen einzelner Hauptkategorien zwischen Expertinnen und Experten einerseits sowie Lehrkräften andererseits zeigen. Es handelt sich um ein zweifaktorielles Modell, da zusätzlich zu den Kategorien auch die Zugehörigkeit zu den verschiedenen Personengruppen als Prädiktor in das an die Daten angepasste Modell aufgenommen wird. Durch die Wahl geeigneter Kontraste lässt sich detektieren, bei welchen Kategorien sich Unterschiede zwischen der Expertisegruppe und den Lehrkräften zeigen. Somit kann nach dem vorangegangenen qualitativen Vergleich von Anzahl und Zusammensetzung der Relevanzgruppen auch quantitativ belegt werden, ob und wo sich die beiden Gremien voneinander absetzen. Die Interpretation der Unterschiede lässt Schlussfolgerungen darüber zu, wie die beiden Gremien bei ihren Einschätzungen argumentieren.

Die weiteren angestrebten Personengruppenvergleiche werden in gleicher Weise mithilfe von zweifaktoriellen Varianzanalysen durchgeführt: Während sich Abschnitt 5.3.5.2 mit Berufsgruppenunterschieden im Expertisegremium beschäftigt, wird in den Abschnitten 5.3.5.3 und 5.3.5.4 untersucht, ob sich Unterschiede in den Einschätzungen von Teilnehmenden aus verschiedenen Ländern im Expertise- bzw. im Lehrkräftegremium zeigen.

4. Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Bildung und des Vergleichs von Relevanzgruppen im Expertise- und Lehrkräftedatensatz werden abschließend noch einmal in Bezug auf

das Forschungsanliegen der vorliegenden Arbeit interpretiert. Kapitel 5.3.6 erläutert, wie sich die erarbeiteten Relevanzgruppen in das konstruierte Fachwissensmodell aus Kapitel 3 einfügen lassen, in dem sie die Fachwissensdimension *Inhaltsbereich* füllen und ausschärfen. Des Weiteren werden auf Basis der erlangten Ergebnisse in der dritten Delphi-Befragungsrunde in Abschnitt 5.3.6.1 erste Empfehlungen darüber ausgesprochen, wie zukünftige Lehrkräfteausbildungs- oder -fortbildungsprogramme strukturell und inhaltlich gestalten werden sollten und wie Bildungsstandards für den Bereich Teilchenphysik definiert werden könnten.

5.3.1 Relevanzeinschätzungen der Unterkategorien

Die ursprünglich aus Befragungsrunde 3 gewonnenen Daten bestehen aus 35 Relevanzeinschätzungen der teilchenphysikalischen Unterkategorien aus Runde 2, die jeweils von insgesamt 143 Teilnehmenden abgegeben wurden (35 Expertinnen und Experten, 108 Lehrkräfte). Bevor für alle nachfolgenden Analysen eine Zusammenfassung der Unterkategorienbewertungen bezüglich Hauptkategorien durchgeführt wird, sollen hier zunächst einmal die ursprünglichen Rating-Daten gezeigt werden. Abbildung 5.15 zeigt die Verteilung der Ratings für den Expertise-, Abbildung 5.16 für den Lehrkräftedatensatz. Als übersichtliche Darstellungsweise wurden hierfür gestapelte Balkendiagramme (engl. *diverging stacked bar chart*) gewählt, die für den Umfang an Kategorien und in Anbetracht der zugrundeliegenden diskreten Werte auf Likert-Skalen geeignet sind, um einen ersten Überblick zu erhalten. Das Prädikat *diverging* markiert das Abtragen der „negativen“ Werte links sowie der „positiven“ Werte rechts einer festgelegten Nulllinie. Im vorliegenden Fall wurden die Einschätzungen „überhaupt nicht relevant“, „nicht relevant“ und „eher nicht relevant“ negativ und „eher relevant“, „relevant“ und „sehr relevant“ positiv konnotiert.

Die Diagrammwahl lässt in besonderer Weise die augenscheinliche Feststellung zu, dass sowohl die Expertise als auch die Lehrkräfte fast alle Unterkategorien mit durchschnittlich positiver Relevanz für das Fachwissen bewertet haben: Ein Großteil der Balken in den Abbildungen 5.15 und 5.16 befindet sich rechts von der Nulllinie.

Betrachtet man die alleinigen Einschätzungen der Expertise in Abbildung 5.15 differenzierter, so lässt sich feststellen, dass die Unterkategorien K3.3 (Quantenfeldtheorie und Feynmandiagramme), K6.3 (Spektroskopische Experimente) und K10.4 (Vereinigung der fundamentalen Kräfte) im Vergleich zu anderen Themen deutlich mehr niedrige Bewertungen besitzen. Dies spiegelt sich auch in den Mittelwerten

5 Auswertung und sukzessive Ergebnisbildung

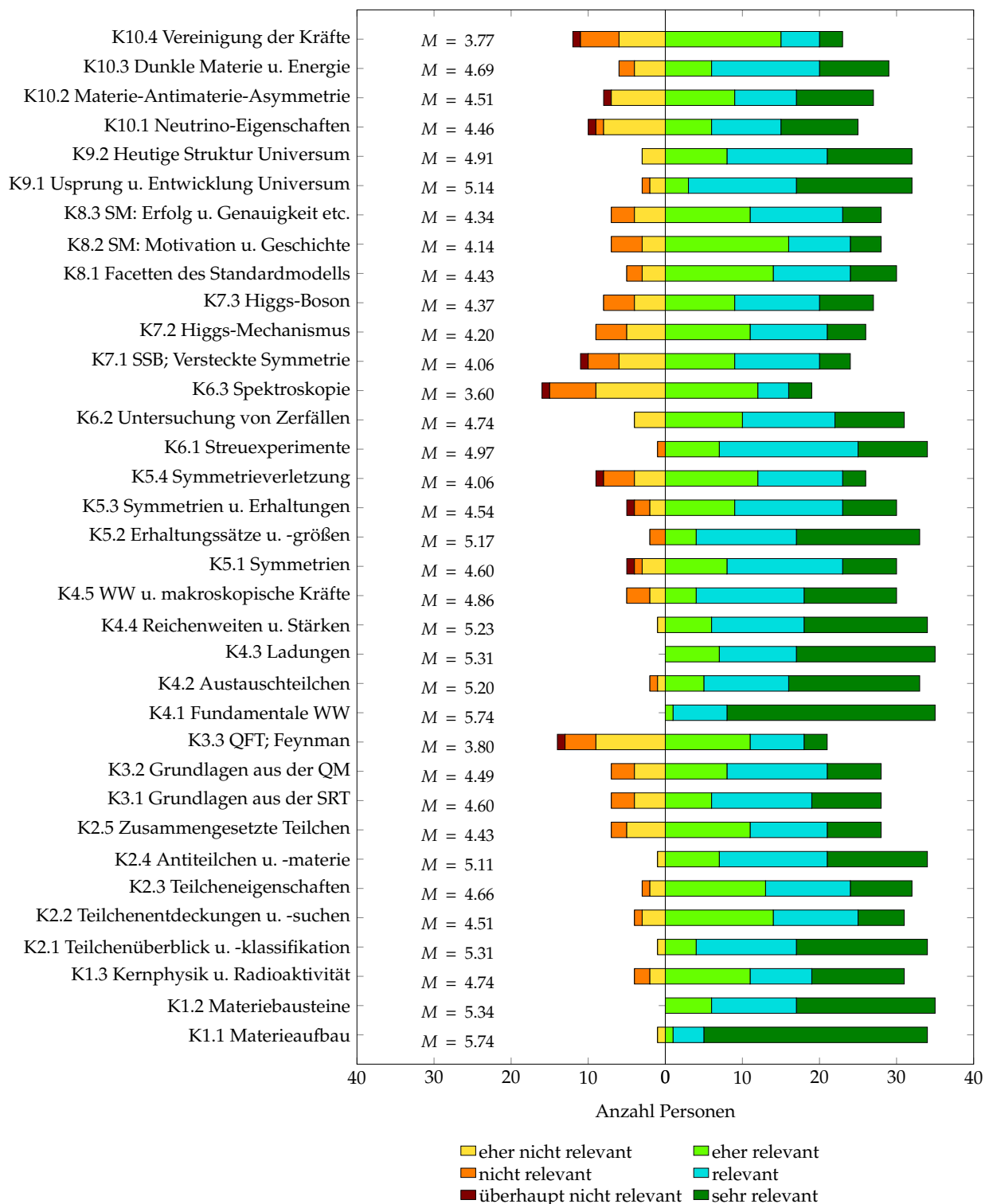


Abbildung 5.15: Verteilung der Unterkategorieneinschätzungen des Expertisegremiums in Runde 3 als *Diverging Stacked Bar Chart* mit zusätzlich angezeigten Mittelwerten M auf der Rating-Skala von 1=“überhaupt nicht relevant“ bis 6=“sehr relevant“.

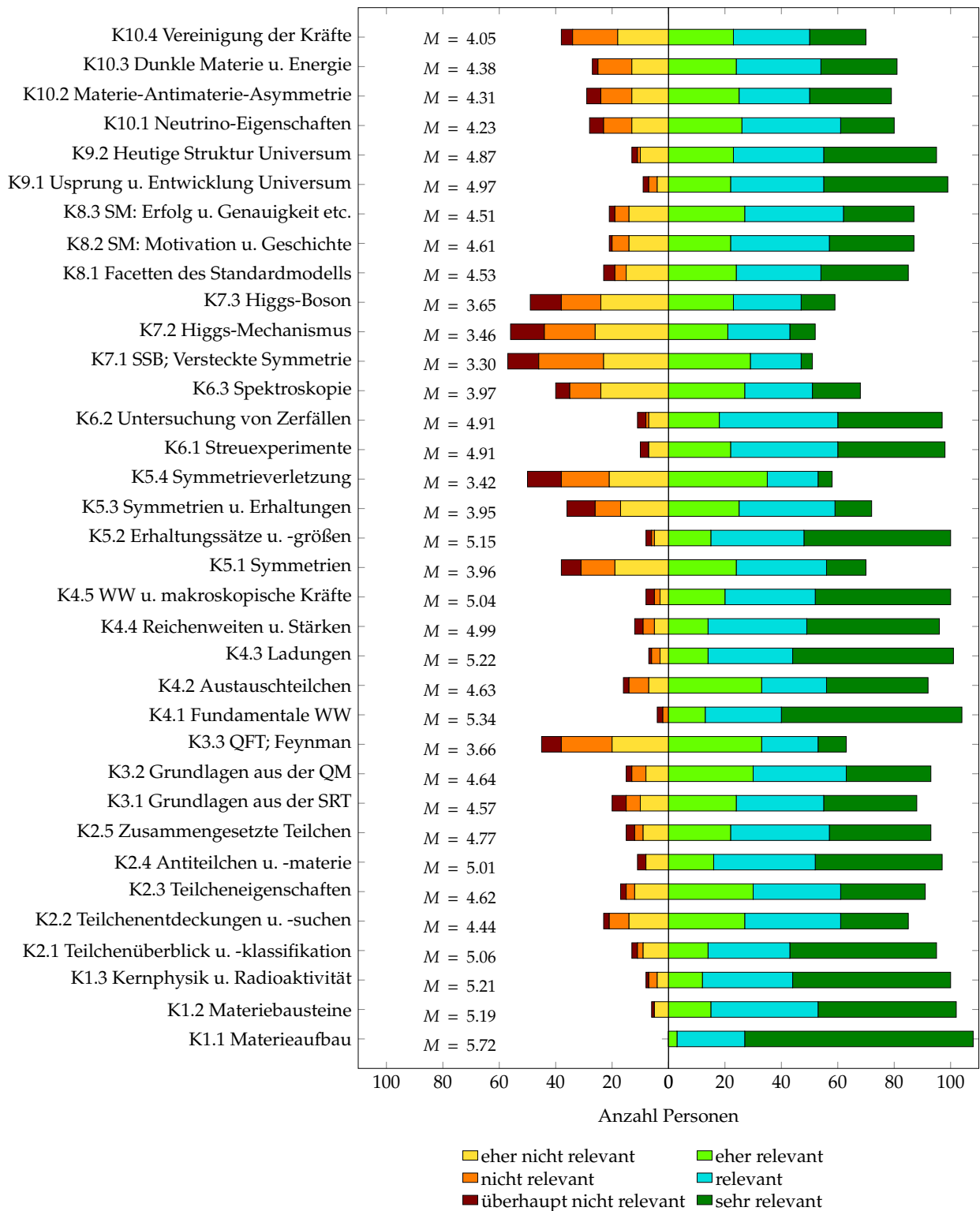


Abbildung 5.16: Verteilung der Unterkategorieneinschätzungen des Lehrkräftegremiums in Runde 3 als *Diverging Stacked Bar Chart* mit zusätzlich angezeigten Mittelwerten M auf der Rating-Skala von 1=“überhaupt nicht relevant“ bis 6=“sehr relevant“.

der Einschätzungen von $M = 3.8$ (K3.3), $M = 3.6$ (K6.3) und $M = 3.77$ (K10.4)⁶ wider, wobei festzustellen ist, dass dennoch alle Werte im positiven Relevanzbereich - über der bei 3.5 festgelegten Nulllinie - liegen. Dass sämtliche Unterkategorien den Expertinnen und Experten als relevant erscheinen ist natürlich nicht verwunderlich, da die Themen bereits von den Expertisegremien in den vorangegangenen Runden als potenziell relevant für das Fachwissen von Lehrkräften deklariert wurden. Die Validität der Ergebnisse ist somit jedoch ein weiteres Mal bestätigt. Auf der anderen Seite befinden sich unter den höchstbewerteten Themen der Expertise insgesamt zehn Unterkategorien mit Rating-Mittelwerten über 5.0 („relevant“), wobei absolute Spitzenreiter K1.1 (Materieaufbau) und K.4.1 (die vier fundamentalen Wechselwirkungen) mit Mittelwerten von je $M = 5.74$ sind. Des Weiteren gehören alle Unterkategorien zu Hauptkategorie 4 (Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte allgemein) bei den Expertinnen und Experten zu Themen mit höchster Relevanz.

Eine differenziertere Betrachtung der Lehrkräfteeinschätzungen in Abbildung 5.16 liefert ebenfalls interessante erste Erkenntnisse. Unter den am niedrigsten bewerteten Themen bei den Lehrkräften mit Mittelwerten unter 4.0 („eher relevant“) befinden sich insgesamt acht Themen, wobei die negativen Spitzenreiter hier K5.4 (Symmetrieverletzungen), K7.1 (Spontane Symmetriebrechung und versteckte Symmetrie) sowie K7.2 (Higgs-Mechanismus) mit Mittelwerten von $M = 3.41$ (K5.4), $M = 3.29$ (K7.1) und $M = 3.46$ (K7.2) sind. Die genannten Mittelwerte liegen hier unterhalb der Nulllinie bei 3.5 und die entsprechenden Unterkategorien werden daher im Mittel als eher nicht relevant für das Fachwissen eingeschätzt. Unter den von den Lehrkräften niedrig bewerteten Unterkategorien befinden sich auch alle zu Hauptkategorie 7 (Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson) gehörenden Themen. Andererseits werden von den Lehrkräften insgesamt neun Themen am relevantesten mit Mittelwerten über 5.0 eingeschätzt, wobei die Spitzenreiter hier sich mit denjenigen im Expertendatensatz decken: K1.1 (Materieaufbau) besitzt einen Rating-Mittelwert von $M = 5.72$ und K4.1 (vier fundamentale Wechselwirkungen) von $M = 5.34$.

Eine Interpretation der hier zunächst rein deskriptiv beschriebenen Einschätzungen von Expertinnen und Experten sowie Lehrkräfte findet sich nach Abschluss der interferenzstatistischen Vergleichsanalysen in den Abschnitten 5.3.4.3 und 5.3.5.

⁶ Zur Erinnerung: Die Skala der Rating-Items läuft numerisch von 1=“überhaupt nicht relevant“ bis 6=“sehr relevant“.

5.3.2 Zusammenfassung von Unterkategorien

Aus den in Runde 3 erhobenen Rating-Daten soll abgeleitet werden, welche teilchenphysikalischen Themen statistisch signifikant als relevanter bzw. wichtiger für das Fachwissen von Lehrkräften eingeschätzt werden als andere. Um die spätere Interpretation der Analyseergebnisse und das Aussprechen praxistauglicher Empfehlungen für Curricula und Fortbildungen zu erleichtern, ist es sinnvoll, die bewerteten Unterkategorien vorweg zu größeren Themenkomplexen zusammenzufassen. Auf Basis der Struktur des nach Runde 2 modellierten Fachwissens bietet sich eine Zusammenfassung aller Unterkategorien zu ihrer jeweiligen Hauptkategorie an. In den folgenden beiden Abschnitten wird gezeigt, dass die Rating-Daten aus Runde 3 eine derartige Zusammenfassung von Unterkategorien ohne großen Informationsverlust erlauben. Anhand des gemeinsamen Expertise- und Lehrkräftedatensatzes wird zunächst mit Reliabilitätsanalysen gezeigt, dass sich die Einschätzungen von Unterkategorien zur selben Hauptkategorie jeweils als Items einer Skala auffassen lassen. Zur Absicherung und für einen genaueren Blick in die einzelnen Hauptkategorien wird anschließend mithilfe von Faktorenanalysen die Eindimensionalität dahingehend überprüft, ob die Unterkategorien einer Hauptkategorie auch jeweils nur ein zugrundeliegendes Konstrukt messen.

Reliabilitätsanalysen

Um die interne Konsistenz der jeweils zu einer Skala gehörenden Items zu überprüfen, wurden entsprechend der Anzahl an fachwissenschaftlichen Hauptkategorien in dem postulierten Modell insgesamt 10 Reliabilitätsanalysen mithilfe des Statistikprogramms *R* auf Basis des gemeinsamen Rating-Datensatzes von Expertise und Lehrkräften durchgeführt. Als meist verwendetes Maß zur Quantifizierung der Reliabilität einer Skala (Cortina, 1993) sind in Tabelle 5.5 zunächst die Werte für Cronbachs α der 10 Skalen dargestellt. Nach den von George und Mallery (2003) vorgeschlagenen Interpretationsschwellwerten⁷ von α und in Anbetracht der niedrigen Item-Anzahl pro Skala, weisen fast alle zu den Hauptkategorien gehörenden Skalen eine gute bzw. sogar exzellente Reliabilität auf. Ausnahmen bilden hier Hauptkategorie (HK) 1 (Struktur der Materie) mit einer fragwürdigen Reliabilität und HK 6 (Teilchenzerfälle und -interaktionen) mit einer akzeptablen Reliabilität. Insbesondere für HK1 gibt die im nächsten Abschnitt beschriebene Faktorenanalyse weitere Aufschlüsse

⁷ exzellent: $\alpha > 0.9$, gut: $\alpha > 0.8$, akzeptabel: $\alpha > 0.7$, fragwürdig: $\alpha > 0.6$, schlecht: $\alpha > 0.5$

Hauptkategorie	Anzahl Items	Cronbachs α
K 1: Die Struktur der Materie	3	.6
K 2: Teilchen in der Hochenergiephysik	5	.83
K 3: SRT u. QM mit Bezug zur TP; QFT	3	.81
K 4: Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte	5	.86
K 5: Symmetrien und Erhaltungsgrößen	4	.90
K 6: Teilchenzerfälle und -interaktionen	3	.78
K 7: Higgs-Mechanismus u. -Boson	3	.92
K 8: Das Standardmodell	3	.86
K 9: Kosmologie u. kosm. Strahlung; ART	2	.92
K 10: Offene Fragen u. theoret. Hypothesen	4	.93

Tabelle 5.5: Werte für Cronbachs α als Reliabilitätsmaß der als Skalen aufgefassten Hauptkategorierelevanzen. Skalen wurden aus den Unterkategorieneinschätzungen mit angezeigten Itemanzahlen gebildet.

darüber, inwieweit eine fragwürdige interne Konsistenz der Skala auf mehr als einen zugrundeliegenden Faktor zurückzuführen ist. Neben Cronbachs α wurden in der Reliabilitätsanalyse auf Itemebene ebenfalls die als Trennschärfe bekannte Korrelation eines Items mit der aus den anderen Items gebildeten Skala sowie der α -Wert für die Skala ohne das entsprechende Item untersucht. Alle Ergebnisse hierzu finden sich in Anhang B.4. Für keines der Items zeigen sich auffällige Werte, die einen Ausschluss des Items aus der Skala nahelegen würden. Somit ist die Reliabilität der aus den Unterkategorien-Ratings gebildeten Skalen bis auf ein fragwürdiges Cronbachs α von Hauptkategorie 1 bestätigt.

Explorative Faktorenanalysen

Im Gegensatz zu Reliabilitätsanalysen können Faktorenanalysen über die Bestätigung oder Widerlegung einer internen Konsistenz der Daten hinaus auch eine mögliche mehrdimensionale Struktur auflösen. Im vorliegenden Fall wurde mithilfe von 10 Faktorenanalysen (Hauptkomponentenanalysen) die angenommene Eindimensionalität der Daten aus den jeweiligen Rating-Items im Rahmen jeder der 10 Hauptkategorien untersucht. Die Stichprobengröße des gemeinsamen Expertise- und Lehrkräftedatensatzes ist nach KMO-Test (Kaiser, 1970) und Bartlett-Test (Bartlett, 1937) für die Analyse geeignet.

Nach Prüfung der Voraussetzungen wurden 10 erste Faktorenanalysen auf den Rating-Ergebnissen aus Runde 3 durchgeführt, um Eigenwerte für mögliche zugrundeliegende Komponenten in den Datensätzen zu den Hauptkategorien zu erhalten. Die 10 zu den Eigenwerten korrespondierenden Screeplots finden sich in Anhang B.5. Es zeigt sich, dass für alle Hauptkategorien nur jeweils ein Faktor den von Kaiser (1960) geforderten Mindesteigenwerte von 1.0 bzw. den von Jolliffe (1986) vorgeschlagenen Wert von 0.7 erreichen. Die Ausnahme bildet HK1. Bei dieser Kategorie besitzt auch ein zweiter Faktor einen Eigenwert von 0.78. Da auch der Inflexionspunkt des Screeplots für HK1 nicht nur zu einem Faktor in den Daten rät, werden für die erste Hauptkategorie zwei Faktoren extrahiert. Für die neun Hauptkategorien mit einem extrahierten Faktor liegt der Anteil aufgeklärter Varianz durch den Faktor bei guten Werten zwischen 59 % (HK2) und 87 % (HK7) (siehe Tabellen in Anhang B.5). Für die erste Hauptkategorie liegt der Anteil aufgeklärter Varianz durch einen Faktor bei 59 % und für zwei Faktoren bei 85 %, was zusätzlich eine zukünftige Verwendung von zwei Faktoren nahelegt.

Bei einem finalen Durchlauf der Hauptkomponentenanalysen mit der extrahierten Anzahl an Faktoren wurde die Komponentenmatrix mithilfe der nicht orthogonalen Rotationsmethode *oblimin* für eine bessere Interpretation der Faktoren rotiert. Eine nicht-orthogonale Methode ist hier angemessen, da aufgrund inhaltlicher Nähe der zu verschiedenen Faktoren gehörenden Unterkategorien davon auszugehen ist, dass die Rating-Ergebnisse zu verschiedenen Faktoren nicht komplett unabhängig voneinander sind, sondern miteinander korrelieren. Die weniger interessanten rotierten Komponentenmatrizen für die Hauptkategorien 2 bis 9 finden sich in Anhang B.5. Wie erwartet zeigt sich hier, dass für alle Hauptkategorien alle entsprechenden Variablen (Items) hoch auf den einen festgelegten Faktor laden.

Die rotierte Komponentenmatrix für Hauptkategorie 1 ist in Tabelle 5.6 dargestellt. Da nach Field et al. (2012) nur Items mit Ladungen über 0.4 als für einen Faktor wichtige Variablen interpretiert werden, können die Unterkategorien K1.1 (Materieaufbau) und K1.2 (Materiebausteine) sehr eindeutig dem ersten Faktor und Unterkategorie K1.3 (Kernphysik und Radioaktivität auf Elementarteilchenebene) dem zweiten Faktor zugeordnet werden. Im Sinne klassischer Faktorenanalyse würde man nun Items fallen lassen, die nicht gemeinsam mit irgendeinem anderen Item einen Faktor bilden. K1.3 wird jedoch für die nachfolgenden Analysen als eigenständiger Faktor beibehalten, da die Unterkategorie durch die vorangegangenen Delphi-Runden sowie durch hohe Relevanzwerte in Runde 3 (siehe Abbildungen 5.15 und 5.16) als etablierter Teil des für Lehrkräfte relevanten Fachwissens anzusehen ist.

Unterkategorie	Faktor 1	Faktor 2
K 1.1: Materieaufbau	.94	-.12
K 1.2: Materiebausteine	.75	.27
K 1.3: Kernphysik u. Radioaktivität	.00	.98
Eigenwert:	1.48	1.08
% der Varianz:	49	36

Tabelle 5.6: Faktorladungen in der rotierten Komponentenmatrix aus der Faktorenanalyse der Unterkategorien aus Hauptkategorie 1. Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin

Zur Interpretation der beiden Faktoren für Hauptkategorie 1: Faktor 1 beinhaltet weiterhin Wissen über den Aufbau der Materie auf allen Ebenen vom Molekül bis zum Quark sowie über die jeweils zu einer Ebene gehörenden Materiebausteine. Der Faktor wird daher in Anlehnung an die ursprüngliche Hauptkategorie 1 allgemein als „Hauptkategorie 1a: Struktur der Materie“ bezeichnet. Faktor 2 hebt dagegen die besondere Rolle von radioaktiven Prozessen im Atomkern hervor und wie sie durch Teilcheninteraktionen auf Elementarteilchenebene beschrieben werden können. Faktor 2 wird daher zukünftig als „Hauptkategorie 1b: Kerne und Radioaktivität auf Teilchenebene“ bezeichnet.

Zusammengefasst zeigen die Faktorenanalysen eine 11-dimensionale Struktur in den Rating-Daten. Es wird demnach für die nachfolgend beschriebenen Analysen mit 11 neuen „Hauptkategorien“ statt mit den ursprünglichen 35 Unterkategorien gearbeitet. Die Aufteilung von Hauptkategorie 1 in zwei neue Kategorien widerspricht den Reliabilitätsanalysen im vorangegangenen Abschnitt nicht, da die Hauptkategorie dort bereits keine optimale Reliabilität gezeigt hatte. Die nachfolgend zu analysierenden Einschätzungen der Hauptkategorien durch die Delphi-Gruppen werden mithilfe des Mittelwerts der entsprechenden Unterkategorieneinschätzungen für jede Person gebildet.

5.3.3 Vorstellung der 11 neuen Hauptkategorien

In ähnlicher Weise wie die in Abschnitt 5.3.1 analysierten Unterkategorien lassen sich auch die Rating-Daten bezüglich der neu gebildeten 11 Hauptkategorien in Bezug auf die Forschungsleitfragen in Runde 3 deskriptiv analysieren. In Tabelle 5.7

Hauptkategorie	N_e	M_e	SD_e	SE_e	N_l	M_l	SD_l	SE_l
K1a: Struktur der Materie und ihre Bausteine	35	5.74	0.35	0.06	108	5.72	0.29	0.02
K1b: Kernphysik u. Radioaktivität	35	4.74	1.17	0.20	108	5.21	1.07	0.10
K2: Teilchen in der Hochenergiephysik	35	5.31	0.77	0.13	108	5.06	1.13	0.11
K3: SRT u. QM mit Bezug zur TP; QFT	35	4.60	1.13	0.19	108	4.57	1.06	0.10
K4: Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte	35	5.74	0.47	0.08	108	5.34	0.98	0.09
K5: Symmetrien und Erhaltungsgrößen	35	4.60	1.31	0.19	108	3.96	1.33	0.13
K6: Arten von Experimenten	35	4.97	0.78	0.13	108	4.91	0.85	0.08
K7: Higgs-Mechanismus u. - Boson	35	4.06	1.06	0.18	108	3.30	1.21	0.12
K8: Das Standardmodell	35	4.43	0.89	0.15	108	4.53	1.04	0.10
K9: Teilchenphysik in der Kosmologie	35	5.14	0.69	0.12	108	4.97	1.02	0.10
K10: Offene Fragen der Teilchenphysik	35	4.46	1.26	0.21	108	4.23	1.26	0.12

Tabelle 5.7: Deskriptive Kennwerte der Relevanzeinschätzungen der 11 Hauptkategorien von Expertinnen und Experten (Subskript e) und Lehrkräften (Subskript l) in Runde 3.

sind Stichprobengrößen, Mittelwerte, Standardabweichungen und Standardfehler der neuen Kategorien getrennt für Expertinnen und Experten sowie für Lehrkräfte dargestellt. Zunächst fällt auf, dass auch auf Ebene der zusammengefassten Hauptkategorien alle Themen (bis auf Hauptkategorie 7 bei den Lehrkräften) im Mittel als eher relevant - über der „Nulllinie“ bei 3.5 - eingeschätzt werden. Die herausragende Rolle von Hauptkategorie 1a (Struktur der Materie) und Hauptkategorie 4 (Wechselwirkungen) bleibt ebenfalls bestehen, wobei hier die Lehrkräfte HK1a höher bewerten als HK4. Negativer Spitzenreiter bei beiden Gruppen ist Hauptkategorie 7 (Higgs), welche von den Lehrkräften im Mittel noch niedriger bewertet wird als von den Expertinnen und Experten. Weitere Aufschlüsse dazu, ob die dargestellten Unterschiede in den Relevanzmittelwerten der Hauptkategorien auch tatsächlich statistisch signifikant und damit in Bezug auf die Forschungsfragen zu interpretieren sind, untersuchen die Varianzanalysen in den folgenden Abschnitten.

5.3.4 Bildung von Relevanzgruppen unter Hauptkategorien

Mithilfe einer Varianzanalyse (ANOVA), die typischerweise zum Vergleich mehrerer Mittelwerte im Rahmen von experimentellen Studien mit Messwiederholung eingesetzt wird, soll nachfolgend überprüft werden, ob bzw. welche der zuvor rein

deskriptiv untersuchten Unterschiede in den mittleren eingeschätzten Relevanzen der 11 Hauptkategorien auch statistisch signifikant sind. Wie bereits erwähnt, ist die Wahl der Analysemethode angemessen, da dieselben Personen zwar nicht zu unterschiedlichen Zeitpunkten, wohl aber zu verschiedenen thematischen Kategorien befragt wurden. Dementsprechend muss ein Varianzanteil in den Rating-Daten mitmodelliert werden, der sich aus einem personenimmanenten unterschiedlichen Rating-Verhalten ergibt (SS_z , Varianz zwischen Personen). Informationen, die für die Forschungsleitfrage **L3a** nach den wirklich relevanten teilchenphysikalischen Themen interessant sind, befinden sich dabei jedoch in den Einschätzungen verschiedener Kategorien durch dieselbe Person - also in der Varianz der Rating-Daten innerhalb von Personen (SS_i). Die Kategorien-Ratings sind in Personen verschachtelt (engl. *nested*).

Nach Field et al. (2012) ergibt sich die Varianz innerhalb von Personen bei dem vorgeschlagenen Typ von ANOVA aus einem Anteil SS_M , der auf die experimentelle Manipulation - hier also auf die unterschiedlichen Kategorien - zurückzuführen ist und aus einer nicht begründbaren Residualvarianz SS_R . Um im Omnibus-Test der ANOVA herauszufinden, ob sich zwischen irgendwelchen zwei Kategorien statistisch signifikante Relevanzunterschiede zeigen, wird ein F-Test durchgeführt, der den jeweils freiheitsgradbereinigten Varianzanteil des Modells mit dem der Residualvarianz vergleicht. Im Detail wird hierfür ein Multiples Regressionsmodell (*LME-Modell*, engl. *linear mixed effect model*) an die Daten angepasst, wobei die geschätzten Parameter im Fit die Mittelwertsunterschiede zwischen den Kategorien repräsentieren. Als Prädiktoren im *LME-Modell* werden der Personenfaktor sowie der Kategorienfaktor angesetzt und deren Vorhersagekraft für die beobachteten Daten untersucht. Wird der F-Test der ANOVA signifikant - passt also z.B. das Modell mit dem Prädiktor „Kategorie“ besser zu den Daten als ohne Prädiktor - können geeignete Posthoc-Tests durchgeführt werden, um zu ermitteln, zwischen welchen Kategorien sich die Relevanzunterschiede befinden. Daraus kann schlussendlich ebenfalls gefolgert werden, welche Kategorien relevanzbetreffend nicht voneinander zu unterscheiden sind. Letztere werden zusammengefasst zu sogenannten **Relevanzgruppen**.

Die Ergebnisse der Varianzanalyse und die beschriebene Bildung von Relevanzgruppen unter den 11 Hauptkategorien werden im Folgenden zunächst getrennt für Expertise- und Lehrkräfteeinschätzungen vorgestellt und bezüglich der Beantwortung von Forschungsleitfrage **L3a** interpretiert. Anschließend dient die direkte Gegenüberstellung der Hitliste von Gruppen mit höchster Relevanz von Expertise und Lehrkräften einer ersten Beantwortung von Leitfrage **L3b**.

5.3.4.1 Relevanzgruppen des Expertisegremiums

Zur Veranschaulichung der zu vergleichenden Relevanzen sind für die Varianzanalyse des Expertisedatensatzes in Abbildung 5.17 zunächst die Mittelwerte der Einschätzungen der 11 Hauptkategorien gemeinsam mit den Standardfehlern als sortiertes Balkendiagramm dargestellt. Neben dem bereits bekannten Auffinden von Hauptkategorien mit höchster und niedrigster mittlerer Relevanz (HK1a und HK4 bzw. HK7) wird hier ebenfalls eine Reihenfolge der Kategorien dazwischen sichtbar, wobei die Untersuchung der Unterschiede benachbarter Kategorien in der nachfolgenden Analyse von besonderer Bedeutung ist.

Bei der Anpassung der verschiedenen *LME*-Modelle an die Rating-Daten im Rahmen der *ANOVA* zeigte sich unter Hinzunahme der 11 Kategorien als Prädiktor ein hochsignifikant besserer Fit an die Daten verglichen mit dem Grundmodell, welches lediglich den Personenfaktor als Prädiktor annimmt ($\chi^2(10) = 135.17, p < .001$). Dementsprechend besitzt der Kategorientyp Einfluss auf die Relevanzeinschätzungen. Eine Übersicht aller Fit-Parameter des besseren *LME*-Modells mit Kategorienratings genestet in Personen findet sich in Anhang B.6.

Um aufzuzeigen, wo sich die signifikanten Unterschiede zwischen den Hauptkategorien befinden, wurde ein Posthoc-Test mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt⁸. Bei den paarweisen *t*-Tests wurde hierbei das Signifikanzniveau so angepasst, dass der gesamte Typ-I-Fehler bei dem üblicherweise festgelegten Niveau von $\alpha = .05$ bleibt. Bonferroni gilt nach Field et al. (2012) als einer der strengsten Posthoc-Tests. Positive Ergebnisse des Posthoc-Tests - also Kategorienpaare mit signifikant unterschiedlicher Relevanz - sind in der bekannten Sternnotation ebenfalls in Abbildung 5.17 dargestellt. Für eine übersichtlichere Interpretationsgrundlage wurden die Kategorien mit nicht-signifikant unterschiedlichen Relevanzen zu insgesamt drei Relevanzgruppen zusammengefasst⁹. Die Gruppen sind in Abbildung 5.18 dargestellt und werden im nachfolgenden Abschnitt interpretiert.

Vor einer Interpretation der Unterschiede ist jedoch noch zu untersuchen, wie stark überhaupt der Effekt ist, den die Kategorien auf die Relevanzeinschätzungen

⁸ In der Regel werden durch das Setzen vordefiniert Kontraste im *LME*-Modell bereits während des Fits Signifikanztests der zu vergleichenden Mittelwerte durchgeführt. Hier kommt stattdessen ein Posthoc-Test zum Einsatz, da die Einschätzungen aller Kategorien mit allen Kategorien ohne Hypothese miteinander verglichen werden sollen.

⁹ Um auf einfachere Weise Gruppen mit statistisch nicht voneinander unterscheidbaren Mittelwerten zu bilden, könnte man auch einen Duncan-Test als Posthoc-Test verwenden. Hier wurde stattdessen die Variante mit der Bonferroni-Korrektur gewählt, da sie im Gegensatz zum Duncan-Test den Typ-I-Fehler konstant hält, was bei derart vielen zu ziehenden Vergleichen zwischen Kategorien von großer Bedeutung ist.

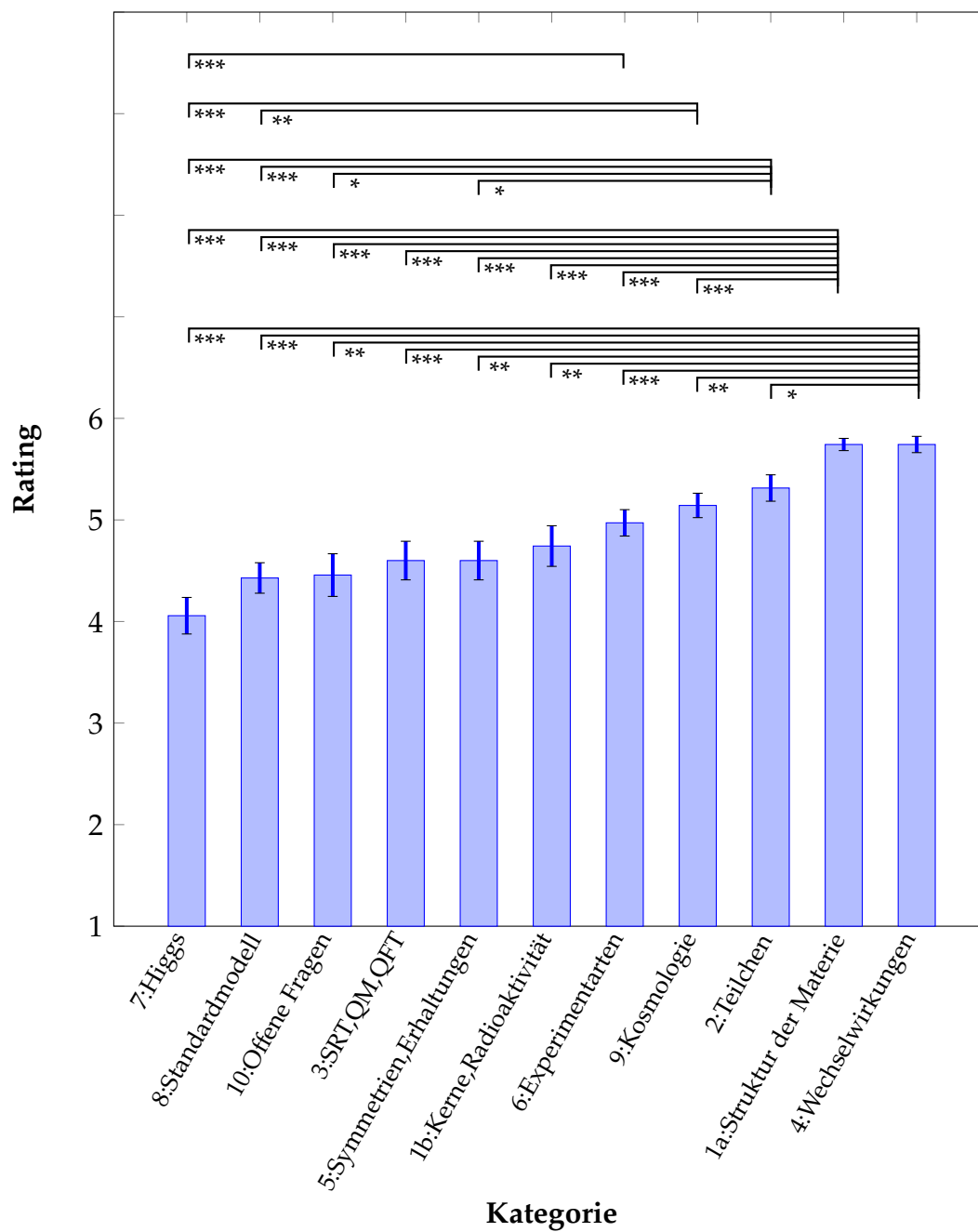


Abbildung 5.17: Mittelwerte und Standardfehler der Relevanzeinschätzungen der 11 Hauptkategorien durch das Expertisegremium in Runde 3, sortiert von links nach rechts vom kleinsten bis zum größten Mittelwert. Sterne markieren durch Posthoc-Tests der Varianzanalyse aufgedeckte Mittelwertunterschiede (siehe Text).

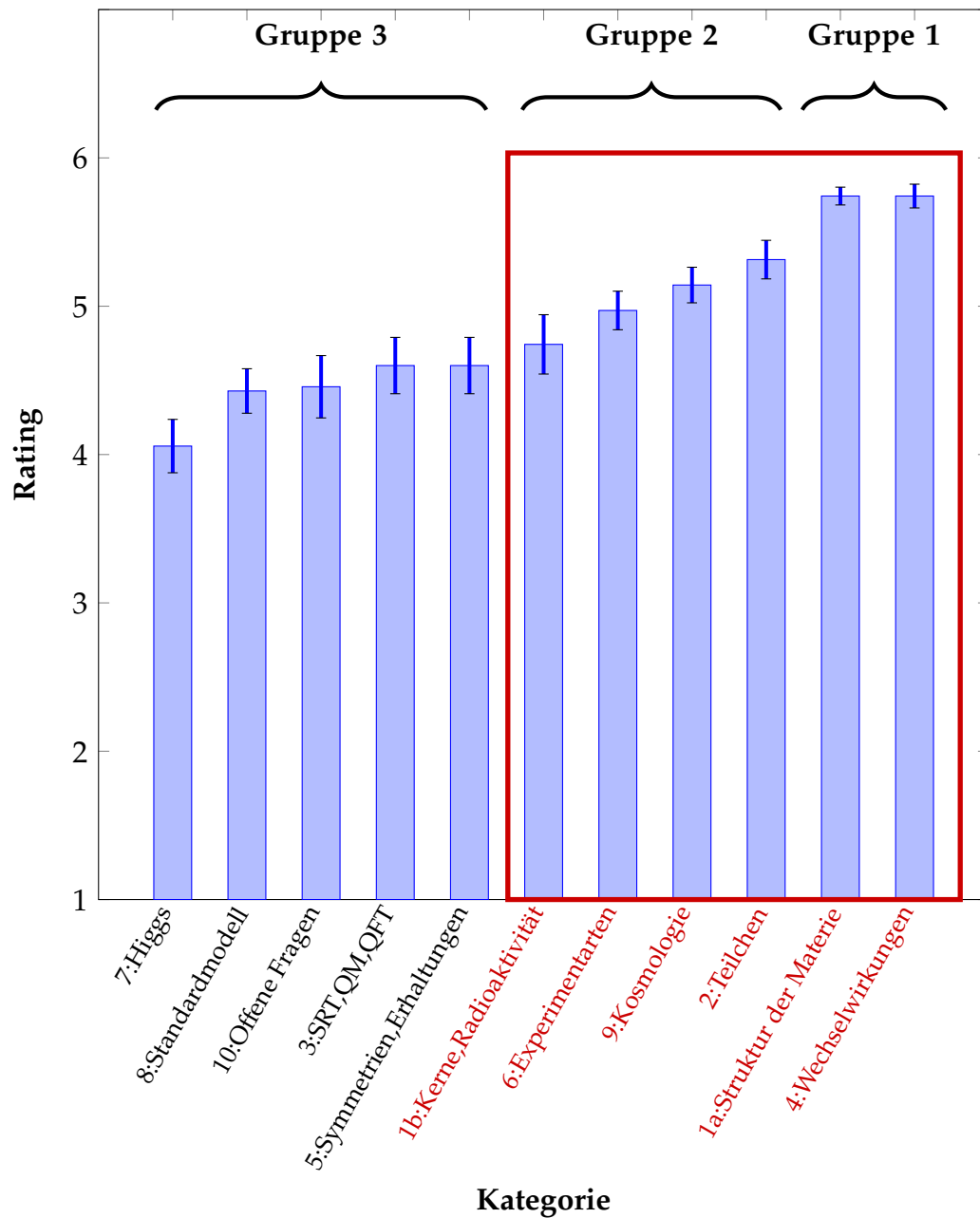


Abbildung 5.18: Mittelwerte der eingeschätzten Kategorienrelevanz durch das Expertise-gremium in Runde 3, zusammengefasst in drei Gruppen von Kategorien mit jeweils statistisch nicht voneinander unterscheidbarer mittlerer Relevanz. Rot markiert sind Kategorien, die von Expertinnen und Experten sowie von Lehrkräften als relevanter eingeschätzt wurden als nicht rot-markierte Kategorien.

haben. Anders ausgedrückt, wie hoch ist der Varianzanteil durch das Modell im Vergleich zur Residualvarianz. Die relevanten Effektstärken werden mithilfe von

$$R = \sqrt{\frac{t^2}{t^2 + df}} \quad , \quad (5.13)$$

berechnet, wobei t der Wert der t -Statistik aus dem entsprechenden t -Test des paarweisen Vergleichs ist und $df = N - 1$ die Anzahl der Freiheitsgrade sind. N gibt die Personenanzahl an. Die Werte von R sind für alle signifikanten Kategorienvergleiche in der Tabelle in Anhang B.6 aufgelistet. Es zeigt sich, dass mit einer kleinsten Effektstärke von $R = .56$ zwischen HK10 (Offene Fragen) und HK2 (Teilchen) und einer größten Effektstärke von $R = .88$ zwischen den Randkategorien HK4 (Wechselwirkungen) und HK7 (Higgs) alle statistisch signifikanten Vergleiche auch eine große Effektstärke aufweisen. Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung der gefundenen Unterschiede in den Einschätzungen der Expertinnen und Experten.

Interpretation der Relevanzgruppen

Wie in Abbildung 5.18 verdeutlicht, finden sich in den Kategorieneinschätzungen des Expertisegremiums in Runde 3 insgesamt drei Gruppen von Kategorien, innerhalb derer sich jeweils in Bezug auf Relevanz für das Lehrkräftefachwissen keine statistisch signifikanten Unterschiede finden.

In der Gruppe von Kategorien, die von den Expertinnen und Experten mit der **höchsten Relevanz** ausgezeichnet wurden, befinden sich die beiden Kategorien „Fundamentale Wechselwirkungen“ und „Materieaufbau“. Wie ausführlich im Rahmen der *Big Ideas* der Teilchenphysik in Kapitel 2.2.3 erläutert, umfasst die Kategorie der Wechselwirkungen dabei Wissen über diejenigen vier Interaktionsmöglichkeiten von Elementarteilchen, mittels derer sich alle bekannten physikalischen Prozesse beschreiben lassen. Wie erwartet wird die entsprechende Kategorie sehr hoch bewertet, da sich das für die Teilchenphysik zentral wichtige Standardmodell und somit auch große Teile der Fachsystematik dieses Forschungsgebiets mit den Wechselwirkungen beschäftigen. Die Kategorie zum Aufbau der Materie umfasst nach den *Big Ideas* in Kapitel 2.2.1 Wissen über die Bestandteile der uns umgebenden Materie und über die Kräfte, die diese zusammenhalten, und zwar auf allen Ebenen vom „großen“ Molekül bis hin zum „kleinen“ Quark. Die Kategorie weist zum einen unter allen Kategorien die meisten Berührungspunkte der eher abstrakten Teilchenphysik zu unserer Lebenswelt und zur Alltagswelt von Schülerinnen und Schülern auf, was

die Entscheidung des Expertisegremiums beeinflusst haben könnte. Zum anderen sind mit dem Thema Atommodelle bereits Teile der Kategorie in den schulischen Curricula vorhanden (siehe z.B. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2016). Es ist anzunehmen, dass die Überlappung ebenfalls Einfluss auf die Einschätzungen des Gremiums hatte.

In der Gruppe mit **zweithöchster Relevanz** befinden sich insgesamt vier Themen. Die Kategorie „Teilchen“ beinhaltet nach Kapitel 2.2.2 Wissen zu den bekannten Elementarteilchen und aus diesen zusammengesetzten Teilchen über die Materiebausteine hinaus. Teilchen als Namensgeber des Forschungsgebiets sind neben den Wechselwirkungen ein zentral wichtiger Aspekt des Standardmodells, werden jedoch aus Sicht der Teilnehmenden nicht gleichwertig eingeschätzt. Wie in Kapitel 2.2.5 erläutert, werden Teilchen im Formalismus der Quantenfeldtheorie nur als Anregungen des größeren Konstrukts des Feldes verstanden, was eventuell die niedrigere Einschätzung des Gremiums im Vergleich zu den Wechselwirkungen erklären könnte. Die Modellierung mithilfe von Feldern wäre somit in der Sprache von Spiralcurricula als Basiskonzept und in der Tradition der Didaktischen Rekonstruktion als elementare Grundidee zu bezeichnen (Kattmann, Duit, Gropengießer & Komorek, 1997). Als zweite Kategorie in der Gruppe findet sich der Beitrag der Teilchenphysik zu Kosmologie. Der Beitrag umfasst nach Kapitel 2.2.6 insbesondere Wissen über die fundamentalen Prozesse beim Ursprung, bei der Entwicklung und in der heutigen Struktur des Universums. Des Weiteren findet sich in der Gruppe die Kategorie zum Wissen über die verschiedenen Experimentarten wie z.B. Streuexperimente, die in der Kern- und Teilchenphysik durchgeführt werden (siehe Kapitel 2.2.3.4) sowie die Kategorie „Kernphysik und Radioaktivität auf Teilchenebene“. Letztere umfasst Wissen darüber, wie sich Phänomene wie Stabilität und Zerfall von Atomkernen durch fundamentale Wechselwirkungen auf Teilchenebene beschreiben lassen. Als ein Teilaspekt des Materieaufbaus ließe sich die Relevanz von Radioaktivität hier ebenfalls durch die Existenz des Themas in den Lehr- und Bildungsplänen begründen.

Die Gruppe mit **dritthöchster Relevanz** besteht aus den verbliebenen fünf Kategorien. „Symmetrien und Erhaltungen“ beinhaltet nach den *Big Ideas* in Kapitel 2.2.4 Wissen über die physikalischen Symmetrien, mithilfe derer sich Teilchenwechselwirkungen beschreiben lassen und aus denen heraus Erhaltungsgrößen erklärt werden können. „SRT, QM, und QFT“ umfasst Wissen über die der Teilchenphysik zugrundeliegenden Konzepte aus Spezieller Relativitätstheorie und Quantenmechanik und ihre Vereinheitlichung in der Quantenfeldtheorie, welche Wechselwirkungen formal beschreiben kann (siehe Kapitel 2.2.5). Die Kategorie „Offene Fragen“ fasst promi-

nente Problemstellungen aktueller Forschungsergebnisse zusammen (Kapitel 2.2.7) und die in Kapitel 2.2.5 spezifizierten Kategorien „Standardmodell“ und „Higgs“ beinhalten Wissen über das sehr erfolgreiche Standardmodell der Teilchenphysik zur einheitlichen Beschreibung von Wechselwirkungen sowie über den theoretischen Ansatz des Higgs-Mechanismus, welcher die Teilchenmassen im Standardmodell erklären kann. Gemeinsamkeiten der Kategorien dieser letzten Gruppe und damit auch Aufschlüsse für die niedrigere Einschätzung durch die Expertinnen und Experten werden nachfolgend diskutiert.

Ein zentrales Ziel der dritten Befragungsrunde war die Beantwortung folgender Forschungsleitfrage:

Leitfrage 3a (L3a): Welche der in Phase 2 der Delphi-Befragung inhaltlich validierten Wissenskategorien sind besonders relevant für das Fachwissen von Lehrkräften?

Es wurde zuvor eine Struktur von drei Kategoriengruppen mit unterschiedlich hoher mittlerer Relevanz rekonstruiert. Die Kategorien in den Gruppen mit höchster und zweithöchster Relevanz - nachfolgend als *Gruppe 1* und *Gruppe 2* bezeichnet - bilden dabei die Antwort auf die Frage **L3a**. Vergleicht man die teilchenphysikalischen Themen in diesen beiden Gruppen mit denjenigen in der Gruppe mit dritthöchster Relevanz (*Gruppe 3*), so lassen sich zentral wichtige unterscheidende Merkmale erkennen.

In *Gruppe 3* befinden sich ausschließlich Themen mit einem hohen Grad an abstrakter mathematischer Beschreibung. Die Themen wie Standardmodell, Higgs-Mechanismus oder die offene Frage nach der Vereinigung von Wechselwirkungen bedienen sich quantenfeldtheoretischer Modellierungen und sind allgemein schwer anschaulich vorstellbar.

Dagegen befinden sich in den *Gruppen 1 und 2* Themen, die von konzeptuellerer Art sind und auch anschaulich leichter dargestellt werden können. Ein Beispiel hierfür wäre Wissen darüber, welche Teilchen aufgrund welcher Ladungseigenschaften mithilfe welcher Wechselwirkungen interagieren können und in welchen Experimenten man solche Prozesse beobachten könnte. Außerdem befindet sich in *Gruppe 2* noch der Bezug zur Kosmologie. Das Thema weist nicht unbedingt eine hohe Anschaulichkeit auf. Praxiserfahrungen zeigen jedoch, dass das Thema einen hohen Faszinationsgrad für Kinder und Jugendliche besitzt. Dieser „Wow-Faktor“ z.B. bezüglich des Urknalls (*Big Bang*) könnte ein Grund für die hohe Einschätzung des

Gremiums sein. Alle abgegebenen Interpretationen zur Argumentationsweise der Expertinnen und Experten sind natürlich von spekulativem Charakter. Weitere Aufschlüsse könnten unter anderem Follow-Up-Interviews liefern (siehe Ausblick).

5.3.4.2 Relevanzgruppen des Lehrkräftegremiums

Die Varianzanalyse zur Auffindung von Relevanzgruppen unter den Hauptkategorien kann in gleicher Weise auch auf die Einschätzungen der Lehrkräfte in Befragungsrunde 3 angewandt werden. Abbildung 5.19 zeigt zunächst wieder Mittelwerte und Standardfehler der zu vergleichenden Kategorien. Wie an späterer Stelle diskutiert werden wird, ergibt sich hier augenscheinlich bei gleichbleibend am niedrigsten bewerteter Hauptkategorie 7 (Higgs) eine unterschiedliche Reihenfolge für die nach Relevanzmittelwerten sortierten Kategorien im Vergleich zu den Einschätzungen der Expertinnen und Experten.

Bei der Anpassung der *LME*-Modelle im Rahmen der *ANOVA* zeigt sich bei den Lehrkräften wiederum eine hochsignifikante Verbesserung des Fits durch Hinzunahme der Kategorien als Prädiktor für die Rating-Daten ($\chi^2(10) = 615.56, p < .001$). Die Fit-Parameter des besseren Modells können in Anhang B.6 nachgelesen werden. Die Ergebnisse des Posthoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zur Auffindung der signifikanten Mittelwertunterschiede zwischen Kategorien sind durch Sterne in Abbildung 5.19 dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden Kategorien mit nicht-signifikant unterschiedlichen Relevanzen wiederum zu Relevanzgruppen zusammengefasst, welche in Abbildung 5.20 gezeigt sind. Effektstärken für alle signifikanten Unterschiede wurden analog zur Analyse bei den Expertinnen und Experten mithilfe von Gleichung 5.13 berechnet und sind in Anhang B.6 aufgelistet. Mit einer kleinsten Effektstärke von $R = .27$ zwischen HK6 (Experimentarten) und HK1b (Kerne und Radioaktivität) und einer größten Effektstärke von $R = .91$ zwischen den Randkategorien HK1a (Materieaufbau) und HK7 (Higgs) weisen alle statistisch signifikanten Vergleiche eine substantielle Effektstärke auf.

Interpretation der Relevanzgruppen

Obwohl im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Fokus auf den Einschätzungen der Kategorien durch das Expertisegremium und den späteren Abgleich mit den Lehrkräfteeinschätzungen liegt, so ist doch zunächst ein kurzer Blick in die exklusiven Lehrkräfte-Ergebnisse sehr interessant.

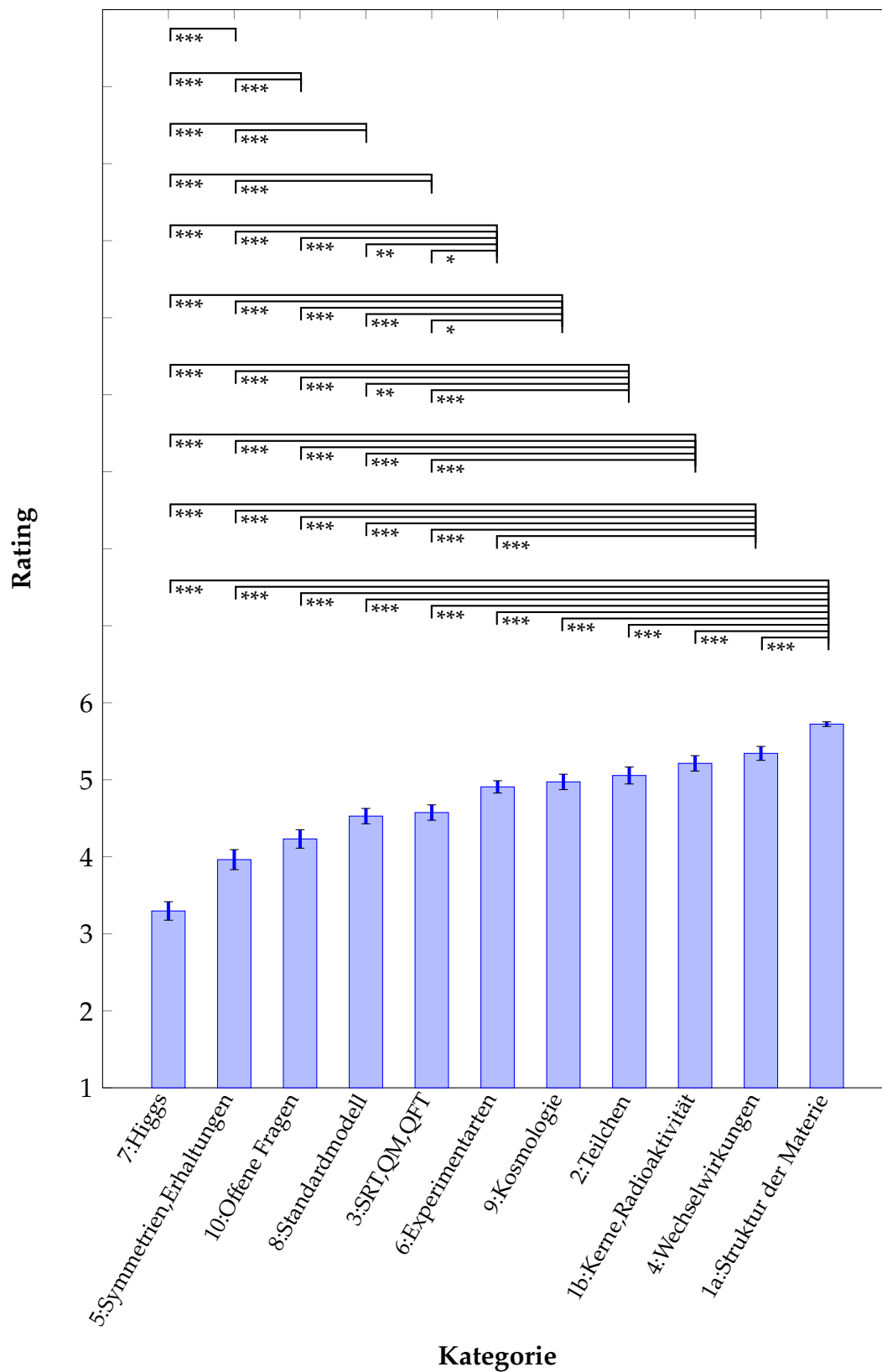


Abbildung 5.19: Mittelwerte und Standardfehler der Relevanzeinschätzungen der 11 Hauptkategorien durch das Lehrkräftegremium in Runde 3, sortiert von links nach rechts vom kleinsten bis zum größten Mittelwert. Sterne markieren durch Posthoc-Tests der Varianzanalyse aufgedeckte Mittelwertunterschiede (siehe Text).

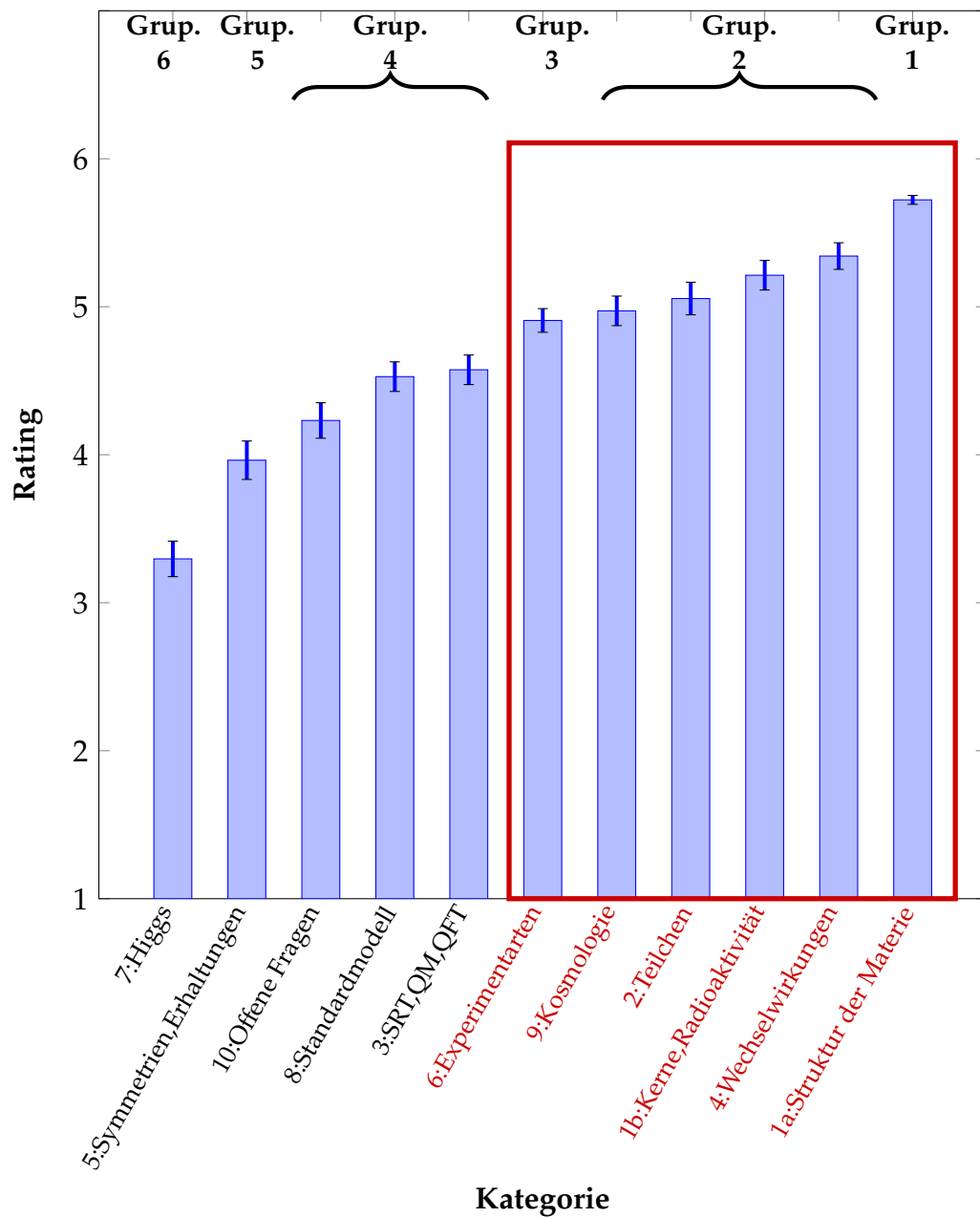


Abbildung 5.20: Mittelwerte der eingeschätzten Kategorienrelevanz durch das Lehrkräftegremium in Runde 3, zusammengefasst in drei Gruppen von Kategorien mit jeweils statistisch nicht voneinander unterscheidbarer mittlerer Relevanz. Rot markiert sind Kategorien, die von Expertinnen und Experten sowie von Lehrkräften als relevanter eingeschätzt wurden als nicht rot-markierte Kategorien

Es zeigen sich hier unter den Kategorien relevanzbetreffend offenbar sechs Abstufungen. Die Lehrkräfte messen ausschließlich dem Wissen zum Materieaufbau die höchste Relevanz bei. Das Ergebnis spricht für die Hypothese, dass die Relevanz des Themas sich in seiner Nähe zu den aktuellen Lehr- und Bildungsplänen begründet, auf welche sich Lehrkräfte noch stärker berufen als die Expertinnen und Experten. An niedrigster Stelle - ebenfalls alleinstehend - findet sich die Kategorie zum Higgs-Mechanismus. Hier zeigen sich Übereinstimmungen von Expertise und Lehrkräften. Die niedrige Relevanz könnte wiederum auf die hochgradige Nicht-Anschaulichkeit und den komplexen Formalismus der Theorie des Higgs-Mechanismus zurückzuführen sein. Zwischen den beiden Kategorien mit höchster und niedrigster Relevanz finden sich bei den Lehrkräften vier weitere Relevanzgruppen (siehe Abbildung 5.20), wobei sich alle vormalig als wenig anschaulich ausgezeichneten Kategorien wie „Symmetrien und Erhaltungen“ oder „Das Standardmodell“ auch hier in der Hälfte der Gruppen mit niedriger Relevanz befinden.

5.3.4.3 Relevanzgruppenvergleich: Expertise vs. Lehrkräfte

Das zweite zentrale Ziel der dritten Befragungsrunde war die Beantwortung folgender Forschungsleitfrage:

Leitfrage 3b (L3b): Welche der vom Expertisegremium als besonders relevant eingeschätzten Themen können durch eine ähnliche Einschätzung der Lehrkräfte aus Praxissicht validiert werden?

Vergleicht man zunächst qualitativ die Relevanzgruppen des Expertisegremiums in Abbildung 5.18 und des Lehrkräftegremiums in Abbildung 5.20 miteinander, so fällt trotz Unterschieden in der Rangfolge und in der jeweiligen Anzahl an Relevanzgruppen auf, dass beide Delphi-Gremien die gleichen sechs Kategorien als relevanter eingeschätzt haben als die restlichen Themen. Es handelt sich um die Kategorien „Wechselwirkungen“, „Materieaufbau“, Teilchen“, „Kosmologie“, „Experimentarten“ und „Kerne und Radioaktivität“. Die sechs relevanteren Kategorien sind in den beiden genannten Abbildungen rot markiert und zum besseren Vergleich noch einmal im Rahmen von Hitlisten in Abbildung 5.21 dargestellt.

Es ist insbesondere festzustellen, dass die gezeigten Hitlisten der TOP-6-Themen die beiden Gruppen mit höchster und zweithöchster Relevanz bei den Expertinnen und Experten umfassen - welche bereits Leitfrage **L3a** beantwortet haben - und ebenfalls die obere Hälfte der Relevanzgruppen der Lehrkräfte einschließen. Die

	Experten:	Lehrkräfte:
höchste Relevanz	1. Wechselwirkungen	1. Materieaufbau
zweithöchste Relevanz	2. Materieaufbau	2. Wechselwirkungen
dritthöchste Relevanz	3. Teilchen in der HEP	3. Kerne, Radioaktivität
	4. TP in der Kosmologie	4. Teilchen in der HEP
	5. Experimentarten	5. TP in der Kosmologie
	6. Kerne, Radioaktivität	6. Experimentarten

Abbildung 5.21: TOP 6: Die Hitlisten der relevantesten fachwissenschaftlichen Kategorien.

TOP-6-Themen sind somit als Antwort auf Leitfrage **L3b** auch aus Praxissicht auf ihre Relevanz für das Lehrkräftefachwissen validiert.

Bei der direkten Gegenüberstellung der Hitlisten in Abbildungen 5.21 fallen neben Gemeinsamkeiten auch Unterschiede auf. Zum einen messen Lehrkräfte im Vergleich zum Expertisegremium allein der Kategorie „Materieaufbau“ die allerhöchste Relevanz bei. Die von den Expertinnen und Experten sehr hoch eingeschätzten Wechselwirkungen finden sich bei den Lehrkräften in der Gruppe zweithöchster Relevanz auf einer Ebene unter anderem mit den Teilchen und dem Kosmologiebeitrag. Ein Grund für den unterschiedlichen Inhalt der Gruppe mit höchster Relevanz könnte - wie bereits angedeutet - darin liegen, dass zwar beide Gruppen aus Curriculumssicht den Materieaufbau hoch bewerten, aber die Expertinnen und Experten zusätzlich aus einer Fachsystematik heraus argumentieren, in welcher das Standardmodell und große Teile der Teilchenphysikforschung auf den Wechselwirkungen fußen.

Ein zweiter prägnanter Unterschied in den Hitlisten liegt darin, dass sich die Kategorie „Experimentarten“ beim Expertisegremium in der Gruppe mit zweithöchster und bei den Lehrkräften in der Gruppe mit dritthöchster Relevanz befindet. Das Ergebnis scheint erstaunlich, da den Lehrkräften bereits eine Favorisierung von anschaulicheren Themen unterstellt wurde. Die Anschaulichkeit wäre bei den Experimentarten gegeben. Eine Begründung für die Einschätzung könnte darin liegen, dass teilchenphysikalische Experimente aufgrund der hohen benötigten Energien nur in sehr eingeschränktem Maße im Klassenzimmer durchgeführt werden können und die Lehrkräfte Wissen darüber daher als weniger relevant empfinden.

Ein letzter auffälliger Unterschied in den Hitlisten findet sich in der Rangposition der Kategorie „Kerne und Radioaktivität“, welche bei den Expertinnen und Experten niedriger ist als bei den Lehrkräften. Ein Grund für die unterschiedliche Einschätzung könnte wiederum darin liegen, dass Phänomene wie Stabilität und Zerfall von Atomkernen bereits in den schulischen Curricula vorhanden sind. Es ist jedoch an dieser Stelle noch fraglich, ob tatsächlich signifikante Unterschiede in den Einschätzungen der Kategorie „Kerne und Radioaktivität“ zwischen den Expertinnen und Experten sowie den Lehrkräften bestehen, da die Kategorie natürlich jeweils gremiumsintern nicht von den anderen Kategorien in der Gruppe zweithöchster Relevanz zu unterscheiden ist. Ob die interpretierten Unterschiede in den Einschätzungen von Expertisegremium und Lehrkräften auch statistisch signifikant sind, wird im Rahmen einer weiteren Varianzanalyse in Abschnitt 5.3.5.1 aufgeklärt.

5.3.5 Relevanzunterschiede zwischen Personengruppen

Um Leitfrage **L3b** auch aus quantitativer Sicht abschließend zu beantworten, wird eine weitere Varianzanalyse auf den Gesamtsatz der Rating-Daten von Expertinnen und Experten sowie Lehrkräften durchgeführt, mithilfe derer etwaige statistisch signifikante Unterschiede in den Einschätzungen einzelner Hauptkategorien zwischen dem Expertisegremium einerseits und den Lehrkräften andererseits aufgedeckt werden sollen. Wie nachfolgend erläutert, wird hierzu eine zweifaktorielle *Mixed-ANOVA* durchgeführt. Es handelt sich um eine Form von *ANOVA*, die bei den vorliegenden Daten darüber hinaus auch dazu geeignet ist, die weiteren in der Einführung zu Kapitel 5.3 aufgeworfenen Personengruppenunterschiede wie Ländervergleiche oder Berufsgruppenvergleiche unter den Expertinnen und Experten zu untersuchen. Daher wird die Analyse hier einmal dargestellt und über ihre Ergebnisse für die verschiedenen Personengruppenvergleiche wird in den nachfolgenden Abschnitten berichtet.

Für die angestrebten Vergleiche wird bei der Modellierung in der Varianzanalyse die Varianz durch experimentelle Manipulation SS_{M1} , die bisher lediglich auf unterschiedliche Kategorien zurückgeführt wurde, um einen Anteil SS_{M2} ergänzt, der sich aus der unterschiedlichen Gruppenzugehörigkeit von Personen - z.B. Expertinnen und Experten oder Lehrkräfte - ergibt. Die Gesamtmodellvarianz ist dann gegeben durch

$$SS_M = SS_{M1} + SS_{M2} + SS_{M1 \times M2} \quad , \quad (5.14)$$

wobei $SS_{M1 \times M2}$ der Varianzanteil ist, der durch die Interaktion von Kategorien und Personengruppen aufgeklärt werden kann. SS_M wird wiederum in einem F -Test mit der Residualvarianz SS_R verglichen, wobei nun der Einfluss von zwei Faktoren - Kategorien und Personengruppen - auf die Güte des Modells untersucht werden kann. Es handelt sich daher um eine zweifaktorielle ANOVA. Da die Varianz des Modells sich teilweise „innerhalb“ von Personen (beim Faktor Kategorien) und teilweise „zwischen“ Personen (beim Faktor Personengruppen) befindet, wird eine sogenannte *Mixed-ANOVA* durchgeführt (siehe z.B. Field et al., 2012).

Technisch gesehen werden weiterhin *LME*-Modelle an die Rating-Daten angepasst, wobei nun in einer hierarchischen Regression zum Grundmodell (nur Personenfaktor) sukzessiv die Prädiktoren Kategorien, Personengruppen und die Interaktion von Kategorien und Personengruppen hinzugefügt werden. Wird ein Fit an die Daten durch hinzufügen eines Prädiktors signifikant besser, so kann im Umkehrschluss gefolgert werden, dass der Prädiktor einen signifikanten Einfluss auf das Rating-Verhalten hat, und dass es an mindestens einer Stelle einen signifikanten Unterschied zwischen Niveaus eines Prädiktors - z.B. zwischen unterschiedlichen Kategorien oder zwischen Personengruppeneinschätzungen derselben Kategorie - gibt.

Im vorliegenden Fall wird insbesondere die zu überprüfende Hypothese aufgestellt, dass es Unterschiede zwischen den Einschätzungen derselben Kategorie durch verschiedene Personengruppen gibt. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Analysen, in welchen alle Kategorien mit allen Kategorien verglichen werden sollten, können hier durch die Hypothese bereits vor der Anpassung der *LME*-Modelle geeignete Kontraste derart gewählt werden, dass die geschätzten Fit-Parameter in der Regression direkt die Mittelwertunterschiede verschiedener Personengruppen der gleichen Kategorie repräsentieren. Dadurch werden bereits bei der Anpassung der Modelle an die Daten p -Werte und Effektstärken der interessierenden Vergleiche mitberechnet und die Durchführung von Posthoc-Tests entfällt.

Zusammengefasst wird als Ergebnis der Varianzanalyse ermittelt, ob die Hinzunahme der verschiedenen Personengruppen überhaupt eine Verbesserung des Fits an die Rating-Daten bewirkt und falls ja, bei welchen Kategorien sich signifikante Unterschiede zeigen, und wie groß deren Stärke ist. Nachfolgend werden die Ergebnisse für die vier Personengruppenvergleiche Expertise-Lehrkräfte, Berufsgruppen im Expertisegremium, Landeszugehörigkeiten im Expertisegremium und Landeszugehörigkeiten im Lehrkräftegremium vorgestellt.

Modellprädiktoren	<i>df</i>	<i>L</i>	<i>Test</i>	χ^2	<i>p</i>
1: Personen	4	−2387.40			
2: + Kategorien	14	−2034.88	1 vs. 2	705.02	< .001 ***
3: + Delphi-Gruppe	15	−2033.97	2 vs. 3	1.83	.17
4: + Kategorien x Delphi-Gruppe	25	−2009.58	3 vs. 4	48.77	< .001 ***

Tabelle 5.8: An die Rating-Daten in Runde 3 angepasste *LME*-Modelle für den Expertise-Lehrkräfte-Vergleich: Gezeigt sind Anzahl der Freiheitsgrade *df*, Log-Likelihood-Funktion *L* der Parameterschätzung im Minimum sowie verglichene Modelle, Teststatistik χ^2 und *p*-Wert des Likelihood-Quotienten-Test zum Vergleich der verschiedenen Modelle in Bezug auf ihre Vorhersagekraft der beobachteten Daten.

5.3.5.1 Unterschiede zwischen Expertise und Lehrkräften

Für die Untersuchung, ob sich signifikante Unterschiede zwischen den Einschätzungen von Experten und Lehrkräften bezogen auf dieselben fachwissenschaftlichen Kategorien zeigen, wurden in der Varianzanalyse nacheinander die in Tabelle 5.8 dargestellten *LME*-Modelle an den Gesamtdatensatz aus Runde 3 angepasst. Sie modellieren aufeinander aufbauend die möglichen Quellen von Varianz in den Daten.

Als Ausgangsmodell (*Personen*) wird lediglich der aus der ANOVA mit Messwiederholung bekannte Personenfaktor angenommen, welcher die Varianz aus unterschiedlichem Rating-Verhalten zwischen Personen modelliert. Darauf aufbauend wird der ebenfalls aus vorangegangenen Analysen bekannte Prädiktor *Kategorien* hinzugenommen. Bei den Ergebnissen der Maximum-Likelihood-Schätzung der Modellparameter zeigt sich hier bereits im Vergleich mit dem Ausgangsmodell ein niedrigerer Wert der Log-Likelihood-Funktion *L*, was einem kleineren Varianzanteil entspricht, der durch das Modell nicht erklärt wird. Auch der Likelihood-Quotienten-Test von Ausgangsmodell und Kategorienmodell zeugt von einem hochsignifikant besseren Fit an die Daten durch das Kategorienmodell (siehe χ^2 und *p* in der zweiten Zeile in Tabelle 5.8). Wird hingegen lediglich der Faktor *Delphi-Gruppe* - also Expertise- oder Lehrkräftezugehörigkeit - zum Ausgangsmodell hinzugefügt, so zeigt sich keine signifikante Verbesserung (dritte Zeile in Tabelle 5.8). Erst der Interaktionseffekt *Kategorien x Delphi-Gruppe* stellt einen hochsignifikant besseren Fit dar. Das Modell mit den Prädiktoren Kategorien, Delphi-Gruppen und deren Interaktion sagt die beobachteten Rating-Ergebnisse somit am Besten voraus. Alle Ergebnisse der Parameterschätzung des besten Modells finden sich in Anhang B.6.

Kontrast	b	SE_b	df	t	p	R
HK1a: Exp vs. LuL	0.02	0.20	141	-.10	.92	
HK1b: Exp vs. LuL	0.47	0.20	141	-2.36	.02 *	0.19
HK2: Exp vs. LuL	0.29	0.20	141	1.30	.19	
HK3: Exp vs. LuL	0.03	0.20	141	0.13	.90	
HK4: Exp vs. LuL	0.40	0.20	141	2.01	.045 *	0.17
HK5: Exp vs. LuL	0.64	0.20	141	3.19	.002 **	0.25
HK6: Exp vs. LuL	0.06	0.20	141	0.32	.75	
HK7: Exp vs. LuL	0.76	0.20	141	3.81	< .001 ***	0.31
HK8: Exp vs. LuL	-0.10	0.20	141	-0.50	.62	
HK9: Exp vs. LuL	0.17	0.20	141	0.86	.39	
HK10: Exp vs. LuL	0.22	0.20	141	1.13	.30	

Tabelle 5.9: Ergebnisse der Kontrastanalyse zwischen Expertise- und Lehrkräfteeinschätzungen: Gezeigt sind Regressionsparameter b mit Standardfehlern SE_b , Anzahl der Freiheitsgrade df , Teststatistiken t sowie p -Werte und Effektstärken R der t -Tests.

Da insbesondere im Vergleich mit dem Modell *Kategorien* unter Hinzunahme des Interaktionseffekts von *Kategorien* und *Delphi-Gruppen* ein besserer Fit erreicht wird, gibt es im Umkehrschluss mindestens eine Kategorie, bei der sich die Einschätzungen der beiden Delphi-Gruppen hochsignifikant unterscheiden. Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, repräsentieren die Regressionsparameter b der LME-Modelle genau die Mittelwertunterschiede von Interesse zwischen Expertise- und Lehrkräfteeinschätzungen. Als Ergebnisse der Schätzung ergeben sich weitere Informationen in Form eines t -Tests zur Signifikanz der Unterschiede. Die b -Parameter für alle 11 Hauptkategorien sind in Tabelle 5.9 gemeinsam mit ihrem Standardfehler, den Freiheitsgraden sowie Teststatistik, p -Werten und Effektstärken des Mittelwertvergleichs dargestellt. Für einen anschaulichen Vergleich sind die Mittelwerte von Expertise- und Lehrkräfteeinschätzungen zusätzlich noch gemeinsam als gruppiertes Balkendiagramm mit eingezeichneten signifikanten Unterschieden in Abbildung 5.22 dargestellt.

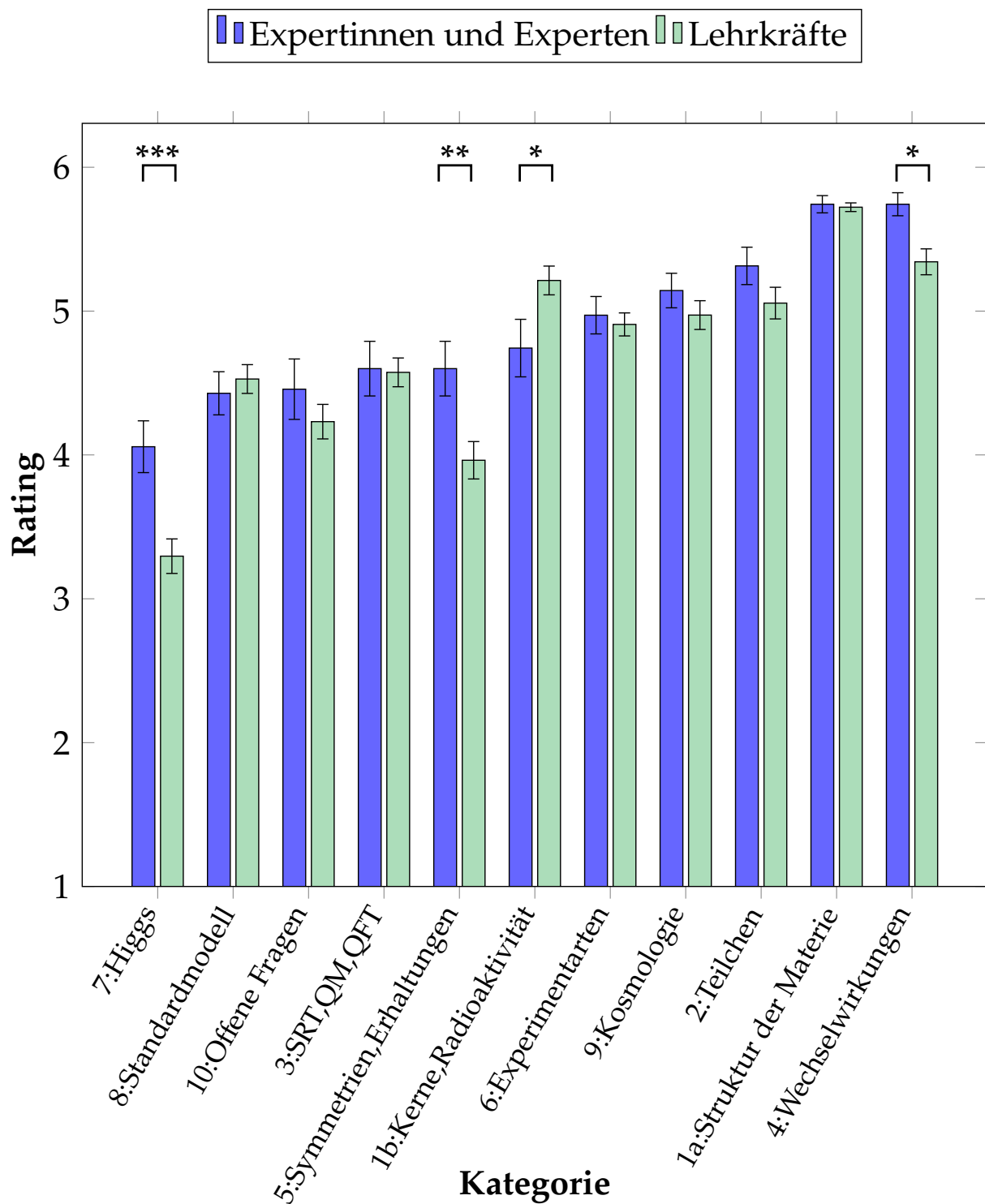


Abbildung 5.22: Mittelwerte der Kategorieneinschätzungen (mit Standardfehlern) von Expertinnen und Experten sowie von Lehrkräften in Runde 3 als gruppiertes Balkendiagramm. Signifikante Unterschiede aus der Varianzanalyse sind mit * gekennzeichnet.

Interpretation der Unterschiede von Expertisegremium und Lehrkräften

Tabelle 5.9 und Abbildung 5.22 illustrieren, dass sich in den drei Hauptkategorien HK 7 (Higgs), HK 5 (Symmetrien, Erhaltungen) und HK 1b (Kerne, Radioaktivität) signifikante Unterschiede in den Einschätzungen von Expertinnen und Experten einerseits sowie Lehrkräften andererseits zeigen.

HK 7 wird vom Expertisegremium höher bewertet als von den Lehrkräften. Vorangestellt, dass die folgenden Interpretationen wiederum von spekulativem Charakter sind, könnte ein Grund für den Unterschied unter anderem in der relativ jungen Entdeckung des Higgs-Bosons 2012 liegen. Dessen Bedeutung zur Vervollständigung des für die Teilchenphysik zentralen Standardmodells wird vermutlich von den Fachleuten, die häufig bei der Entdeckung selbst dabei waren, höher eingeschätzt. Bei den Lehrkräften könnte dagegen wiederum der hohe Grad an Formalismus und Abstraktheit des Higgs-Mechanismus in die Argumentation mit eingeflossen sein, der aus ihrer Sicht nicht relevant für ihr Fachwissen ist.

HK 5 wird von den Expertinnen und Experten ebenfalls höher bewertet als von den Lehrkräften. Hier könnten die Unterschiede ähnlich wie bei HK 7 interpretiert werden. Symmetrien spielen aus fachwissenschaftlicher Sicht eine wichtige Rolle zur Beschreibung der fundamentalen Wechselwirkungen, erfordern zu ebendieser Beschreibung jedoch komplexe Kenntnisse aus der im Schulunterricht in der Regel nicht thematisierten Gruppentheorie.

HK 1b wird dagegen von den Lehrkräften als relevanter eingeschätzt. Dieses Ergebnis wurde in gewisser Weise erwartet, da die Lehrkräfte - wie bereits mehrfach argumentiert - vermutlich aus einer Curriculumssicht heraus bewerten.

Natürlich kann eine abschließende Gewissheit über die Gründe der Teilnehmenden für ihre Einschätzungen nur durch Folgestudien erzielt werden. Als Fazit für die vorliegende Arbeit sind die interpretierten Unterschiede zwischen Expertisegremium und Lehrkräften in der resultierenden Konstellation jedoch nicht von Bedeutung, da zum einen die Hauptkategorien 7 und 5 außerhalb der TOP-6-Themen liegen, welche gemeinschaftlich von beiden Gremien als besonders relevant für das Lehrkräftefachwissen eingeschätzt wurden. Zum anderen ist Hauptkategorie 1b bei beiden Gremien unter den TOP-6 vorhanden und sie erhält nur durch die Lehrkräfte eine noch höhere Bedeutung aus Praxissicht als aus Expertisesicht.

Modellprädiktoren	<i>df</i>	<i>L</i>	<i>Test</i>	χ^2	<i>p</i>
1: Personen	4	−552.50			
2: + Kategorien	14	−484.92	1 vs. 2	135.17	< .001 ***
3: + Beruf	15	−484.92	2 vs. 3	0.00	.98
4: + Kategorien x Beruf	25	−473.81	3 vs. 4	22.22	.014 *

Tabelle 5.10: An die Expertise-Ratings in Runde 3 angepasste *LME*-Modelle für den Berufsgruppenvergleich: Gezeigt sind Anzahl der Freiheitsgrade *df*, Log-Likelihood-Funktion *L* der Parameterschätzung im Minimum sowie verglichene Modelle, Teststatistik χ^2 und *p*-Wert des Likelihood-Quotienten-Test zum Vergleich der verschiedenen Modelle in Bezug auf ihre Vorhersagekraft der beobachteten Daten.

5.3.5.2 Berufsgruppenunterschiede im Expertisegremium

Im Kontext der Auswahl von Expertinnen und Experten für die Zusammensetzung des Delphi-Gremiums wurde in Kapitel 4.1.3 die Entscheidung getroffen, eine ungleich höhere Anzahl an Personen aus der Fachwissenschaft im Vergleich zu den Bereichen Fachdidaktik und Outreach zuzulassen. Als Ausgleich sollte den Meinungen der Teilnehmenden aus den letzten beiden Berufsgruppen ein höheres Gewicht beigemessen werden. Für die Anwendung des Ausgleichs müssten sich jedoch zunächst einmal Unterschiede in den entsprechenden Meinungen zeigen.

Um aufzudecken, ob und bei welchen Kategorien es signifikante Unterschiede in den Einschätzungen zwischen der Berufsgruppe Fachwissenschaft und der kombinierten Gruppe aus Fachdidaktik und Outreach gibt, wurde eine weitere zweifaktorielle *Mixed-ANOVA* durchgeführt. In Anlehnung an das im vorangegangenen Abschnitt erläuterte Vorgehen wurden hier zum Ausgangsmodell *Personen* sukzessiv *LME*-Modelle mit den Prädiktoren Kategorie, Beruf(sgruppe) und der Interaktion aus Kategorie und Beruf hinzugefügt und an die Ratingergebnisse des Expertisedatensatzes in Runde 3 angepasst. Tabelle 5.10 zeigt, dass wiederum das komplexeste Modell mit dem Interaktionseffekt aus Kategorie und Beruf die Daten am Besten beschreibt. Die vollständigen Ergebnisse der Parameterschätzung des besten Modells finden sich in Anhang B.6.

Es lässt sich durch den signifikant besseren Fit des Interaktionsmodells im Vergleich zum Kategorien-Modell schlussfolgern, dass in mindestens einer Kategorie Unterschiede in den Einschätzungen zwischen den Berufsgruppen bestehen.

Die in Tabelle 5.11 dargestellte Kontrastanalyse zeigt, dass ein Unterschied in Hauptkategorie 2 (Teilchen) besteht, welche von den Fachforschenden höher ein-

Kontrast	b	SE_b	df	t	p	R
HK1a: FW vs. FDOutreach	-0.20	0.45	33	1.79	.07	
HK1b: FW vs. FDOutreach	-0.77	0.45	33	-1.72	.09	
HK2: FW vs. FDOutreach	0.95	0.45	33	2.13	.04 *	0.35
HK3: FW vs. FDOutreach	0.27	0.45	33	0.61	.54	
HK4: FW vs. FDOutreach	-0.14	0.45	33	-0.32	.75	
HK5: FW vs. FDOutreach	0.63	0.45	33	1.42	.17	
HK6: FW vs. FDOutreach	-0.03	0.45	33	-0.07	.94	
HK7: FW vs. FDOutreach	-0.40	0.45	33	-0.90	.38	
HK8: FW vs. FDOutreach	-0.23	0.45	33	-0.51	.61	
HK9: FW vs. FDOutreach	0.45	0.45	33	1.00	.32	
HK10: FW vs. FDOutreach	-0.87	0.45	33	1.95	.06	

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Kontrastanalyse zwischen den Berufsgruppen „Fachwissenschaft“ und „Fachdidaktik und Outreach“ im Expertisegremium: Gezeigt sind Regressionsparameter b mit Standardfehlern SE_b , Anzahl der Freiheitsgrade df , Teststatistiken t sowie p -Werte und Effektstärken R der t -Tests.

geschätzt wird als von den anderen beiden Gruppen. Um den Vergleich zu veranschaulichen, sind Mittelwertunterschiede und die Ergebnisse der Varianzanalyse noch einmal in Abbildung 5.23 dargestellt.

Interpretation der Berufsgruppenunterschiede im Expertisegremium

Expertinnen und Experten, die sich sehr nah an der Teilchenphysikforschung befinden, schätzen das Thema Teilchen selbst offensichtlich als signifikant relevanter für das Fachwissen von Lehrkräften ein als die anderen Berufsgruppen.

In Anbetracht vorangegangener Interpretationen ist das Ergebnis unerwartet, da die Kategorie Teilchen mit ihrem Überblick über bekannte Elementar- und zusammengesetzte Teilchen im Vergleich zu anderen Kategorien eine höhere Anschaulichkeit besitzt und somit von den schulnahen Berufsgruppen hätte höher bewertet werden sollen.

Eine mögliche Begründung für das unerwartete Rating-Verhalten könnte darin liegen, dass die beiden schulnahen Gruppen keinen Mehrwert darin sehen, wenn Lehrkräfte einen Überblick über das große Ausmaß an Teilchen in der Hochenergiephysik sowie ihrer jeweiligen Entdeckungen und Eigenschaften besitzen. Im Sinne elementarer Grundideen könnten sie es hier sinnstiftender empfinden, wenn Lehr-

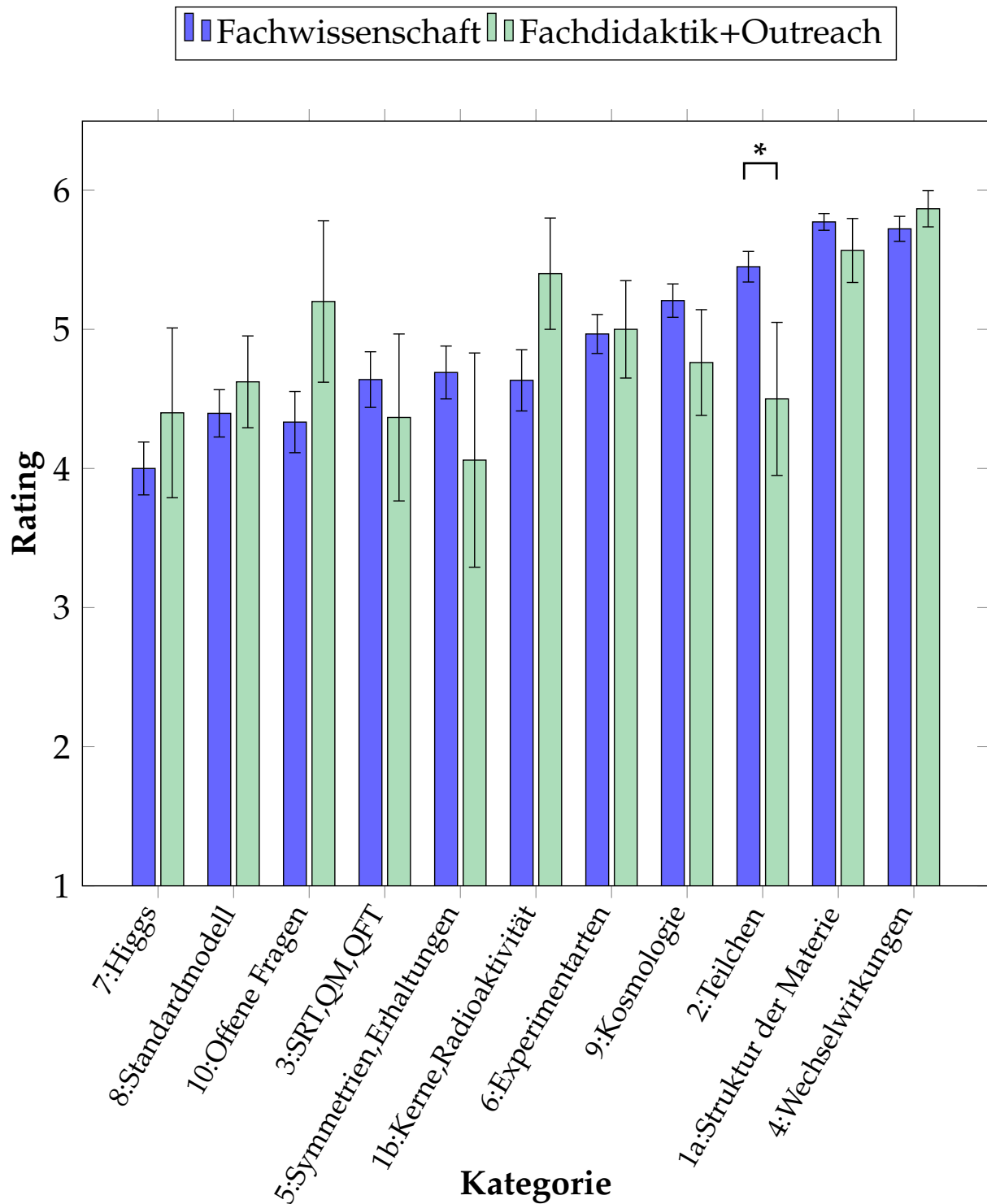


Abbildung 5.23: Mittelwerte der Kategorieneinschätzungen (mit Standardfehlern) von Expertinnen und Experten aus den Berufsgruppen „Fachwissenschaft“ und „Fachdidaktik und Outreach“. Signifikante Unterschiede aus der Varianzanalyse sind mit * gekennzeichnet.

kräfte Wissen über die Wechselwirkungen besitzen und damit exemplarisch die Existenz und Eigenschaften der bekanntesten Teilchen verknüpfen. Zur Aufklärung der Beweggründe könnten hier Interviews mit den Berufsgruppen geführt werden.

Auf Basis der angestrebten Bevorzugung der Meinung von schulnahen Berufsgruppen müsste der Unterschied in Hauptkategorie 2 als Fazit für die vorliegende Arbeit in der Modellierung des Fachwissens berücksichtigt werden. Wie Abbildung 5.23 veranschaulicht, stellt HK 2 insbesondere im Vergleich aller Kategorien ein von den schulnahen Gruppen eher niedrig bewertetes Thema dar. Dementsprechend sollte das Thema Teilchen aus den zuvor als besonders relevant etablierten TOP-6-Themen ausgeschlossen werden.

Auf der anderen Seite wurde die Relevanz des Themas zuvor jedoch von den Lehrkräften selbst aus Praxissicht validiert (siehe Abschnitt 5.3.5.1). Da demnach sowohl Lehrkräfte als auch die schulferneren Expertinnen und Experten dem Thema hohe Bedeutung beimessen, wird das Thema Teilchen trotz der niedrigeren Bewertung der anderen beiden Expertisegruppen in der Modellierung des Fachwissens beibehalten.

5.3.5.3 Landesbedingte Unterschiede im Expertisegremium

Analog zu der Zusammensetzung aus unterschiedlichen Berufsgruppen wurde in Kapitel 4.1.3 ebenfalls die Frage aufgeworfen, wie die Länderverteilung im Delphi-Gremium idealerweise aussehen sollte. Insbesondere wurde die These in den Raum gestellt, dass internationale Expertinnen und Experten eventuell nicht die benötigte Expertise zur Beantwortung der Delphi-Fragestellung nach dem Fachwissen von Lehrkräften in Deutschland besitzen. Eine Diskussion der landesbedingten Zusammensetzung erscheint jedoch erst dann angemessen, wenn sich tatsächlich Unterschiede in den Einschätzungen von deutschen und ausländischen Expertinnen und Experten zeigen.

Zur Überprüfung wurde eine weitere zweifaktorielle *Mixed-ANOVA* auf den Expertisedatensatz in Runde 3 durchgeführt mit den in Tabelle 5.12 dargestellten *LME*-Modellen. Es zeigt sich, dass im Unterschied zu vorangegangenen Varianzanalysen hier nicht das komplexeste Interaktionsmodell die Daten am besten beschreibt, sondern das Modell, welches lediglich die Kategorien als Prädiktor annimmt. Für die Ergebnisse der Parameterschätzung und der Kontrastanalyse des besagten besten Modells sei auf die Varianzanalyse mit Messwiederholung in Abschnitt 5.3.4.1 verwiesen. Da das Interaktionsmodell keinen signifikant besseren Fit an die Daten liefert

Modellprädiktoren	<i>df</i>	<i>L</i>	<i>Test</i>	χ^2	<i>p</i>
1: Personen	4	−552.50			
2: + Kategorien	14	−484.92	1 vs. 2	135.17	< .001 ***
3: + Land	15	−484.89	2 vs. 3	0.07	.80
4: + Kategorien x Land	25	−481.13	3 vs. 4	7.52	.68

Tabelle 5.12: An die Expertise-Ratings in Runde 3 angepasste *LME*-Modelle für den Ländervergleich: Gezeigt sind Anzahl der Freiheitsgrade *df*, Log-Likelihood-Funktion *L* der Parameterschätzung im Minimum sowie verglichene Modelle, Teststatistik χ^2 und *p*-Wert des Likelihood-Quotienten-Test zum Vergleich der verschiedenen Modelle in Bezug auf ihre Vorhersagekraft der beobachteten Daten.

als das Kategorienmodell, gibt es keine signifikanten Unterschiede der Einschätzungen einzelner Kategorien zwischen deutschen und internationalen Expertinnen und Experten.

Interpretation der Länderanalyse im Expertisegremium

Es zeigen sich keine landesbedingten Unterschiede in den Einschätzungen durch die Expertinnen und Experten. Für das Ergebnis spricht die Vermutung, dass sich das Fachwissen in der Teilchenphysik rund um Schlüsselkonzepte rankt, welche auf Erkenntnissen der Teilchenphysikforschung beruhen, die wiederum durch eine internationale, stark vernetzte Forschungsgemeinschaft erarbeitet wurden.

5.3.5.4 Landesbedingte Unterschiede im Lehrkräftegremium

Als letzter interessanter Personenvergleich soll im Kontext der gleichen Begründung wie bei den Expertinnen und Experten untersucht werden, ob sich Unterschiede in den Einschätzungen deutscher und ausländischer Lehrkräfte zeigen. Die Ergebnisse der durchgeführten Varianzanalyse sind in Tabelle 5.13 zusammengefasst. Für den Prädiktor Land wurde hier eine Unterscheidung in die beiden Gruppen der deutschen und internationalen Lehrkräfte vorgenommen. Das komplexeste *LME*-Modell mit dem Prädiktor der Interaktion aus Kategorien und Landeszugehörigkeit zeigt sich als bester Fit an die Rating-Daten der Lehrkräfte. Die Ergebnisse der Parameterschätzung des besten Modells finden sich wiederum in Anhang B.6.

Durch die Kontrastanalyse (Tabelle 5.14) wird deutlich, dass landesbedingte Unterschiede in den Hauptkategorien 7 (Higgs) und 10 (Offene Fragen) existieren. Eine anschauliche Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Abbildung 5.24 gegeben.

Modellprädiktoren	<i>df</i>	<i>L</i>	<i>Test</i>	χ^2	<i>p</i>
1: Personen	4	−1829.28			
2: + Kategorien	14	−1521.50	1 vs. 2	615.56	< .001 ***
3: + Land	15	−1520.73	2 vs. 3	1.54	.22
4: + Kategorien x Land	25	−1503.31	3 vs. 4	34.83	< .001 ***

Tabelle 5.13: An die Lehrkräfte-Ratings in Runde 3 angepasste LME-Modelle für den Ländervergleich: Gezeigt sind Anzahl der Freiheitsgrade *df*, Log-Likelihood-Funktion *L* der Parameterschätzung im Minimum sowie verglichene Modell, Teststatistik χ^2 und *p*-Wert des Likelihood-Quotienten-Test zum Vergleich der verschiedenen Modelle in Bezug auf ihre Vorhersagekraft der beobachteten Daten.

Kontrast	<i>b</i>	<i>SE_b</i>	<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>R</i>
HK1a: Deutsch vs. International	0.10	0.20	106	0.51	.61	
HK1b: Deutsch vs. International	0.30	0.20	106	1.48	.14	
HK2: Deutsch vs. International	−0.40	0.20	106	1.97	.05	
HK3: Deutsch vs. International	0.12	0.20	106	0.58	.56	
HK4: Deutsch vs. International	0.04	0.20	106	0.18	.86	
HK5: Deutsch vs. International	−0.15	0.20	106	−0.72	.47	
HK6: Deutsch vs. International	−0.08	0.20	106	−0.41	.68	
HK7: Deutsch vs. International	−0.63	0.20	106	−3.09	.003 **	0.28
HK8: Deutsch vs. International	−0.34	0.20	106	−1.71	.09	
HK9: Deutsch vs. International	−0.14	0.20	106	−0.69	.49	
HK10: Deutsch vs. International	−0.55	0.20	106	−2.69	.008 **	0.25

Tabelle 5.14: Ergebnisse der Kontrastanalyse zwischen deutschen und internationalen Lehrkräfteeinschätzungen: Gezeigt sind Regressionsparameter *b* mit Standardfehlern *SE_b*, Anzahl der Freiheitsgrade *df*, Teststatistiken *t* sowie *p*-Werte und Effektstärken *R* der *t*-Tests.

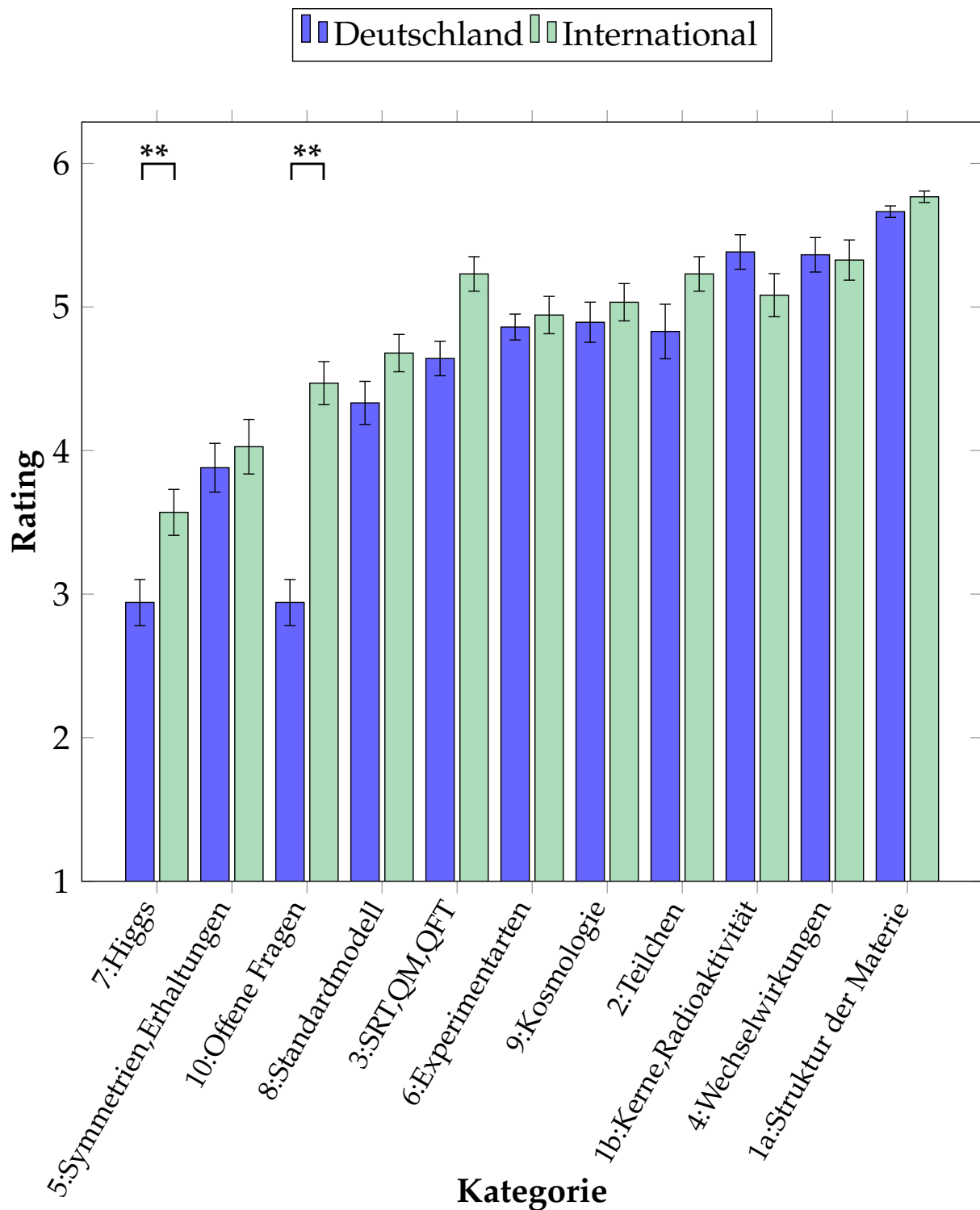


Abbildung 5.24: Mittelwerte der Kategorieneinschätzungen (mit Standardfehlern) von deutschen und internationalen Lehrkräften. Signifikante Unterschiede aus der Varianzanalyse sind mit * gekennzeichnet.

Interpretation der landesbedingten Lehrkräfteunterschiede

Lehrkräfte aus dem internationalen Ausland schätzen die beiden Hauptkategorien 7 (Higgs) und 10 (Offene Fragen) als relevanter für das Lehrkräftefachwissen ein als deutsche Lehrkräfte. Zur Erklärung der Unterschiede kann vermutet werden, dass sich in den Ländern ein unterschiedlich großes mediales Interesse beispielsweise an der Higgs-Entdeckung oder auch an offenen Fragen wie der Dunklen Materie findet. Ein verstärktes mediales Interesse führt dann eventuell - im Kontext aktuelle Forschungsthemen in den Unterricht zu bringen - zu einer stärkeren schulischen Beschäftigung mit den Themen. Daran anknüpfend könnte auf struktureller Ebene auch ein Grund für die Unterschiede in den unterschiedlichen Lehrplänen liegen. Welche Rolle und welchen Raum nehmen aktuelle Themen im Schulunterricht in verschiedenen Ländern ein und sind Themen wie das Higgs-Boson und Dunkle Materie eventuell schon etabliert in den Lehrplänen? Zur Aufklärung der Beweggründe der Lehrkräfte könnten demnach neben Folgebefragungen auch umfangreiche Lehrplananalysen der Länder in weiteren Studien durchgeführt werden.

Als Fazit für die vorliegende Arbeit ergeben sich aus den Unterschieden in den Lehrkräfteeinschätzungen zwei interessante Feststellungen: Zum einen sprechen die Ergebnisse für die in Kapitel 4.1.3 aufgeworfene Hypothese, dass Lehrkräftebildung im Vergleich zur (teilchenphysikalischen) Forschung ein eher national geprägter Bereich ist. Zum anderen wirken sich die landesbedingten Unterschiede in den Themen Higgs-Boson und Offene Fragen jedoch nicht auf die Modellierung des Fachwissens aus, da beide Themen - wie in Abbildung 5.24 veranschaulicht - sowohl von internationalen als auch von den deutschen Lehrkräften als weniger relevant eingeschätzt wurden und sich insbesondere bei beiden Gruppen nicht unter den etablierten TOP-6-Themen befinden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die durchgeführte Validierung der fachwissensrelevanten Themen aus Praxissicht auch aus einer internationalen Perspektive heraus Bestand hat.

5.3.6 Finale Modellierungsergebnisse der Dimension

Inhaltsbereich

Die angestrebte Modellierung des für Lehrkräfte relevanten Fachwissens in der Teilchenphysik wird in der vorliegenden Arbeit durch die Konstruktion eines Strukturmodells mit den beiden Fachwissensdimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* realisiert. Wie in Abbildung 5.25 skizziert findet die Modellierung für beide Dimensionen jeweils durch Etablierung und präzise Beschreibung von Subfacetten statt.

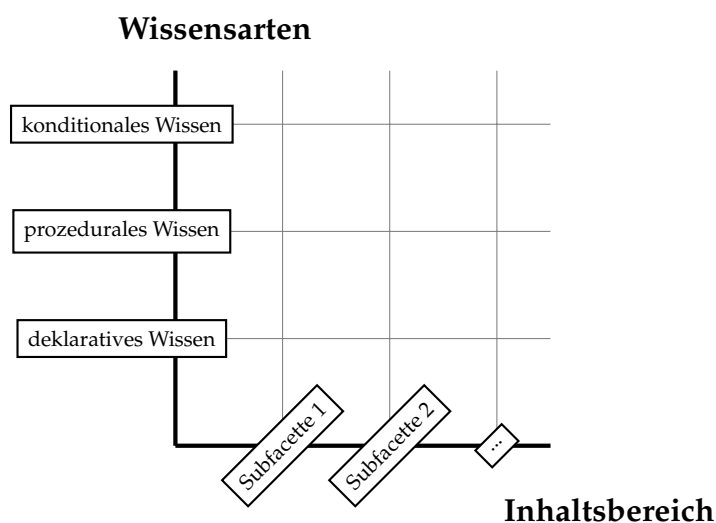


Abbildung 5.25: Schematische Darstellung des Fachwissens einer Lehrkraft als Produkt der Dimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten*

Für den Hauptschwerpunkt der Arbeit - die Modellierung der Dimension *Inhaltsbereich* - wurden mithilfe von drei Befragungen eines Expertisegremiums im Rahmen einer Delphi-Studie zunächst 11 teilchenphysikalische Themen als für das Fachwissen relevante Subfacetten identifiziert. Eine Vorstellung der Themen fand in Kapitel 5.3.3 statt, eine Inhaltsbeschreibung jedes Themas findet sich in Anhang A.2.

Sechs der genannten 11 Themen wurden vom Expertisegremium als besonders relevant für das Fachwissen von Lehrkräften eingeschätzt: (1) Materieaufbau, (2) Kerne und Radioaktivität auf Teilchenebene, (3) Teilchen in der Hochenergiephysik, (4) Fundamentale Wechselwirkungen, (5) Arten von Experimenten in der Hochenergiephysik sowie (6) Teilchenphysik in der Kosmologie.

Die genannten TOP-6-Themen wurden unter Berücksichtigung aller Berufsgruppen, die Expertise in Bezug auf die Modellierung des gefragten Fachwissens besitzen, etabliert. Dabei handelt es sich um Mitarbeitende in der Teilchenphysikforschung, in der Physikdidaktik sowie in der teilchenphysikbezogenen Öffentlichkeitsarbeit. Insbesondere wurden die TOP-6-Themen auch aus Praxissicht durch Befragung von Lehrkräften selbst validiert. Die Ergebnisse haben des Weiteren sowohl bei Expertinnen und Experten als auch bei Lehrkräften aus internationaler Sicht Bestand.

Zur ersten Vervollständigung des aufgestellten Strukturmodells sind die TOP-6-Themen in Abbildung 5.26 in Erweiterung der entsprechenden Modellachse dargestellt.

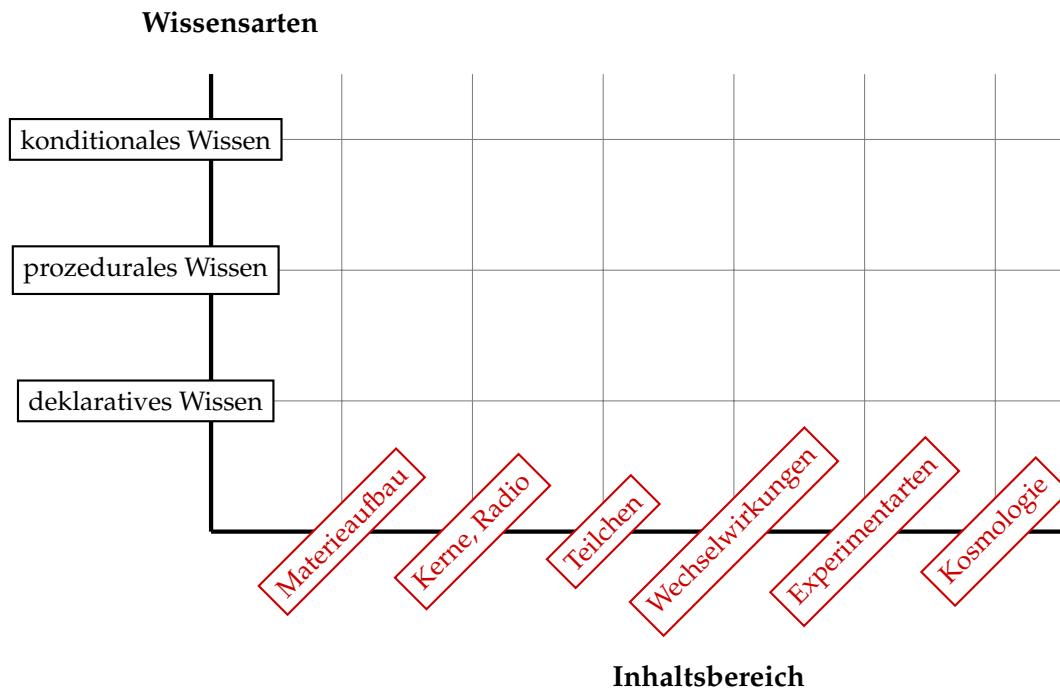


Abbildung 5.26: Fachwissen von Lehrkräften in der Teilchenphysik - Erweiterung der Dimension *Inhaltsbereich*.

5.3.6.1 Empfehlung für Lehrkräfteprogramme und Standards

Wie in der Einleitung der vorliegenden Arbeit erläutert, liegt die Motivation für das Projekt vor allem in der Tatsache begründet, dass Teilchenphysik als Forschungsgebiet der modernen Physik zwar einerseits Einzug in den deutschen Schulunterricht halten soll, es andererseits bisher jedoch nur wenige Ausbildungs- und Fortbildungsprogramme für Lehrkräfte gibt und des Weiteren bislang auch kaum detaillierte Bildungsstandards bzw. Lehrpläne für das Thema ausgearbeitet wurden, an welchen sich solch ein Schulunterricht orientieren könnte.

Aus den vorgestellten Ergebnissen zur Modellierung der Fachwissensdimension *Inhaltsbereich* lassen sich für die Gestaltung zukünftiger Programme zur Lehrkräfteaus- bzw. -fortbildung folgende Empfehlungen aussprechen: Es empfiehlt sich bei der Konzipierung der Programme eine strukturelle Aufteilung in 11 Module, welche sich thematisch mit den 11 etablierten fachwissenschaftlichen Hauptkategorien der vorliegenden Arbeit beschäftigen. Den Umfang der Module betreffend sollte ein Fokus auf den TOP-6-Themen liegen, wie sie in Abbildung 5.26 dargestellt sind. Inhaltlich empfiehlt sich, dass die Module jeweils die in Runde 2 erarbeiteten fachwissenschaftlichen Unterkategorien abdecken (siehe Abschnitt 5.2.3 für eine Übersicht).

Ausführliche Informationen zu den entsprechenden Unterkategorien lassen sich in Anhang A.2 der vorliegenden Arbeit nachlesen.

Die Modellierungsergebnisse zum Inhaltsbereich können auch verwendet werden, um die einleitend vorgestellten, unzureichend beschriebenen, fachlichen Inhalte zum Thema Teilchenphysik in den Lehrplänen der Bundesländer, welche sich an den Bildungsstandards (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2004) orientieren, auszuschärfen. Konkret könnten die auf Seite 5 der Standards aufgeführten Merkmale der Struktur der Materie wie „... Atome, Kerne, Quarks, ausgewählte Elementarteilchen“ mit detaillierten Definitionen und Angaben zu Umfang und Unterthemen beschrieben werden, welche sich aus dem hier erarbeiteten System fachwissenschaftlicher Haupt- und Unterkategorien ableiten lassen. Außerdem sollte diskutiert werden, ob der Fachinhalt zur Teilchenphysik über die Struktur der Materie hinaus - welche im hier vorgestellten Modell nur eines von 11 Themen ausmacht - um weitere teilchenphysikalische Themen wie beispielsweise um fundamentale Wechselwirkungen erweitert werden sollte. Ausschlaggebend für das Urteil der entscheidenden Gremien zur Aufnahme neuer Themen könnten insbesondere die hier etablierten Unterschiede in den Einschätzungen verschiedener Berufsgruppen sowie deren mögliche Beweggründe sein.

5.4 Modellierung von *Wissensarten* für inhaltliche Subfacetten

Die Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften findet in der vorliegenden Arbeit durch die Strukturierung des zweidimensionalen Raums zwischen den Fachwissensdimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* statt (siehe Abbildung 5.27 und Kapitel 3). Die Strukturierung wird durch die Identifikation bzw. Abgrenzung und möglichst genaue Beschreibung der einzelnen Subfacetten der beiden Dimensionen durchgeführt. Nachdem im vorangegangenen Hauptauswertungsteil der vorliegenden Arbeit die Ergebnisse der Modellierung von Subfacetten in der Fachwissensdimension *Inhaltsbereich* aus der Delphi-Studie vorgestellt wurden, befasst sich das folgende Kapitel mit dem Nebenfokus der Arbeit: Mit der Modellierung der Fachwissensdimension *Wissensarten*.

Wie in Kapitel 1.3.2 erläutert, liegt das Fachwissen von Lehrkräften in drei verschiedenen Formen bzw. Arten vor. Während das **deklarative Wissen** in aussagenlogischer Form Wissen über *Sachverhalte und Inhalte* umfasst, bezieht sich **prozedurales**

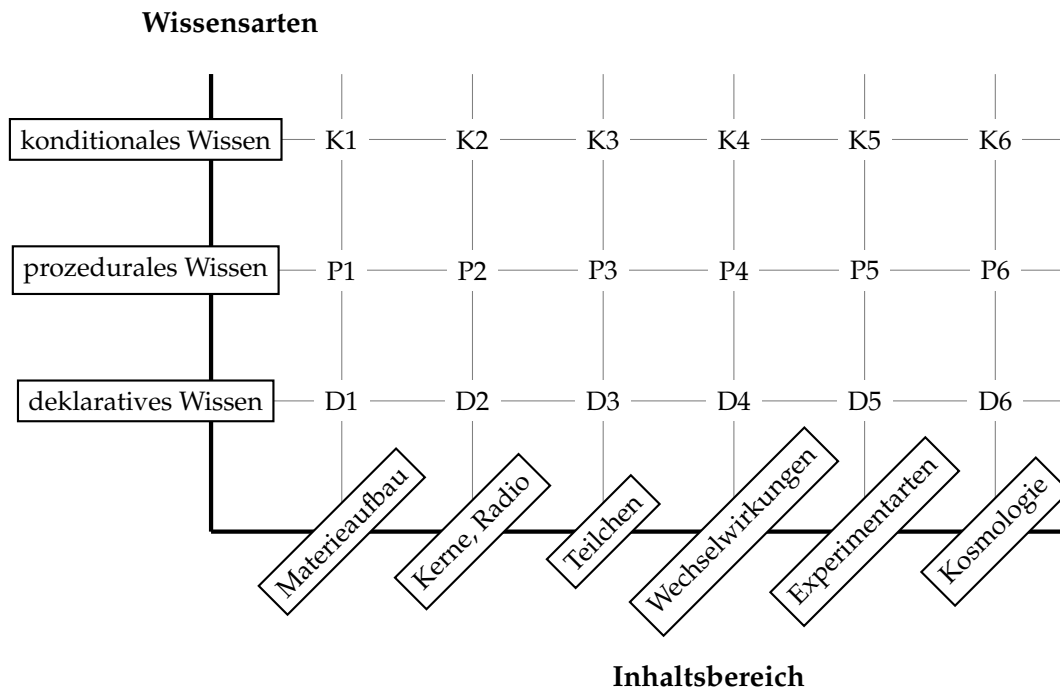


Abbildung 5.27: Darstellung des Fachwissens einer Lehrkraft in der Teilchenphysik als Gitterpunkte im zweidimensionalen Inhaltsbereiche-Wissensarten-Raum

Wissen auf das Wissen über „fachliche“ Handlungen. **Konditionales Wissen** beinhaltet *Begründungen und Beurteilungen*, wann und warum die Handlungen angemessen sind. Durch die drei Wissensarten ist bereits eine Vorstrukturierung der Dimension *Wissensarten* gegeben, welche nun für die Domäne Teilchenphysik zu spezifizieren ist. Es soll demnach folgende Forschungsfrage aus Kapitel 3 beantwortet werden:

Forschungsfrage 2 (F2): Wie sehen deklaratives, prozedurales und konditionales Wissen in Bezug auf die inhaltlichen Subfacetten des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik aus?

Im Gegensatz zur Modellierung des Inhaltsbereichs entfällt hier durch die Vorstrukturierung in drei Wissensarten die Identifikation von Subfacetten als erster Modellierungsschritt und es wird direkt die Beschreibung der drei Wissensarten durchgeführt. Die Dimension *Inhaltsbereich* dient hierbei als Bezugsrahmen.

Da bereits sechs teilchenphysikalische Themen als besonders relevant für das Fachwissen von Lehrkräften identifiziert wurden, kann die Beschreibung der drei Wissensarten jeweils konkret auf jedes der sechs Themen bezogen werden. Es muss

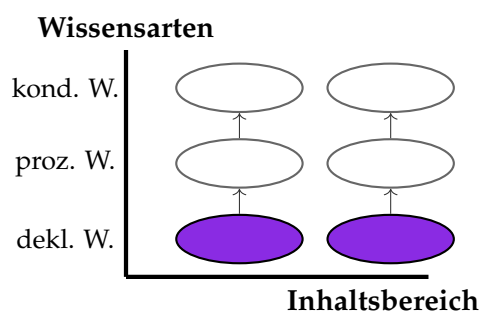


Abbildung 5.28: Ausschnitt aus dem Forschungsdesign für das Vorgehen zur Modellierung von Wissensarten im Fachwissen von Lehrkräften

demnach für jeden der in Abbildung 5.27 dargestellten Gitterpunkte eine Beschreibung für das Fachwissen einer bestimmten Wissensart zu einem bestimmten inhaltlichen Thema erarbeitet werden. Wie ebenfalls in der Abbildung 5.27 dargestellt, werden die deklarativen Wissensanteile dabei in der angezeigten Reihenfolge geordnet vom Thema „Materieaufbau“ bis „Kosmologie“ mit **D1** bis **D6**, die prozeduralen mit **P1** bis **P6** und die konditionalen mit **K1** bis **K6** bezeichnet.

Die Beschreibung für die insgesamt 18 verschiedenen Fachwissensanteile erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten theoriegeleitet. Die auf naturwissenschaftliches bzw. physikalisches Fachwissen angepassten Definitionen der Wissensarten aus Kapitel 1.3.2 werden hierzu auf die modellierten inhaltlichen Subfacetten aus der Delphi-Studie angewendet.

Als Ausgangspunkt dienen die Kurzbeschreibungen der sechs relevantesten fachwissenschaftlichen Haupt- und dazugehörenden Unterkategorien, welche in Anhang A.2 nachzulesen sind. Da mit dem Fokus der Delphi-Studie auf der Benennung von teilchenphysikalischen Schlüsselkonzepten bereits die für das Lehrkräftefachwissen relevanten Inhalte und Sachverhalte für jedes Thema zusammengestellt wurden, können die Beschreibungen der sechs Inhaltsbereiche - mit kleineren Umordnungen und Umformulierungen - bereits als deklarative Fachwissensanteile aufgefasst werden (siehe nachfolgend Abschnitt 5.4.1).

Wie in Abbildung 5.28 dargestellt, kann ein Vorschlag für das Aussehen der prozeduralen und konditionalen Wissensanteile zu den sechs Themen (weiß unterlegte Ellipsen) durch eine Überarbeitung der deklarativen Beschreibungen (violett unterlegte Ellipsen) erreicht werden. Für das prozedurale Wissen wird hierbei zunächst nach deklarativem Wissen gesucht, das eng mit Elementen des Handelns im Rahmen von Methoden der Erkenntnisgewinnung verbunden ist (siehe nachfolgend Abschnitt 5.4.2). Für das konditionale Wissen wird reflektiert, welches Wissen über Begrün-

dungen und Beurteilungen die Handlungen im prozeduralen Wissen benötigen, um angemessen durchgeführt werden zu können (siehe nachfolgend Abschnitt 5.4.3). Eine Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse aus der derart durchgeführten Modellierung von Wissensarten wird in Abschnitt 5.4.4 gemeinsam mit daraus resultierenden weiteren Empfehlungen für Lehrkräfteprogramme und Bildungsstandards gegeben.

5.4.1 Deklaratives teilchenphysikalisches Fachwissen

Deklaratives Wissen - wie es im Projekt *ProwiN* definiert wurde - umfasst aussagenlogisches Wissen in Form von Sachverhalten und Inhalten zu einem Thema (Kirschner, 2013; Tepner et al., 2012).

Detaillierter identifiziert Gruber (2008), auf dessen Arbeiten sich *ProwiN* unter anderem beruft, in Anlehnung an de Jong und Ferguson-Hessler (1996) Fakten, Prinzipien und Begriffe als Facetten bzw. Kategorien von deklarativem Wissen. Angepasst auf die besondere Struktur und Eigenschaften von physikalischem Fachwissen, wird die Definition von Gruber in Rahmen der vorliegenden Arbeit auf folgende Weise erweitert: Deklaratives Wissen in der Teilchenphysik umfasst aussagenlogisches (wiedergebbares) Wissen in Form von

1. Fakten und Sachverhalten
2. Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten
3. Begriffen

Der Terminus „Fakt“ ist in den Naturwissenschaften und speziell in der Physik eher nicht gebräuchlich. Seine Definition als unumstößliche Tatsache widerspricht dem naturwissenschaftlichen Grundgedanken, dass alle Aussagen oder experimentellen Ergebnisse potenziell falsifiziert werden können. Speziell in der Teilchenphysik können sich Forschende aufgrund der winzigen Strukturen meist zudem ohnehin nur ein Bild bzw. ein Modell von der Realität machen und keine Fakten definieren. Daher wird die erste von Gruber definierte Kategorie von deklarativem Wissen hier um den weniger strengen Terminus „Sachverhalt“ ergänzt. Sachverhalte werden hier als beschreibbare, aber nicht unbedingt unwiderlegbare Umstände aufgefasst.

Der Terminus „Prinzip“ als Grundsatz, wie etwas aufgebaut ist, funktioniert oder abläuft, beschreibt andererseits nicht alle Zusammenhänge, die in der Physik auftreten. Die zweite Kategorie von deklarativem Wissen wird daher um den Begriff

„Gesetzmäßigkeiten“ erweitert, welche in wohl definierter Form die Zusammenhänge zwischen (physikalischen) Variablen modellieren.

Zur Beschreibung der deklarativen Wissensanteile **D1** bis **D6** der sechs relevanten inhaltlichen Subfacetten wurden die aus der Delphi-Studie erarbeiteten Kurzbeschreibungen der Kategorien und Unterkategorien in Anhang A.2 eingeordnet in die drei soeben beschriebenen Kategorien von deklarativem Wissen. In Anlehnung an die von Kirschner (2013) verwendeten Frageoperatoren „Nennen Sie ...“ und „Beschreiben Sie ...“ bei der Konstruktion von Testitems zum deklarativen Wissen, wurden die eingeordneten teilchenphysikalischen Beschreibungen zusätzlich alle in die Form „Benennung von ...“ (bei Auflistungen) bzw. in die Form „Beschreibung von ...“ (bei sonstigen Sachverhalten) gebracht. Das Ergebnis der derart konstruierten Wissensanteile für die Themen „Materieaufbau“ (D1), „Kern und Radioaktivität“ (D2), „Teilchen“ (D3), „Wechselwirkungen“ (D4), „Experimentarten“ (D5) und „Kosmologie“ (D6) ist in den Tabellen 5.15 und 5.16 ausführlich dargestellt. Zur Nachverfolgung sind in den Tabellen kursiv die Fundorte in den ursprünglichen Kategorienbeschreibungen sowie darüber hinausgehend in Theoriekapitel 2 der vorliegenden Arbeit benannt, auf denen die aufgelisteten deklarativen Wissensanteile basieren.

5.4.2 Prozedurales teilchenphysikalisches Fachwissen

Das Projekt *ProwiN* (Kirschner, 2013; Tepner et al., 2012) definiert prozedurales Wissen als das Wissen über Handlungen und Prozesse. Hierbei ist zu betonen, dass es sich bei prozeduralem Wissen um Metawissen *über* die Ausführung von Handlungen und Prozesse und nicht um die eingeübte - beispielsweise motorische oder rechnerische - Ausführung an sich handelt (Paris et al., 1983).

Für die angestrebte Modellierung ist des Weiteren zu spezifizieren, dass prozedurales *Fachwissen*, also „fachliche“ Handlungen und Prozesse einer Lehrkraft - im Unterschied zu lehrbezogenen fachdidaktischen Handlungen - in den Blick genommen werden. Handlungen von Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern als *Fachleuten* entsprechen in erster Linie den Methoden naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung, welche die Kultusministerkonferenz für das Fach Physik zusammenfasst als *die Nutzung von experimentellen und anderen Untersuchungsmethoden sowie die Nutzung von Modellen* (Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2005). Präziser ausformuliert können beispielsweise die Handlungen (1) *zielgerichtetes Experimentieren*, (2) *Modellieren und Mathematisie-*

5.4 Modellierung von Wissensarten für inhaltliche Subfacetten

	D1: Materieaufbau	D2: Kerne & Radioaktivität	D3: Teilchen
Fakten & Sachverhalte	- Beschreibung von Aufbau bzw. Struktur der Materie aus den verschiedenen Bausteinen auf den verschiedenen Ebenen (molekular, atomar, subatomar) (HK1a) - Benennung besonderer Entdeckungen in der historischen Entwicklung des Kenntnisstandes zur Struktur der Materie (z.B. Rutherford) (HK1a, Kap. 2.2.1) - Beschreibung von Eigenschaften einzelner Materiebausteine (HK1a) - Beschreibung von Vorgängen bzw. Prozessen im Atom, die den Methoden zur Untersuchung der Materiestruktur zugrunde liegen (HK1a)	- Beschreibung der Zusammensetzung des Atomkerns (HK1b, Kap. 2.2.1) - Beschreibung von stabilen und instabilen Atomkernen (HK1b, Kap. 2.2.1)	- Benennung von Elementarteilchen sowie deren Klassifikationsarten (HK2) - Benennung besonderer Teilchenentdeckungen und -suchen (HK2) - Benennung von Eigenschaften der verschiedenen Elementarteilchen (HK2) - Benennung von Antiteilchen (HK2) - Beschreibung von Aufbau, Eigenschaften und Entdeckung von Antimaterie (HK2) - Benennung verschiedener Arten von zusammengesetzten Teilchen (HK2)
Prinzipien & Gesetzmäßigkeiten	Beschreibung der Beziehung zwischen Materiebausteinen (HK1a)	Beschreibung der verschiedenen radioaktiven Zerfallsarten als Wechselwirkungsprozess von Teilchen (bis hinab zur Quark-Ebene) (HK1b, Kap. 2.2.1, Kap. 2.2.3.4)	- Beschreibung des Zusammenhangs der Klassifikationsarten von Elementarteilchen mit deren Eigenschaften (z.B. Ladungen, Massen, Spin ...) (Kap. 2.2.2) - Beschreibung des Zusammenhangs der Eigenschaften von Teilchen und Antiteilchen (HK2, Kap. 2.2.2) - Beschreibung der Aufbauarten der verschiedenen zusammengesetzten Teilchen (HK2, Kap. 2.2.2)
Begriffe	- Materiebausteine (Molekül, Atom, Atomkern, Nukleon, Proton, Neutron, Elektron, Quark, ...) sowie Bezeichnungen von Eigenschaftenparametern der Bausteine (verschiedene Ladungen, Masse, ...) sowie Begriffe zur Beschreibung von Bausteinbeziehung (Anziehung, Abstoßung, ...) (HK1a, Kap. 2.2.1) - Begriffe aus den Untersuchungsmethoden der Materiestruktur (Teilchenbeschuss, Streuung, Ablenkung, Anregung, Spektroskopie, Energienteaus, ...) (HK1a, Kap. 2.2.1, Kap. 2.2.3.4)	Nukleus, Nukleonen, verschiedene Zerfallsarten (α-, β- und γ-Zerfall) sowie teilnehmende Teilchen (Elektronen, Protonen, Neutronen, Neutrinos, Photonen, W-Bosonen, Up- und Down-Quark) sowie Begriffe zu Erhaltungsgrößen beim Zerfall (verschiedene Ladungsarten, Energie, ...) sowie Begriffe zur Beschreibung des Zerfallsprozesses (Umwandlung, Abstrahlung, ...) (HK1b, Kap. 2.2.1, Kap. 2.2.2, Kap. 2.2.3, Kap. 2.2.4)	Namen der Elementarteilchen und deren Klassifikationen (Fermionen, Bosonen, Leptonen, Quarks) sowie die Klassifikationen der zusammengesetzten Teilchen (Hadronen, Baryonen, Mesonen, ...) sowie Eigenschaftsbezeichnungen der Teilchen (verschiedene Ladungen, Masse, Spin, Lebensdauer, ...) (HK2, Kap. 2.2.2)

Tabelle 5.15: Deklaratives Fachwissen zu den Themen „Materieaufbau“, „Kerne und Radioaktivität“ sowie „Teilchen“

	D4: Wechselwirkungen	D5: Experimentarten	D6: Kosmologie
Fakten & Sachverhalte	- Benennung von Wechselwirkungen und den daran teilnehmenden Teilchen (HK4) - Zuordnung der in der Schule bekannten Phänomene bzw. Kräfte zu fundamentalen Wechselwirkungen (HK4) - Benennung von Reichweiten und relativen Stärken der Wechselwirkungen (HK4)	- Beschreibung von Aufbau, Zielen und Unterschieden von Streuexperimenten, Darstellung dazugehöriger Streuprozesse der Teilchen im Wechselwirkungspunkt (HK6) - Benennung von künstlicher Erzeugung und natürlichem Vorkommen von Teilchenzerfällen, Darstellung der Zerfälle als Wechselwirkungsprozess von Teilchen (HK6) - Beschreibung von Aufbau und Zielen spektroskopischer Experimente und Darstellung als Wechselwirkungsprozess von Teilchen (HK6)	- Benennung und Beschreibung von bedeutenden Aspekten bzw. Beiträgen, die die Teilchenphysik in der Beschreibung des Ursprungs und der Entwicklung des Universums geleistet hat (HK9) - Benennung grundlegender Aspekte der Beschreibung der heutigen Struktur des Universums auf Teilchenebene (HK9)
Prinzipien & Gesetzmäßigkeiten	- Beschreibung der Symmetrien als Basis der Wechselwirkungen (HK4) - Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Wechselwirkungen und Ladungen (HK4) - Beschreibung des Konzepts von (Vektor-) Bosonen als Austausch- bzw. Botenteilchen und des Zusammenhangs von deren Masse zu Reichweiten der Wechselwirkungen (HK4) - Beschreibung der Basisprozesse von Wechselwirkungen in der Feynman-Darstellung (HK4, Kap. 2.2.3.3) - Beschreibung von Energieabhängigkeit der Kopplungsstärken und Prinzip des Quark-Confinement (HK4)	- Beschreibung des Prinzips, dass sich immer kleinere Strukturen durch Streuexperimente mit immer größerer Schwerpunktsenergie auflösen lassen (Kap. 2.2.3.4) - Beschreibung der Äquivalenz von Energie und Masse (Kap. 2.2.2, Kap. 2.2.3) - Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Teilchenmasse, Lebensdauer, Zerfallsbreite und Verzweigungsverhältnissen (HK6, Kap. 2.2.3.4) - Beschreibung des Grundprinzips der Spektroskopie (Anregung, Abregung, Messung von Energieniveaus) (Kap. 2.2.3.4)	Beschreibung des Prinzips, dass im Universum mit fortschreitendem Alter eine Abkühlung und Verringerung der Energiedichte sowie potenziell eine Zunahme der Anzahl existierender Wechselwirkungsarten sowie Bildung gebundener Zustände und stabiler Materie stattfand (Kap. 2.2.6)
Begriffe	Namen der Wechselwirkungen (<i>Gravitation, elektromagnetische, starke und schwache Wechselwirkung</i>) und der teilnehmenden Elementarteilchen und der Austauschteilchen sowie die Begriffe <i>Reichweite, Kopplungsparameter</i> sowie Begriffe zu Symmetrien (<i>physikalische Symmetrie, Invarianz, Transformationen, Erhaltungsgrößen</i>) sowie die verschiedenen Ladungen (<i>elektromagnetische, starke Ladung bzw. Farbladung, schwache Ladung</i>) sowie Begriffe aus der Feynman-Darstellung (<i>Vertex, Emission, Absorption, Paarzeugung, Paarvernichtung</i>) (HK4, Kap. 2.2.2, Kap. 2.2.3, Kap. 2.2.4)	verschiedene Experimentarten (<i>Streuung, Kollision, Fixed-Target, Zerfall, Spektroskopie</i>) sowie Begriffe aus Aufbau und Zielen von Beschleunigern und Streuexperimenten (<i>Beschleunigung, Teilchenstrahlen, Kollision, Ruheenergie, kinetische Energie, Auflösung von Substrukturen</i>) sowie Begriffe aus Zerfallsexperimenten (<i>Ursprungsteilchen, Masse, Lebensdauer, Verzweigungsverhältnisse, Erhaltungsgrößen</i>) sowie Begriffe zu spektroskopischen Bindungszuständen (<i>gebundene Teilchenzustände, energetische Zustände, Übergang, Gamma-Strahlung</i>) (Kap. 2.2.3.4)	Die Begriffe <i>Urknallmodell, Standardmodell der Kosmologie, Thermische Entwicklung, beschleunigte Expansion, Nukleosynthese, Baryonienhalt, Mikrowellenhintergrund, Plasma, Entkopplung</i> (Kap. 2.2.6)

Tabelle 5.16: Deklaratives Fachwissen zu den Themen „Wechselwirkungen“, „Experimentarten“ sowie „Kosmologie“

ren sowie (3) *Erwerb und Anwendung von Wissen* als prozessbezogenen Kompetenzen im Bereich Erkenntnisgewinnung und damit als Kategorien für prozedurales physikalisches Fachwissen unterschieden werden (Ausformulierung des Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2016).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die vorgeschlagene Dreiteilung als geeignet erachtet. Eine teilchenphysikspezifische Definition der Handlungskategorien kann durch eine Anpassung der im Bildungsplan detailliert beschriebenen Teilkompetenzen zu den drei Kategorien erreicht werden (Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2016, S. 7) und ist in Tabelle 5.17 dargestellt.

Zur Beschreibung der prozeduralen Wissensanteile **P1** bis **P6** wurden innerhalb der deklarativen Wissensanteile in den Tabellen 5.15 und 5.16 Elemente identifiziert, die eng mit einer oder mehrerer der Teilhandlungen aus der Definition der prozeduralen Handlungskategorien in Tabelle 5.17 verknüpft sind. Wissen über die entsprechende Handlung ist Teil des zu modellierenden prozeduralen Wissens und wird in der Modellierung unter einem der sechs Themen in eine der drei Handlungskategorien eingeordnet. Beispielsweise ist das deklarative Wissensselement zur Benennung besonderer Entdeckungen in der historischen Entwicklung des Kenntnisstandes zur Struktur der Materie (in **D1**) unter anderem eng verknüpft damit, wie sich Daten aus bekannten historischen teilchenphysikalischen Experimenten zur Struktur der Materie interpretieren lassen (Handlung aus „zielgerichtetes Experimentieren“). Die Interpretation der Daten als Handlung gehört damit zum prozeduralen Wissen für das Thema „Materieaufbau“ (**P1**) in der Handlungskategorie „zielgerichtetes Experimentieren“.

Das Ergebnis der derart konstruierten Wissensanteile für die Themen „Materieaufbau“ (P1), „Kern und Radioaktivität“ (P2), „Teilchen“ (P3), „Wechselwirkungen“ (P4), „Experimentarten“ (P5) und „Kosmologie“ (P6) ist in den Tabellen 5.18 und 5.19 ausführlich dargestellt. In Anlehnung an die von Kirschner (2013) zur Textkonstruktion verwendete Frageform „*Wie kann etwas gemessen bzw. nachgeprüft werden?*“ wurden die prozeduralen Wissensselemente in den Tabellen alle in die Form „*Wie sich ... (tun) lässt.*“ gebracht. Zur Nachverfolgung wurden die zu den Handlungen korrespondierenden deklarativen Wissensselemente in den Tabellen kursiv gekennzeichnet.

Es ist anzumerken, dass die angezeigte Zusammenstellung prozeduraler Wissensanteile in den Tabellen 5.18 und 5.19 in keiner Weise einen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Jedes einzelne der deklarativen Wissensselemente aus den umfangreichen Tabellen 5.15 und 5.16 lässt sich jeweils mit mehreren bis hin zu allen

Handlungen	Umfasst:
zielgerichtet experimentieren	in teilchenphysikalischen Experimenten Phänomene zielgerichtet beobachten und die Beobachtungen beschreiben
	Hypothesen zu teilchenphysikalischen Fragestellungen aufstellen
	Experimente zur Überprüfung von teilchenphysikalischen Hypothesen planen (unter anderem vermutete Einflussgrößen getrennt variieren)
	(soweit mit Schulzubehör möglich) teilchenphysikalische Experimente durchführen und auswerten, dazu gegebenenfalls Messwerte erfassen
	teilchenphysikalische Daten interpretieren (insbesondere statistische Verteilungen typischer Kenngrößen teilchenphysikalischer Experimente wie Energie- und Winkelverteilungen)
modellieren und mathematisieren	mathematische Zusammenhänge zwischen teilchenphysikalischen Größen herstellen und überprüfen
	aus proportionalen Zusammenhängen Gleichungen entwickeln
	mathematische Umformungen zur Berechnung teilchenphysikalischer Größen durchführen
	statistische Methoden der Teilchenphysik anwenden zur Darstellung und Beschreibung von Daten sowie zur Schätzung unbekannter Parameter und zur Überprüfung von Hypothesen
	zwischen messbaren Beobachtungen und konstruierten, idealisierten Modellvorstellungen in der Teilchenphysik unterscheiden (unter anderem Unterschied zwischen Beobachtung und Erklärung)
	Analogien beschreiben und zur Lösung von Problemstellungen nutzen
	mithilfe von Modellen Phänomene erklären und Hypothesen formulieren
Wissen erwerben und anwenden	teilchenphysikalische Sachtexte sinnentnehmend lesen
	teilchenphysikalisches Fachwissen anwenden, um Problem- und Aufgabenstellungen zielgerichtet zu lösen
	aus teilchenphysikalischer Fachliteratur (neue) Erkenntnisse gewinnen

Tabelle 5.17: Drei Handlungskategorien von prozeduralem teilchenphysikalischem Fachwissen mit korrespondierenden Unterkategorien bzw. Teilhandlungen

5.4 Modellierung von Wissensarten für inhaltliche Subfacetten

	P1: Materieaufbau	P2: Kerne & Radioaktivität	P3: Teilchen
Wissen über zielgerichtetes experimentieren	- Wie sich in bekannten historischen teilchenphysikalischen Experimenten zur Struktur der Materie Phänomene zielgerichtet beobachten und die Beobachtungen beschreiben lassen (D1, Kap. 2.2.1) - Wie sich Daten (insbesondere Energie- und Winkelverteilungen) aus bekannten historischen teilchenphysikalischen Experimenten zur Struktur der Materie interpretieren lassen (D1, Kap. 2.2.1)	Wie sich radioaktive Phänomene für die Untersuchung von radioaktiven Quellen (z.B. Zählrohre oder Nebelkammern) zielgerichtet beobachten lassen; wie sich zu entsprechenden Fragestellungen Hypothesen aufstellen lassen; wie sich Experimente zur Überprüfung der Hypothesen planen, durchführen und auswerten lassen; wie sich erhobene (statistische) Daten interpretieren lassen (D2)	Wie sich zur Entdeckung und Suche neuer Teilchen in der Hochenergiephysik Hypothesen aufstellen, Experimente planen und Daten bekannter (historischer) teilchenphysikalischer Experimente zur Entdeckung und Suche neuer Teilchen interpretieren lassen (D3)
Wissen über modellieren und mathematisieren	- Wie sich mithilfe des Bohrschen Atommodells diskrete Energiezustände der Elektronen im Atom erklären lassen und wie sich mithilfe des Orbitalmodells das Phänomen erklären lässt, dass Elektronen trotz elektrischer Anziehung nicht in den Atomkern stürzen (D1, Kap. 2.2.1) - Wie sich der Zusammenhalt von Nukleonen im Atomkern mithilfe der Analogie zur kovalenten Bindung von Atomen aus der Chemie beschreiben lässt (D1, Kap. 2.2.1) - Wie sich der grundlegende Vorgang bei Strukturuntersuchungen durch Streuexperimente mithilfe der Analogie zu (in)elastischen Stößen aus der Mechanik beschreiben lässt (D1, Kap. 2.2.1)	Wie sich mithilfe von Feynman-Diagrammen Zerfälle als Wechselwirkungsprozess von Elementarteilchen modellieren lassen und wie sich darauf basierend (mithilfe mathematischer Berechnungen aus der Quantenfeldtheorie (in Grundzügen) Vorhersagen unter anderem zur Lebensdauer des Ursprungsteilchens formulieren lassen (D2, Kap. 2.2.3.4)	- Wie sich die quantenmechanische Eigenschaft Spin mithilfe der Analogie zu einer um seine eigene Achse rotierende Kugel beschreiben lässt (D3, Kap. 2.2.2) - Wie sich mithilfe der verschiedenen Ladungsmodelle (z.B. Farbladungsmodell) erklären lässt, an welchen Wechselwirkungen die Teilchen teilnehmen können (D3, Kap. 2.2.2) - Wie sich mithilfe des Quarkmodells der Aufbau der bekannten und noch unentdeckten Hadronen erklären lässt (D3, Kap. 2.2.2) - Wie sich (in Grundzügen) mithilfe quantenfeldtheoretischer Modellierungen (Dirac-Gleichung) die Existenz von Antiteilchen voraussagen lässt (D3, Kap. 2.2.2)
Wissen über Erwerb und Anwendung von Wissen	Wie sich aus aufbereiteten Sachtexten sowie insbesondere aus originaler (historischer) Fachliteratur Erkenntnisse zu Meilensteinen in der Entwicklung des heutigen Kenntnisstandes zum Aufbau der Materie gewinnen lassen (D1, Kap. 2.2.1)	Wie sich (deklaratives) teilchenphysikalisches Fachwissen zu Erhaltungssätzen und -größen anwenden lässt, um Zerfallsgleichungen in radioaktiven Zerfällen aufzustellen (D2, Kap. 2.2.3.4)	- Wie sich aus aufbereiteten Sachtexten sowie insbesondere aus originaler historischer und aktueller Fachliteratur Erkenntnisse zu besonderen Teilchenentdeckungen und -suchen (wie z.B. der Suche und Entdeckung des Higgs-Bosons) gewinnen lassen (D3) - Wie sich (deklaratives) Wissen zu den Teilchenklassifikationsarten anwenden lässt, um von bereits bekannten auf weitere existierende Gruppen von Elementarteilchen zu schließen (z.B. von der 1. Generation an Fermionen auf die 2. und 3. Generation) (D3, Kap. 2.2.2)

Tabelle 5.18: Prozedurales Fachwissen zu den Themen „Materieaufbau“, „Kerne und Radioaktivität“ sowie „Teilchen“

	P4: Wechselwirkungen	P5: Experimentarten	P6: Kosmologie
Wissen über zielgerichtetes experimentieren	- Wie sich in bekannten historischen teilchenphysikalischen Experimenten zur Entdeckung von vorausgesagten Austauschteilchen der Wechselwirkungen Phänomene zielgerichtet beobachten und Daten interpretieren lassen (<i>Kap. 2.2.2</i>) - Wie sich Daten bekannter teilchenphysikalischer Experimente so interpretieren lassen, dass Rückschlüsse auf die (Kopplungsstärke) der Wechselwirkungen gezogen werden können (<i>D4</i>)	- Wie für bekannte (historische) Streuexperimente Hypothesen zu möglichen Ergebnissen aufgestellt werden können und Daten mithilfe statistischer Analysen so interpretiert werden können, dass z.B. die Existenz seltener bzw. neuer Teilchen nachgewiesen werden kann (<i>D5, Kap. 2.2.3.4</i>) - Wie sich ein Experiment zur Lebensdauerermessung von Teilchen (beispielsweise Myonen in kosmischer Höhenstrahlung) planen, durchführen und unter Einsatz von statistischer Datenanalyse auswerten lässt (<i>D5, Kap. 2.2.3.4</i>)	Wie sich in Grundzügen in bekannten (historischen) Experimenten zur Untersuchung elektromagnetischer Strahlung aus dem Weltall sowie kosmischer Strahlung und weiterer Elementarteilchen aus dem Weltall Phänomene zielgerichtet beobachten lassen sowie Hypothesen zu möglichen Ergebnissen aufgestellt werden können und Daten der Experimente mithilfe statistischer Analysen so interpretiert werden können, dass Rückschlüsse über Vorgänge im Universum (z.B. Supernovae) oder zur Struktur des Universums (z.B. Mikrowellenstrahlung) gezogen werden können (<i>Kap. 2.2.6</i>)
Wissen über modellieren und mathematisieren	Wie sich mithilfe verschiedener Modellierungen mit einem unterschiedlichen Grad an Anschaulichkeit bzw. Mathematisierung die fundamentalen Wechselwirkungen beschreiben und unterschiedliche beobachtbare Aspekte der Wechselwirkungen erklären lassen: (1) wechselseitiger Vergleich von Ladungen unter Teilchen, (2) Analogie zu klassischen Kräften (Feldern), (3) Austausch von Informationen zwischen Teilchen durch Austauschteilchen, (4) Austausch von Informationen durch Felder, (5) Feynman-Darstellung von Teilchenprozessen, (6) mathematisch genaue Modellierungen durch Methoden der Quantenfeldtheorie (<i>D4, Kap. 2.2.3</i>)	- Wie mit der Feynman-Darstellung die möglichen Basisprozesse im Wechselwirkungspunkt der verschiedenen Experimente modelliert werden können (<i>D5</i>) - Wie sich Feynman-Diagramme und damit verbundene quantenfeldtheoretische Berechnungen als Modell, das nur Wahrscheinlichkeitsaussagen zulässt, von real messbaren Prozessen in teilchenphysikalischen Experimenten unterscheiden (<i>Kap. 2.2.3.3</i>) - Wie sich Gleichungen zu mathematischen Zusammenhängen zwischen Lebensdauer, Masse, Zerfallrate und Verzweigungsverhältnissen aufstellen, umformen und überprüfen lassen (<i>D5, Kap. 2.2.3.3</i>)	Wie sich (in Grundzügen) im Modell der GUT-Kraft die schwache, starke und elektromagnetische Kraft zu einer vereinheitlichten Kraft zusammenfassen lassen und durch Extrapolationsmethoden der gemessenen energieabhängigen Kopplungskonstanten der Wechselwirkungen Rückschlüsse auf die Zeit (Energiedichte) gezogen werden können, in der die GUT-Kraft existierte (<i>D6, Kap. 2.2.6</i>)
Wissen über Erwerb und Anwendung von Wissen	- Wie sich Wissen zum bekannten elektrischen Ladungsmodell anwenden lässt, um die zu weiteren Wechselwirkungen gehörenden Ladungsmodelle (Farb-, schwache Ladung) zu verstehen (<i>D4, Kap. 2.2.3</i>) - Wie sich (deklaratives) Wissen zu den Regeln für Feynman-Diagramme anwenden lässt, um alle möglichen Basisprozesse der fundamentalen Wechselwirkungen zu modellieren (<i>D4, Kap. 2.2.3.3</i>)	- Wie sich Wissen zu Wechselwirkungen und Erhaltungsgrößen anwenden lässt, um mögliche entstandene Ursprungsteilchen z.B. in Streuexperimenten aus den schlussendlich beobachteten Zerfallsprodukten zu rekonstruieren (<i>Kap. 2.2.3</i>) - Wie sich (deklaratives) Wissen zur Schwerpunktsenergie eines Experiments sowie zur Äquivalenz von Energie und Masse anwenden lässt, um Wahrscheinlichkeiten für die Produktion bestimmter (schwerer) Teilchen in Kollisionen zu berechnen (<i>D5, Kap. 2.2.3.4</i>)	- Wie sich (deklaratives) teilchenphysikalisches Wissen zu den fundamentalen Wechselwirkungen und deren energie- bzw. abstandsabhängigen Kopplungsstärken anwenden lässt, um die Existenz verschiedener Wechselwirkungen in bestimmten Altersabschnitten des Universums mit unterschiedlichen Energiedichten voraussagen (<i>D6, Kap. 2.2.6</i>) - Wie sich Wissen zum Aufbau und Zerfall von Hadronen sowie zur Kernfusion nutzen lässt, um Vorgänge in der Phase der primordialen Nukleosynthese zu erklären (<i>Kap. 2.2.6</i>)

Tabelle 5.19: Prozedurales Fachwissen zu den Themen „Wechselwirkungen“, „Experimentarten“ sowie „Kosmologie“

definierten Teilhandlungen in Verbindung bringen. Die dargestellte Zusammenstellung gibt dabei als Beispiel nur diejenigen Handlungen wieder, die sehr eng mit deklarativen Wissensselementen verbunden sind, und kann in vielfältiger Weise erweitert werden.

5.4.3 Konditionales teilchenphysikalisches Fachwissen

Konditionales Wissen schließlich entspricht dem Wissen, dass zur Begründung und Beurteilung von Handlungen (und Prozessen) benötigt wird (Kirschner, 2013; Tepner et al., 2012). Hierbei kann Wissen über Begründungen die Frage beantworten, *warum* eine Handlung durchgeführt wird. Wissen über Beurteilungen umfasst dagegen Wissen über die Bedingungen, unter welchen (*wann*) eine Handlung angemessen ist.

Für die Ausformulierung der konditionalen Wissensanteile der verbleibenden Fachwissenspunkte **K1** bis **K6** in Abbildung 5.27 könnten analog zum Prozedere im vorangegangenen Abschnitt für alle Handlungen im prozeduralen Wissen in den Tabellen 5.18 und 5.19 noch einmal jeweils spezifische Begründungen und Beurteilungen dargestellt werden. Den aussagekräftigen Kern dessen, was konditionales teilchenphysikalisches Fachwissen bedeutet, lässt sich jedoch auch ohne die zu erwartende sehr umfangreiche Darstellung verstehen. Grund hierfür ist, dass alle beschriebenen fachlichen Handlungen im prozeduralen Wissen den drei verschiedenen Handlungstypen „experimentieren“, „modellieren und mathematisieren“ bzw. „Wissen erwerben und anwenden“ zuzuordnen sind. Es lässt sich daher prototypisch das konditionale Wissen einmal für jeden der Handlungstypen für ein teilchenphysikalisches Ausgangsthema modellieren und leicht auf die gleichen Handlungen zu anderen Themen übertragen. In Tabelle 5.20 sind beispielhaft Wissen über Begründungen und Beurteilungen anhand der Handlungen „experimentieren“ und „modellieren und mathematisieren“ aus dem prozeduralen Wissen zum Thema „Materieaufbau“ (**P1**) sowie anhand der Handlung „Wissen anwenden“ aus dem prozeduralen Wissen zum Thema „Experimentarten“ (**P5**) dargestellt. In Anlehnung an die Definition konditionalen Wissens, welches *Wann*- und *Warum*-Fragen zur Angemessenheit einer Handlung beantworten soll, wurden die gezeigten Beispiele konditionalen Wissens alle in Form von „... , weil ...“ (Begründungen) sowie in Form von „... , wenn ...“ (Bedingungen im Rahmen von Beurteilungen) konstruiert. Zur Nachverfolgung wurden die zu den Handlungen korrespondierenden prozeduralen Wissensselemente in den Tabellen kursiv gekennzeichnet.

Beispiel zu K1: Zielgerichtetes Beobachten von Phänomenen in bekannten historischen Experimenten zur Untersuchung des Materieaufbaus, das Aufstellen von Hypothesen für die Experimente und die Interpretation der historischen Daten wird durchgeführt, ...	
Wissen über Begründungen	... weil es eine authentische, naheliegende Form ist, „vom Großen ins Kleine“ die Komponenten unseres heutigen Wissens zum Materieaufbau zu verstehen durch das Nachvollziehen entlang der historischen Entwicklung des Kenntnisstandes. (P1, Kap. 2.2.1) ... weil es außerhalb physikalischer Forschungsgrößenrichtungen und insbesondere in der Schule kaum möglich ist, eigene Experimente zur Untersuchung des Materieaufbaus und damit einen großen Teil der Methoden der Erkenntnisgewinnung der Teilchenphysik durchzuführen. (P1)
Wissen über Beurteilungen	... wenn Ziele und Rahmenbedingungen der Experimente in den historischen Kontext eingeordnet werden können, wenn also insbesondere Wissen zum damaligen Kenntnisstand des Materieaufbaus und zu verfügbaren Untersuchungsverfahren vorhanden ist. (P1, Kap. 2.2.1)
Beispiel zu K1: Modelle zum Materieaufbau (z.B. Atommodelle) und Analogien zum Materieaufbau (z.B. „kovalente“ Nukleonenbindung, Streuexperimente als mechanische Stoßprozesse) werden aufgestellt und verwendet, ...	
Wissen über Begründungen	... weil sich damit Phänomene des Materieaufbaus veranschaulichen lassen (z.B. Nukleonenbindung) bzw. Phänomene erklären lassen (z.B. diskrete Energiezustände der Elektronen im Atom) sowie Hypothesen formulieren lassen (z.B. Auftrefforte bzw. -wahrscheinlichkeiten von einem am Atomkern gestreuten α-Teilchen). (P1, Kap. 2.2.1)
Wissen über Beurteilungen	... wenn eindeutig zwischen Modellvorstellungen zum Materieaufbau und real beobachtbaren Phänomenen unterschieden werden kann (z.B. aus einem Atommodell abgeleitete Energiezustände von Elektronen vs. Spektrum des Wasserstoffatoms) (P1) ... wenn die Chancen und Grenzen eines Modells oder einer Analogie zum Materieaufbau bekannt sind, d.h. wenn eingeordnet werden kann, welche Aspekte einer Problemstellung bzw. eines Phänomens ein Modell oder eine Analogie erklären kann und welche nicht (z.B. die Erklärung diskreter Energieniveaus von Elektronen durch das Bohrsche Atommodell, welches jedoch nicht erklären kann, warum die Elektronen nicht in den Atomkern stürzen). (P1)
Beispiel zu K5: Wissen zu Wechselwirkungen und Erhaltungsgrößen wird angewendet für die Bestimmung möglicher - z.B. in Streuexperimenten entstandener - Ursprungsteilchen durch die Rekonstruktion der schlussendlich beobachteten Zerfallsprodukte, ...	
Wissen über Begründungen	... weil sich instabile hochenergetische Teilchen aufgrund ihrer kurzen Lebensdauern nicht direkt beobachten (rekonstruieren) lassen. (P5)
Wissen über Beurteilungen	... wenn alle möglichen Zerfallskanäle und ihre durch die Quantenfeldtheorie vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden und genügend Daten (z.B. aus genügend Kollisionen) vorliegen, um das Messen zufälliger statistischer Schwankungen in den gemessenen Endgrößen auszuschließen. (P5, Kap. 2.2.3.4)

Tabelle 5.20: Beispiele für konditionales Fachwissen über Handlungen und Prozessen zu zwei Themen aus „Materieaufbau“ und einem Thema aus „Experimentarten“

Die drei Beispiele in Tabelle 5.20 sind Teil des konditionalen Wissens der beiden teilchenphysikalischen Themen „Materieaufbau“ und „Experimentarten“ (K1 bzw. K5). Eine systematische Ausformulierung aller Beschreibungen im Rahmen der Fachwissenspunkte K1 bis K6 kann wie erwähnt entlang der drei Beispiele entwickelt werden.

5.4.4 Finale Modellierungsergebnisse der Dimension *Wissensarten*

Für die Modellierung des von Lehrkräften benötigten Fachwissens in der Dimension *Wissensarten* wurde Forschungsfrage F2 der vorliegenden Arbeit darüber beantwortet, wie jeweils deklaratives, prozedurales und konditionales Wissen für die bereits modellierten Inhaltsbereiche im Fachwissen aussehen. Die Modellierung wurde durch die theoriegeleitete Erarbeitung adaptierter Beschreibungen jedes der sechs relevantesten inhaltlichen Themen für jede der drei Wissensarten durchgeführt. Die Ergebnisse der auf diese Weise modellierten 18 Punkte im zweidimensionalen Inhaltsbereich-Wissensarten-Raum (siehe Abbildung 5.29) wurden in den drei vorangegangenen Abschnitten im Detail vorgestellt.

Über die Ausformulierung einzelner Gitterpunkte hinaus, stellt die für physikalisches bzw. teilchenphysikalisches Fachwissen spezifisch modellierte Dimension *Wissensarten* ein weiteres zentrales Ergebnis der vorliegenden Arbeit dar. Die Spezifität manifestiert sich in verschiedenen Subkategorien, die innerhalb der drei Wissensarten identifiziert wurden.

Wie in Abbildung 5.29 in rot verdeutlicht, wurden für deklaratives teilchenphysikalisches Fachwissen die Subkategorien (1) Fakten und Sachverhalte, (2) Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten sowie (3) Begriffe identifiziert. Prozedurales teilchenphysikalisches Fachwissen umfasst dagegen „fachliche“ Handlungen in den Subdimensionen (1) Wissen über zielgerichtetes experimentieren, (2) Wissen über modellieren und mathematisieren sowie (3) Wissen über den Erwerb und die Anwendung von Wissen. Jede der Subkategorien im prozeduralen Wissen beinhaltet ihrerseits jeweils mehrere Teilhandlungen, die in Tabelle 5.17 dargestellt wurden. Konditionales teilchenphysikalisches Fachwissen enthält schließlich die Subkategorien (1) Wissen über Begründungen und (2) Wissen über Beurteilungen, jeweils bezogen auf die teilchenphysikalischen Handlungen aus dem prozeduralen Fachwissen.

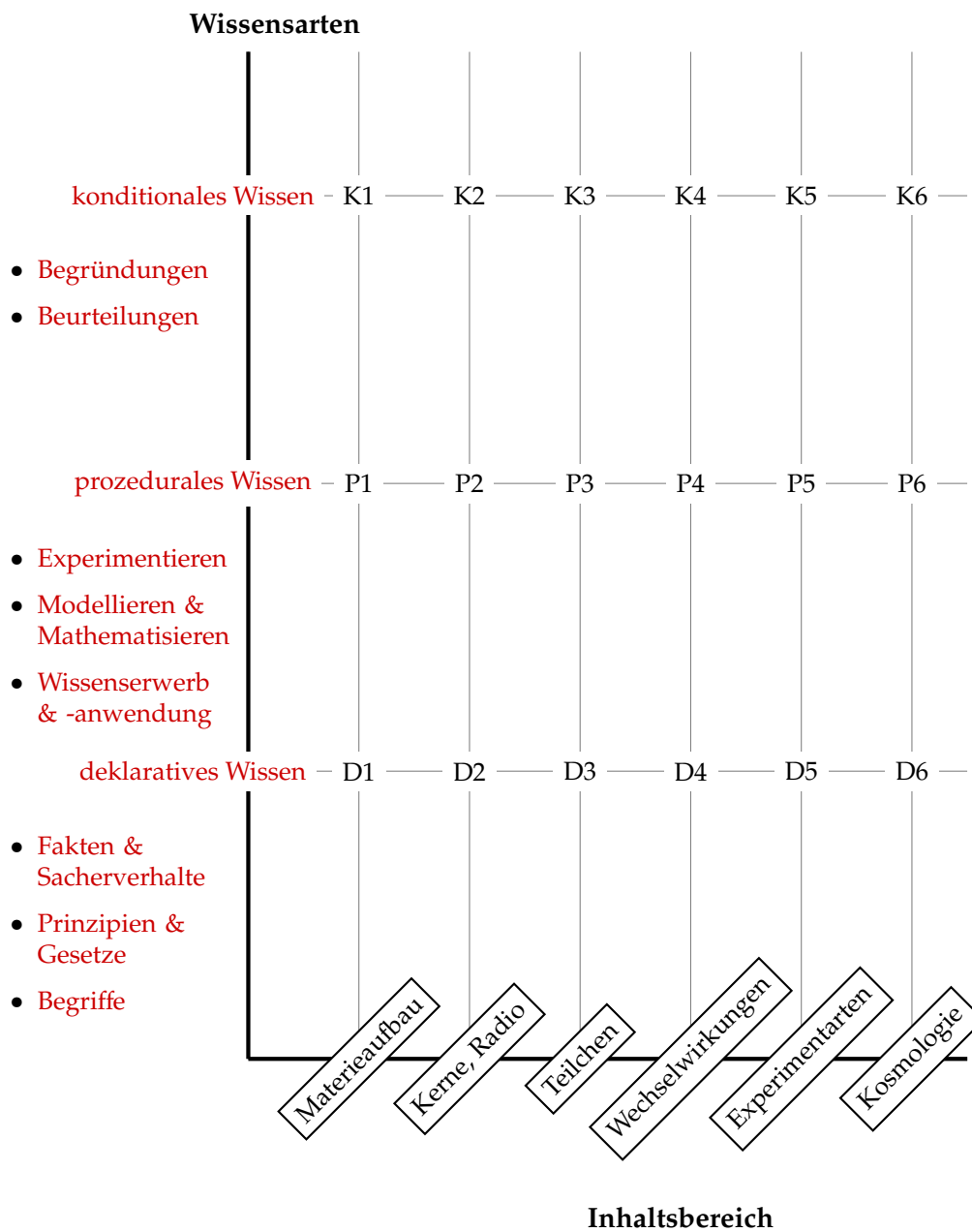


Abbildung 5.29: Final modelliertes Fachwissen von Lehrkräften in der Teilchenphysik in der Dimension *Wissensarten*

5.4.4.1 Weitere Empfehlung für Programme und Standards

In Abschnitt 5.3.6.1 wurden bereits Empfehlungen dazu gegeben, wie Lehrkräfteausbildungs- bzw.- fortbildungsprogramme auf Basis der identifizierten Subfacetten der Fachwissensdimension *Inhaltsbereich* konzipiert sein sollten. Zusätzlich wurde aufgezeigt, wie die erarbeitete Beschreibung der relevantesten Themen zur Ausformulierung bzw. Ausschärfung inhaltsbezogener Bildungsstandards für die Teilchenphysik verwendet werden kann.

Durch die Ergebnisse der Modellierung zur Dimension *Wissensarten* können nun einerseits weiterführende, unterrichtsbezogenere Empfehlungen für die inhaltliche Konzeption von Lehrkräfteprogrammen ausgesprochen werden als es auf Basis der bisherigen (deklarativ geprägten) Wissensbeschreibungen möglich war. Wie in Kapitel 1.3.2 definiert, sind insbesondere prozedurales und konditionales Wissen bei Lehrkräften mit direktem Bezug zu spezifischen (Unterrichts-)situationen organisiert und bilden daher eine wichtige Voraussetzung für deren Unterrichtsabläufe und Unterrichtsqualität. Eingeschränkt auf die Prämisse, dass hier nicht fachdidaktisches sondern fachliches Wissen untersucht wurde, lässt sich dennoch festhalten, dass Wissen über fachliche Handlungen, deren Beurteilung und Begründung von zentraler Bedeutung für die fachliche Planung, Durchführung und Reflexion von Unterricht ist. Aus diesem Grund sollten in Lehrkräfteprogrammen zur Teilchenphysik unter der Verwendung der soeben vorgestellten Modellierungen neben Inhalten des deklarativen Fachwissens selbstverständlich auch prozedurale und konditionale Aspekte thematisiert werden.

Beispielsweise könnte ein Modul zu Experimentarten neben den Zielen von Streuexperimenten und einer Darstellung der Teilchenprozesse im Wechselwirkungspunkt (deklaratives Wissen) ebenfalls thematisieren, wie sich Wissen zu Wechselwirkungen und Erhaltungsgrößen anwenden lässt, um aus den beobachteten Zerfallsprodukten potenziell in der Streuung entstandene Ursprungsteilchen zu rekonstruieren (prozedurales Wissen). Zusätzlich könnte thematisiert werden, weshalb die Rekonstruktion über die Zerfallsprodukte stattfindet (Begründung: Teilchen mit kurzer Lebensdauer lassen sich nicht direkt beobachten) sowie, wann die Rekonstruktion durchgeführt werden kann (Beurteilung: wenn alle Zerfallskanäle berücksichtigt werden und genügend statistische Messdaten vorliegen). Die letzten beiden Aspekte sind hierbei dem konditionalen Wissen zuzuordnen.

In ähnlicher Weise kann man für alle teilchenphysikalischen Themen aus dem deklarativen Wissen in den Tabellen 5.15 und 5.16 zu thematisierende Handlun-

gen, deren Begründung und Beurteilung als Einheiten für die Lehrkräfteprogramme zusammenstellen.

Auf der anderen Seite lassen sich die Ergebnisse der Modellierung von Wissensarten ebenfalls zur weiteren Ausformulierung von Bildungsstandards in der Teilchenphysik verwenden. Während die Modellierungsergebnisse der Dimension *Inhaltsbereich* zur Ausschärfung inhaltsbezogener Kompetenzen in den Standards empfohlen wurden, können bei der Dimension *Wissensarten* insbesondere die Beschreibungen zum prozeduralen Wissen in den Tabellen 5.18 und 5.19 zur Formulierung prozessbezogener Kompetenzen in den Standards dienen, wobei der direkte Bezug zu den inhaltsbezogenen Kompetenzen durch die vorliegende Arbeit gegeben ist. Für eine derartige Ausformulierung von Standards müsste jedoch noch einmal reflektiert werden, ob und wie sich das hier modellierte Fachwissen von Lehrkräften von dem durch die Schülerinnen und Schüler anzustrebenden unterscheidet.

Teil IV

Zusammenfassung

Zusammenfassung

Motiviert durch die große Diskrepanz zwischen dem Einzug der Teilchenphysik in den Schulunterricht einerseits und einem Mangel an korrespondierenden Lehrkräfteausbildungs- sowie -fortbildungsprogrammen andererseits hat sich das vorgestellte Forschungsprojekt zum Ziel gesetzt, dasjenige Fachwissen zu modellieren, welches Lehrkräfte für den Unterricht teilchenphysikalischer Themen benötigen und welches sie als normative Zielsetzung in solchen Programmen zukünftig erlangen sollten. Dieses spezielle Fachwissen wurde bislang nicht ausreichend beschrieben und lässt sich aufgrund der Domänenspezifität von Fachwissen nicht einfach aus bereits modellierten physikalischen Domänen übertragen.

Für die Modellierung wurde angestrebt, die für Lehrkräfte relevanten Fachwissenselemente aus der Menge an Schlüsselkonzepten auszuwählen, um welche sich auch das Fachwissen von Forschenden als den Expertinnen und Experten dieses Fachgebiets rankt. Die Schlüsselkonzepte entspringen dabei den *Big Ideas* der Teilchenphysik, welche überblicksartig in Kapitel 2 in Form der bedeutendsten Erkenntnisse, Errungenschaften und Entdeckungen der Teilchenphysik vorgestellt wurden.

Das zugrundeliegende Strukturmodell

Dem in Kapitel 1 dargestellten Forschungsstand zum Fachwissen von Naturwissenschafts- bzw. Physiklehrkräften folgend, wurde für die Modellierung in der vorliegenden Arbeit ein Strukturmodell zugrunde gelegt, welches das Fachwissen einer Lehrkraft als Produkt verschiedener anerkannter Wissensdimensionen versteht. Im Rahmen der vorgestellten Modellierung wurde auf die beiden Dimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* fokussiert. Die Dimension *Inhaltsbereich* umfasst dabei eine Klassifikation in verschiedene unterscheidbare Themen(komplexe) bzw. Basiskonzepte der untersuchten physikalischen Domäne und wurde aufgrund ihrer Bedeutung als Bezugsrahmen für alle weiteren Fachwissensdimensionen ausgewählt. Von den anderen beiden etablierten und in verschiedenen Projekten zur Fachwissensmodellierung untersuchten Dimensionen - den *Wissensstufen* und *Wissensarten* - wurden nur die *Wissensarten* in der vorliegenden Arbeit untersucht. Die Dimension *Wissensarten* beschreibt dabei eine Unterscheidung des Fachwissens zu einem Thema in die verschiedenen Formen, in welchen dieses Fachwissen vorliegen kann. In Anlehnung an die bislang präziseste Beschreibung verschiedener Wissensarten für physikalisches Fachwissen im Projekt *ProwiN* (Tepner et al., 2012), wurden im

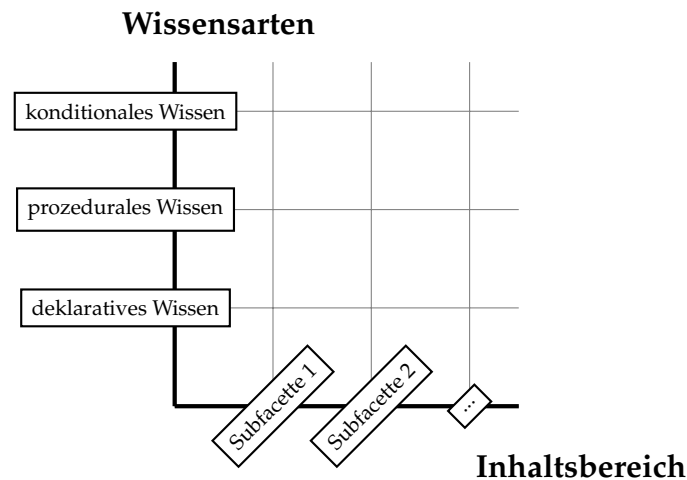


Abbildung 5.30: Schematische Darstellung des Fachwissens einer Lehrkraft als Produkt der Dimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten*

vorgestellten Projekt die Arten deklaratives, prozedurales und konditionales Wissen unterschieden. *Wissensstufen* wurden in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht, da deren Modellierung in der Regel durch eine grob vordefinierte A-Priori-Struktur und der empirischen Identifikation von Wissensniveaus innerhalb von untersuchten Gruppen von Testpersonen stattfindet. Solch ein Vorgehen scheint für das Stadium des hier zu modellierenden Fachwissens nicht geeignet, da es insbesondere für die Konstruktion von Testitems auf Schulniveau bislang keine theoretische Basis gibt.

Forschungsfragen

In der vorliegenden Arbeit wurde demnach das Fachwissen einer Lehrkraft als Produkt der Dimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* verstanden. Wie in Abbildung 5.30 dargestellt, entspricht die angestrebte Modellierung hierbei einer Strukturierung des zweidimensionalen Raums zwischen den beiden Dimensionen. Auf Basis der theoretischen Vorüberlegungen wurden in Kapitel 3 folgende Forschungsfragen formuliert, welche dieser Arbeit zugrunde lagen:

Forschungsfrage 1 (F1): Durch welche Subfacetten lässt sich die Dimension *Inhaltsbereich* des Fachwissens von Lehrkräften für die Domäne Teilchenphysik modellieren?

Forschungsfrage 2 (F2): Wie sehen deklaratives, prozedurales und konditionales Wissen in Bezug auf die inhaltlichen Subfacetten des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik aus?

Modellierung der Dimension *Inhaltsbereich*

Wie in Kapitel 4 ausführlich erläutert, wurde Forschungsfrage F1 mithilfe empirischer Untersuchungen in Form einer durchgeführten Delphi-Studie beantwortet. In der Delphi-Studie wurde die Sichtweise eines Gremiums von internationalen Expertinnen und Experten der Teilchenphysikforschung, -lehre sowie der teilchenphysikbezogenen Öffentlichkeitsarbeit (*Outreach*) auf den zu beschreibenden Gegenstand zusammengeführt. Methodisch wurden in drei konsekutiven Befragungsrunden Online-Fragebögen zur Erhebung der Expertisemeinung eingesetzt. Es nahmen in den Befragungsrunden mit abnehmender Anzahl zwischen 65 Personen (in Runde 1) und 35 Personen (in Runde 3) teil. Während auf Seiten der Befragungsteilnehmer die Ergebnisse einer Befragungsrunde im Delphi-Forschungsdesign als Evaluationsgrundlage in der Folgerunde fungierten, konnte das zu modellierende Fachwissen auf der Analyseseite pro Runde sukzessiv immer genauer definiert werden.

Erste Befragung des Expertisegremiums

Die erste Befragungsrunde diente einer Strukturierung des Themenfelds. Innerhalb des noch weitestgehend unbekannten Konstrukts des teilchenphysikalischen Fachwissens sollten Themen und Unterthemen identifiziert werden, welche potenziell für das Fachwissen von Lehrkräften relevant sind. Hierzu wurde das Expertisegremium um eine offene Benennung aller aus seiner Sicht zentral wichtigen Erkenntnisse, Sachverhalte, Kernaussagen und Errungenschaften der Teilchenphysik gebeten. Die Ergebnisse der Befragung wurden mithilfe einer Qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) zu Fachwissenskategorien und -unterkategorien zusammengefasst und mit universitärer Standardeinführungsliteratur trianguliert. Es ergab sich ein System aus 10 Kategorien und insgesamt 59 Unterkategorien, welches nach einer ersten Reduktion der Unterkategorien auf Basis der Häufigkeit von Nennungen durch die Expertinnen und Experten auf 41 Unterkategorien verkleinert wurde. Das reduzierte System als Ergebnis der ersten Befragungsrunde wurde in den Abbildungen 5.6 und 5.7 in Kapitel 5.1.2 ausführlich dargestellt und kann als erster Entwurf für das Fachwissen von Lehrkräften in der Teilchenphysik aufgefasst werden kann.

Zweite Befragung des Expertisegremiums

Die zweite Befragungsrunde wurde durchgeführt, um die zuvor erarbeitete Strukturierung inhaltlich zu validieren. Es sollte hierbei insbesondere die Frage beantwortet

werden, ob das in Runde 1 konstruierte System aus fachwissenschaftlichen Kategorien und Unterkategorien alle Aspekte des für Lehrkräfte relevanten Fachwissens abdeckt und darüber hinaus keine weiteren irrelevanten Themen enthält. Mithilfe einer Kombination aus quantitativer und qualitativer Befragungsmethodik wurden einerseits die Zustimmung des Gremiums zum vorgeschlagenen Kategoriensystem und andererseits weiterführende Verbesserungsvorschläge erhoben.

Die quantitative Datenauswertung ergab zunächst, dass nach durchschnittlicher Gremiumsansicht die Unterkategorienauflistungen für alle Hauptkategorien aus Runde 1 das zu modellierende Fachwissen zu über drei Vierteln abdecken. Unter anderem mithilfe eines Kolmogorov-Smirnoff-Anpassungstests konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass die Angaben der Teilnehmenden keinem zufälligen Antwortverhalten entspringen können, womit eine Aussagekraft der Daten zum Abdeckungsgrad trotz kleiner Stichprobengröße bestätigt ist. Im Wilcoxon-Rangsummen-Test zeigten sich weder Unterschiede in den Meinungen von Expertinnen und Experten aus verschiedenen Berufsgruppen noch aus unterschiedlichen Sozialisierungsländern mit der Teilchenphysik.

Bei der qualitativen Datenauswertung in Runde 2 wurden die Verbesserungsvorschläge der Expertinnen und Experten mithilfe einer inhaltlich-strukturierenden Qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) zu einem gut begründeten, in sich konsistenten Set an Veränderungen zusammengefasst und auf das Kategoriensystem aus Runde 1 angewandt. Es ergab sich das in Abbildung 5.31 dargestellte optimierte Kategoriensystem mit 10 fachwissenschaftlichen Hauptkategorien und 35 Unterkategorien. Zu jeder der Unterkategorien wurde aus den Angaben der Gremien aus den ersten beiden Befragungsrunden eine weiterführende kurze Beschreibung des jeweiligen Inhalts erarbeitet, welche in Anhang A.2 nachzulesen sind.

Dritte Befragung des Expertisegremiums

In der dritten Befragungsrunde sollte schließlich ein Konsens unter den Expertinnen und Experten über die für das Fachwissen von Lehrkräften besonders relevanten Themen in der Zusammenstellung aus Runde 2 erzielt werden. Mithilfe geschlossener Bewertungsskizzen wurde das Gremium hierzu um eine Einschätzung aller 35 fachwissenschaftlicher Unterkategorien des zuvor erarbeiteten Kategorienmodells in Bezug auf ihre Relevanz für das Lehrkräftefachwissen gebeten.

Eine Verteilung der Einschätzungen der Experten zu allen Unterkategorien findet sich in Abbildung 5.15 in Kapitel 5.3.1. Durch Reliabilitätsanalysen und Faktoren-



Abbildung 5.31: System an Fachwissenskategorien, welches als inhaltlich validierter Modellentwurf für das Fachwissen von Lehrkräften mithilfe des Expertisegremiums in Runde 2 erarbeitet wurde. Hauptkategorien sind blau und Unterkategorien gelb dargestellt.

analysen der Rating-Daten konnte gezeigt werden, dass sich die Rating-Items zu den Unterkategorien jeweils einer Hauptkategorie zu einer Art Skala zusammenfassen lassen, die das gleiche zugrundeliegende Konstrukt - die Relevanz der betreffenden Hauptkategorie - messen. Lediglich eine Hauptkategorie ließ sich in zwei statt nur in einen Faktor zerlegen, so dass in Folge dessen die nachfolgende Analyse auf dem weniger komplexen Datensatz von 11 neuen Hauptkategorien statt der ursprünglichen 35 Unterkategorien durchgeführt werden konnte. Die 11 neuen Hauptkategorien sind im Einzelnen:

- Materieaufbau (1a)
- Kernphysik und Radioaktivität auf Elementarteilchenebene (1b)
- Teilchen in der Hochenergiephysik (2)
- Spezielle Relativitätstheorie (SRT) und Quantenmechanik (QM) in Bezug zur Teilchenphysik sowie Quantenfeldtheorie (QFT) (3)
- Fundamentale Wechselwirkungen bzw. Kräfte (4)
- Symmetrien und Erhaltungsgrößen (5)
- Arten von Experimenten (6)
- Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson (7)
- Das Standardmodell der Teilchenphysik (8)
- Teilchenphysik in der Kosmologie (9)
- Offene Fragen der Teilchenphysik (10)

Deskriptive Analysen der Rating-Daten zu den 11 neuen Hauptkategorien ergaben, dass die mittleren Relevanzeinschätzungen des Gremiums zu den Themen mit Mittelwerten zwischen $M = 4.06$ (Hauptkategorie 7) und $M = 5.74$ (Hauptkategorie 1a und Hauptkategorie 4) auf einer Skala von 1=“überhaupt nicht relevant“ bis 6=“sehr relevant“ ausschließlich hohe Werte aufweisen. Daraus ergibt sich, dass alle 11 Themen aus Sicht der Expertinnen und Experten relevant für das Fachwissen von Lehrkräften sind. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die betreffenden Themen bereits in den vorangegangenen Befragungsrunden von den Expertisegremien selbst benannt wurden. Da bislang jedoch immer nur Teile des Gremiums einzelne Themen evaluierten, handelt es sich hier um eine weitere Validierung der Modellierungsergebnisse.

Um dennoch etwaige vorhandene Unterschiede zwischen den Hauptkategorien aufzudecken, wurde mithilfe von Varianzanalysen der Rating-Daten untersucht, welche der 11 Themenkomplexe sich relevanzbetreffend auch statistisch signifikant voneinander unterscheiden und welche Themen nicht unterscheidbar sind. Es fanden sich hierbei drei Gruppen von Hauptkategorien mit jeweils nicht unterscheidbarer Relevanz. Die Hauptkategorien 1a (Materieaufbau) und 4 (Wechselwirkungen) wurden von den Expertinnen und Experten gemeinsam am höchsten bewertet, was im ersten Fall auf eine Nähe zu weiteren bereits im Physikcurriculum existierenden Themen und im zweiten Fall auf die hohe Bedeutung der Wechselwirkungen im Standardmodell der Teilchenphysik zurückgeführt wurde. In der Gruppe mit zweithöchster Relevanz finden sich die Hauptkategorien 2 (Teilchen), 9 (Kosmologie), 6 (Experimentarten) sowie 1b (Kerne und Radioaktivität). Die Gruppe mit niedrigster Relevanz umfasst die Hauptkategorien 5 (Symmetrien), 3 (SRT, QM und QFT), 10 (Offene Fragen), 8 (Standardmodell) sowie 7 (Higgs). Weitere Interpretationen und Schlussfolgerungen zur Zusammensetzung der einzelnen Gruppen finden sich in Kapitel 5.3.4.1 sowie im nachfolgenden Abschnitt.

Gemeinsamkeiten des Expertise- und Lehrkräftegremiums

In der dritten Befragungsrunde wurde ebenfalls die Meinung von 108 internationalen Lehrkräften mit Erfahrung im Unterrichten teilchenphysikalischer Themen zu dem Kategorienmodell aus Runde 2 erhoben. Eine ähnliche Einschätzung der Themen durch die Lehrkräfte sollte hierbei die Ergebnisse der Befragung der Expertinnen und Experten auch aus einer Praxissicht heraus validieren. Durch eine analoge Online-Befragung in Form der gleichen Aufforderung zur Einschätzung der 35 Themen in Bezug auf ihre Relevanz für das Fachwissen konnten die Rating-Daten der Lehrkräfte ebenfalls auf die zuvor für das Expertisegremium beschriebene Weise im Rahmen von Varianzanalysen analysiert werden. Die Etablierung von Relevanzgruppen innerhalb der Hauptkategorien im Lehrkräftedatensatz wurde in Kapitel 5.3.4.2 vorgestellt und weist ähnliche Abstufungen wie bei den Expertinnen und Experten auf. Mithilfe weiterer Varianzanalysen auf dem gemeinsamen Expertise- und Lehrkräftedatensatz konnte aufgeklärt werden, dass die Hauptkategorien 4 (Wechselwirkungen), 5 (Symmetrien) und 7 (Higgs) vom Expertisegremium signifikant höher eingeschätzt werden als von den Lehrkräften, während Hauptkategorie 1b (Kerne und Radioaktivität) von den Lehrkräften höher bewertet wird. Mögliche Interpretationen für die Unterschiede sind vielfältig und ausführlich in Kapitel 5.3.5.1

zusammengefasst. Ein vielversprechender Ansatz für die unterschiedlichen Argumentationsweisen von Expertisegremium und Lehrkräften liegt hierbei in der zentralen Rolle der drei Themen „Wechselwirkungen“, „Symmetrien“ und „Higgs-Boson“ im für die Teilchenphysik so zentralen Standardmodell. Während die Expertinnen und Experten die genannten Themen als sehr relevant einschätzen, könnte der mit den drei Themen jeweilig verbundene Grad an abstraktem theoretischen Formalismus durch die Methoden der Quantenfeldtheorie zu einer niedrigeren Einschätzung der Lehrkräfte bezogen auf ihr eigenes für den Unterricht notwendiges Wissen geführt haben. Auf der anderen Seite finden sich radioaktive Prozesse bereits in den schulischen Physikcurricula, was die höhere Einschätzung des Themas „Kerne und Radioaktivität“ durch die Lehrkräfte erklären könnte.

Ungeachtet der unterschiedlichen Einschätzungen einzelner Hauptkategorien durch Expertisegremium und Lehrkräfte lässt sich jedoch als wesentliches Ergebnis der vorliegenden Arbeit festhalten, dass beide Gremien dieselben 6 Hauptkategorien als signifikant höher bewertet haben als die anderen 5 Hauptkategorien. Zu den TOP-6-Themen zählen die Hauptkategorien (1a) *Materieaufbau*, (1b) *Kerne und Radioaktivität*, (2) *Teilchen*, (4) *Wechselwirkungen*, (6) *Experimentarten* sowie (9) *Kosmologie*. Der Konsens zwischen Expertinnen und Experten sowie Lehrkräften bestätigt die geforderte Relevanz der Themen auch aus einer praxisnahen Unterrichtssicht heraus. Es lässt sich feststellen, dass die TOP-6-Themen im Vergleich zu den restlichen 5 Themen alle von konzeptuellerer Art sind sowie einen höheren Grad an Anschaulichkeit besitzen, während die restlichen Themen einen größeren Anteil an abstraktem theoretischen Formalismus beinhalten.

Zusammengefasst bilden die beschriebenen TOP-6-Themen die gesuchten Subfacetten in der Fachwissensdimension *Inhaltsbereich* aus Abbildung 5.30. Durch verschiedene weitere Varianzanalysen mit Personengruppenvergleichen konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die Relevanz der etablierten fachwissenschaftlichen Themen sowohl aus Sicht aller Berufsgruppen im Expertisegremium als auch aus Sicht von Expertinnen und Experten sowie Lehrkräften mit unterschiedlichen Sozialisierungsländern mit der Teilchenphysik Bestand hat.

Modellierung der Dimension Wissensarten

Die Beantwortung von Forschungsfrage F2 nach dem Aussehen des teilchenphysikalischen Fachwissens in den Wissensarten des deklarativen, prozeduralen und konditionalen Wissens wurde im Anschluss und aufbauend auf den Ergebnissen der

Modellierung der Inhaltsbereiche durchgeführt. Theoriegeleitet wurden hierzu die Definitionen der drei Wissensarten auf die erarbeiteten Beschreibungen der sechs relevantesten Inhaltsbereiche angewandt, um jeden Inhaltsbereich noch einmal getrennt für jede Wissensart zu beschreiben. Die Ausformulierungen der so vordefinierten 18 unterscheidbaren Fachwissensanteile wurde ausführlich in Kapitel 5.4 vorgestellt. Über die Ausformulierung einzelner Fachwissensanteile hinaus stellt die für physikalisches bzw. teilchenphysikalisches Fachwissen spezifisch modellierte Dimension *Wissensarten* ein weiteres zentrales Ergebnis der vorliegenden Arbeit dar. Die Spezifität manifestiert sich in verschiedenen Subkategorien, die innerhalb der drei Wissensarten identifiziert wurden. Deklaratives teilchenphysikalisches Fachwissen umfasst dabei aussagenlogisches Wissen in Form der Subkategorien (1) *Fakten und Sachverhalte*, (2) *Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten* sowie (3) *Begriffe*. Prozedurales teilchenphysikalisches Fachwissen beinhaltet dagegen Wissen über „fachliche“ Handlungen in den Subdimensionen (1) *Wissen über zielgerichtetes experimentieren*, (2) *Wissen über modellieren und mathematisieren* sowie (3) *Wissen über den Erwerb und die Anwendung von Wissen*. Konditionales teilchenphysikalisches Fachwissen enthält schließlich die Subkategorien (1) *Wissen über Begründungen* und (2) *Wissen über Beurteilungen*, jeweils bezogen auf die teilchenphysikalischen Handlungen aus dem prozeduralen Fachwissen.

Finales Modell für das Fachwissen von Lehrkräften

Zusammengefasst konnte die vorliegende Arbeit sowohl durch empirische als auch durch theoriegeleitete Modellierungsansätze die in Abbildung 5.30 angesetzten Fachwissensdimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten* speziell für teilchenphysikalisches Fachwissen von Lehrkräften zu der in Abbildung 5.32 dargestellten Form präzisieren. Neben den erarbeiteten Subfacetten, welche auf den Modellachsen dargestellt sind, wurden die zu den einzelnen Gitterpunkten **D1** bis **D6**, **P1** bis **P6** sowie **K1** bis **K6** in der Darstellung korrespondierenden Fachwissensanteile im Rahmen des Forschungsprojekts ebenfalls ausformuliert und sind ausführlich in den Tabellen 5.15, 5.16, 5.18, 5.19 und 5.20 in Kapitel 5.4 nachzulesen.

Empfehlungen für Lehrkräfteprogramme und Bildungsstandards

Wie in den Kapiteln 5.3.6.1 sowie 5.4.4.1 erläutert, lassen sich die Ergebnisse der Fachwissensmodellierung vorrangig für die strukturelle und inhaltliche Gestaltung von

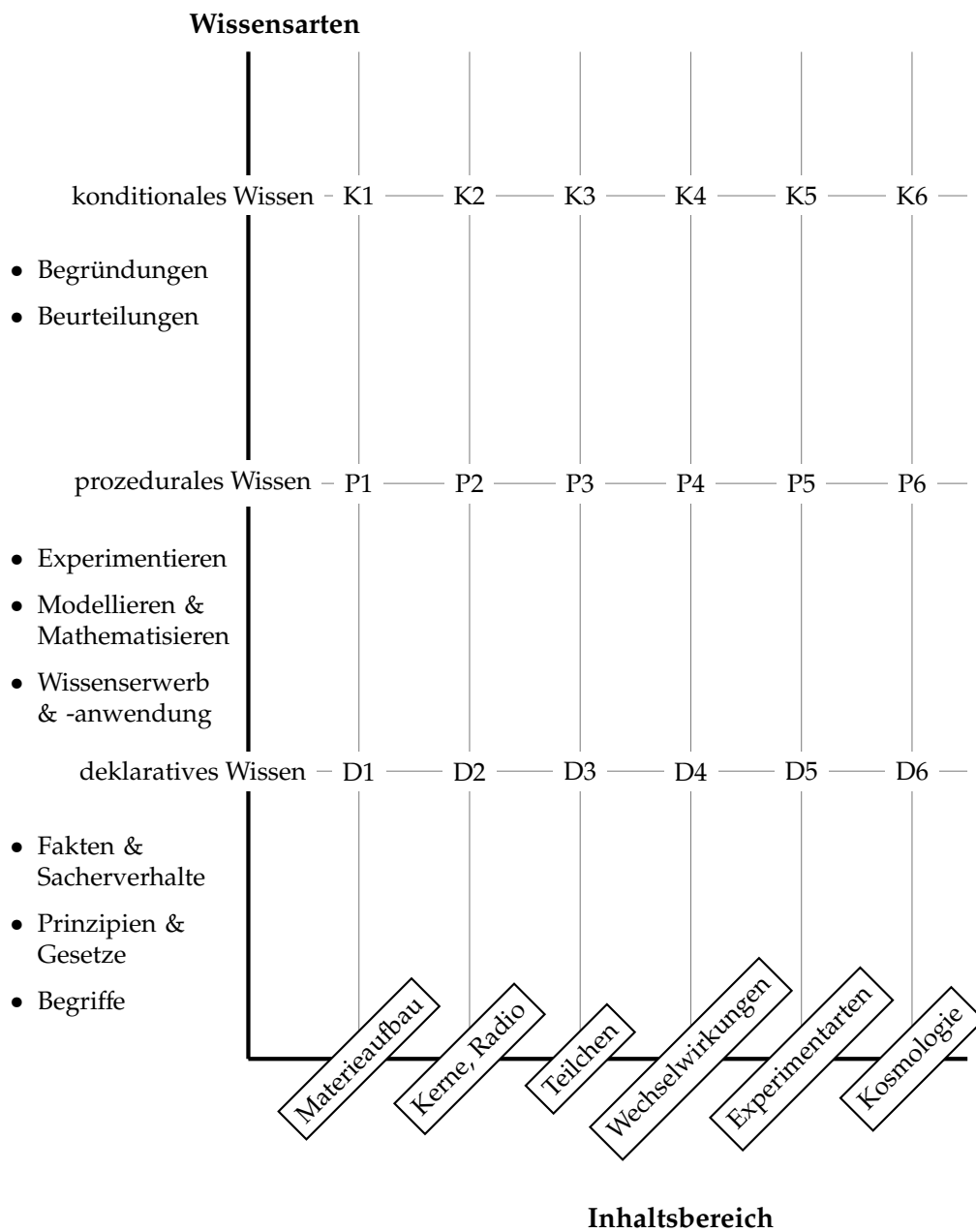


Abbildung 5.32: Final modelliertes Fachwissen von Lehrkräften in der Teilchenphysik in den Dimensionen *Inhaltsbereich* und *Wissensarten*

Lehrkräfteausbildungs- bzw. -fortbildungsprogrammen verwenden. Es empfiehlt sich auf Basis der etablierten teilchenphysikalischen Inhaltsbereiche eine strukturelle Aufteilung in 11 Module, welche sich thematisch mit den 11 etablierten fachwissenschaftlichen Hauptkategorien der vorliegenden Arbeit beschäftigen. Den Umfang der Module betreffend sollte ein Fokus auf den TOP-6-Themen liegen. Inhaltlich empfiehlt sich, dass die Module jeweils die in Runde 2 erarbeiteten fachwissenschaftlichen Unterkategorien abdecken. Neben einer Thematisierung deklarativer Wissensanteile sollten in den Modulen auch die erarbeiteten prozeduralen und konditionalen Wissensanteile jeweils spezifisch für den jeweiligen Inhaltsbereich diskutiert werden, da sie ebenfalls eine wichtige fachliche Voraussetzung für Unterrichtsabläufe und Unterrichtsqualität bilden. Ein Beispielthema, für welches alle Wissensarten für eine hypothetische Lehrkräftefortbildung durchdekliniert wurden, findet sich in Kapitel 5.4.4.1.

Auf der anderen Seite können die Ergebnisse zur Fachwissensmodellierung ebenfalls als Diskussionsgrundlage zur Ausformulierung von Bildungsstandards für die Teilchenphysik verwendet werden, welche einleitend zumindest für Deutschland als eher unzureichend vorgestellt wurden. Hierbei eignen sich die etablierten Inhaltsbereiche insbesondere als eine Auswahl von Themen, die potenziell als fachliche Inhalte in die Standards mitaufgenommen werden könnten. Bei den Wissensarten ließe sich hingegen diskutieren, in wie weit die prozeduralen und konditionalen Wissensanteile als Vorlage für die Kompetenzbereiche Erkenntnisgewinnung und Bewertung dienen könnten. Für eine solche Überführung in Bildungsstandards müsste jedoch noch einmal reflektiert werden, ob und wie sich das modellierte Fachwissen von Lehrkräften von dem durch die Schülerinnen und Schüler zu erreichendem unterscheidet.

Diskussion und Ausblick

Die dargestellten Ergebnisse zur Fachwissensmodellierung sind vor dem Hintergrund verschiedener Limitationen zu sehen, welche einerseits benannt werden müssen und andererseits auch Anlass zu weiteren perspektivischen Untersuchungen bieten.

Zunächst ergaben sich im Verlauf des Forschungsprojekts methodische Limitationen im Zusammenhang mit der Durchführbarkeit der Delphi-Studie, welche ausführlich in Kapitel 4 erläutert wurden. Es wurde insbesondere diskutiert, in wie weit

eine zahlenmäßige Dominanz von verfügbaren Expertinnen und Experten aus dem Bereich der Fachwissenschaft gegenüber den Bereichen Fachdidaktik und Öffentlichkeitsarbeit zu tolerieren ist unter dem Ziel, dennoch repräsentative Ergebnisse der Delphi-Befragungen zu erreichen. Obgleich im vorgestellten Projekt ein praxistauglicher Ansatz gewählt wurde, in welchem der Meinung der schwächer vertretenen Berufsgruppen ein größeres Gewicht gegeben wurde, sollte idealerweise natürlich eine gleichmäßige Besetzung der Gremien angestrebt werden.

Zusätzlich konnte - vermutlich aufgrund des hohen zeitlichen Aufwands für die Teilnehmenden - die Zusammensetzung der Gremien von Runde zu Runde nicht komplett konstant gehalten werden. Einige Expertinnen und Experten stiegen aus dem Prozess aus, während einige andere erst in einer späteren Runde einstiegen. Es zeigte sich jedoch, dass eine Mehrheit von 66 % der Expertinnen und Experten aus dem Gremium der dritten Befragungsrunde auch an den beiden Runden zuvor teilgenommen hatten. Darüber hinaus blieb auch die relative Zusammensetzung der Expertisegremien in Bezug auf ihre Berufsgruppen und Sozialisierungsländer mit der Teilchenphysik konstant, weshalb die Ergebnisse der Delphi-Studie hier in Bezug auf die Konstanz der Gremien als valide angesehen werden können.

Wie schließlich ebenfalls diskutiert, sollten theoretisch für eine Delphi-Studie mit der Ausrichtung Konsensfindung möglichst viele Befragungsrunden angesetzt werden, so dass die Expertinnen und Experten sehr oft die Möglichkeit erhalten, ihre eigene Meinung zu revidieren bzw. anzupassen und dadurch insgesamt das Endergebnis der Delphi-Studie möglichst stark konvergiert. Eine durchgeführte Anzahl von drei Befragungsrunden ist hier optimierbar. Die Teilnehmenden erhielten dennoch zumindest zweimal die Möglichkeit zur Revidierung, was in Anbetracht der zeitlich sehr eingespannten Expertisepopulation als ausreichend angesehen wird.

Zur Diskussion der erzielten Ergebnisse muss betont werden, dass aufgrund des gewählten Fragebogen-Formats bislang keine detaillierten Hintergründe dazu erhoben wurden, aus welchen Gründen die teilnehmenden Expertinnen und Experten sowie Lehrkräfte bestimmte teilchenphysikalische Themen als relevant für das Fachwissen nominiert haben. Der Mangel an Zusatzinformationen wurde insbesondere bei der Diskussion der Unterschiede in den Relevanzeinschätzungen derselben Themen durch Expertisegremium und Lehrkräfte deutlich. Die dargestellten Interpretationen zur Argumentationsweise der beiden Personengruppen sind hier nur als Hypothesen zu verstehen, welche durch weitere Studien bestätigt oder widerlegt werden müssen. Hierzu würden sich beispielsweise Follow-Up-Interviews mit den Teilnehmenden anbieten.

Die in der Arbeit angesetzte und untersuchte Fachwissensmodellierung ist über die verwendete Methodik hinaus auch auf theoretischer Ebene in verschiedenen Punkten in Bezug auf das verwendete Strukturmodell unvollständig bzw. erweiterbar. Als Ziel der vorgestellten Modellierung sollte der für Lehrkräfte relevante Ausschnitt des Fachwissens von Teilchenphysikexpertinnen und -experten abgebildet werden. Wie in Kapitel 1 beschrieben ist aus der Expertiseforschung bekannt, dass das Expertisewissen hierarchisch um wenige zentrale Schlüsselkonzepte organisiert ist, die miteinander in propositionaler Verbindung stehen. In der vorliegenden Arbeit wurde jedoch zunächst im Rahmen der Modellierung teilchenphysikalischer Inhaltsbereiche lediglich eine Identifikation von distinktiven Fachwissenskategorien erzielt, welche den Schlüsselkonzepten bzw. *Big Ideas* der Teilchenphysik entspringen. Um das Expertisewissen vollständig abzubilden, müssten zukünftig noch zusätzlich die Verbindungen rekonstruiert werden, welche die Expertinnen und Experten zwischen den einzelnen Schlüsselkonzepten sehen. Zur Erhebung und Rekonstruktion solcher Wissensnetzwerke bietet sich beispielsweise die Methode des *Concept Mapping* (engl. *concept map*, dt. Konzeptkarte) an. Hierbei ordnen die Teilnehmenden vorgegebene Begriffe wie Schlüsselkonzepte auf einer Karte an und veranschaulichen die proportionalen Beziehungen, welche sie zwischen den Konzepten sehen mithilfe beschrifteter Pfeile. Ein Beispiel für einen Ausschnitt einer solchen *Concept Map* eines Teilchenphysikexperten ist in Abbildung 5.33 dargestellt.

Des Weiteren wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich derjenige Teil des Fachwissens von Lehrkräften modelliert, welcher auf dem in der Theorie angesiedelten Forschungszweig „bisherige Erkenntnisse und aktueller Wissensstand“ basiert. Für ein vollständiges, auf die Teilchenphysik bezogenes, Fachwissen müssen Lehrkräfte darüber hinaus auch Kenntnisse zu den relevanten Inhaltsbereichen in den beiden anderen in Kapitel 2 beschriebenen Forschungszweigen der Teilchenphysik - „experimentelle Forschungsmethoden“ sowie „Spin-offs: Technologietransfer der Teilchenphysik“ - besitzen. Zur Umsetzung wäre hier eine erneute Delphi-Studie zur Modellierung vorstellbar.

Perspektivisch sollte außerdem das verwendete Strukturmodell für das Fachwissen von Lehrkräften auf die zusätzlichen, in Kapitel 1 vorgestellten, bekannten Fachwissensdimensionen erweitert werden. Insbesondere könnte eine Modellierung der Dimension *Wissensstufen* weitere Aufschlüsse dazu geben, auf welchem Niveau bzw. in welcher Tiefe und Breite Lehrkräfte Fachwissen in den erarbeiteten Inhaltsbereichen benötigen. Methodisch könnten hierzu unter anderem die modellierten Fachwissensanteile durch Expertinnen und Experten auf ihre Schwierigkeit hin ein-

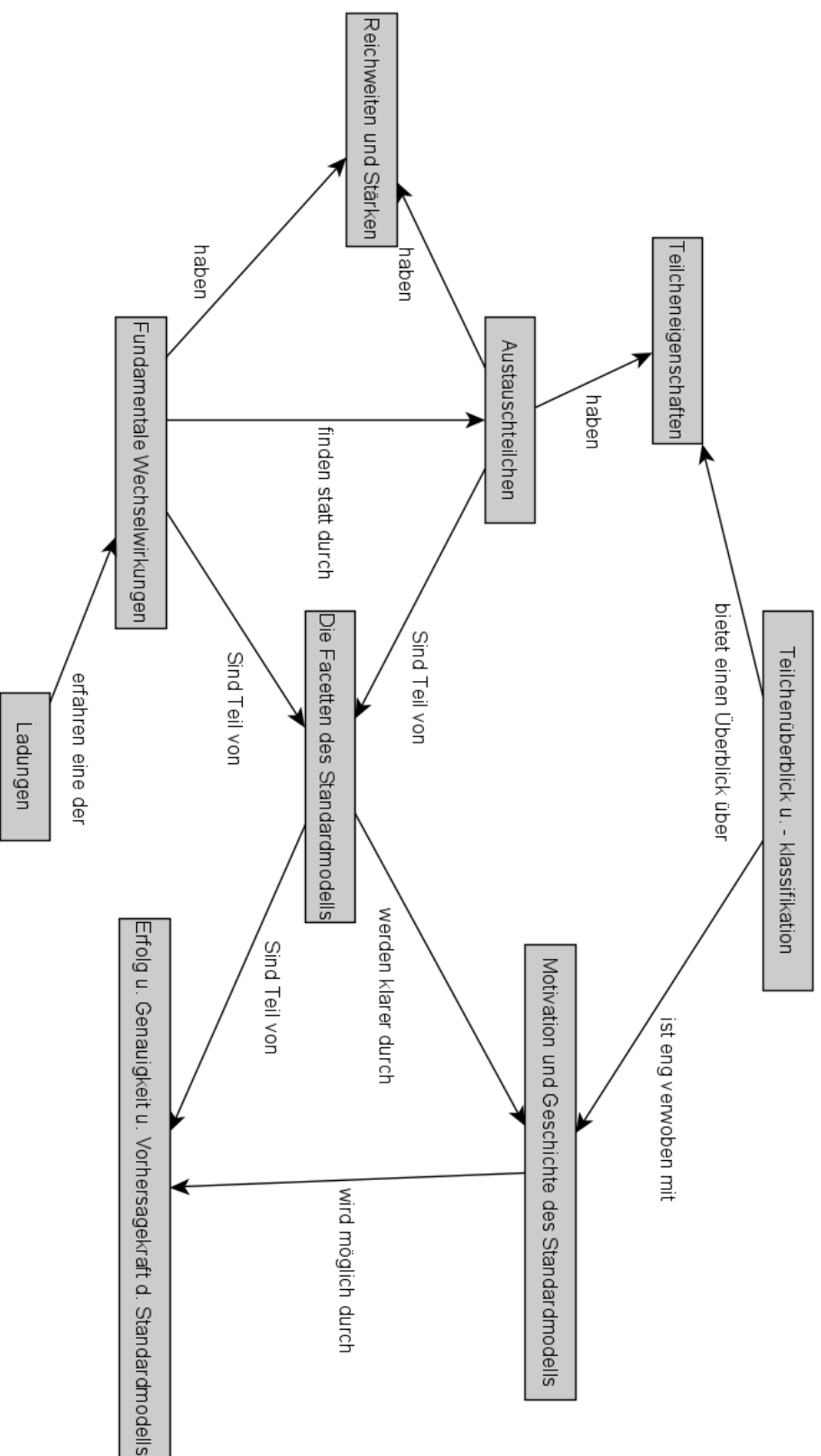


Abbildung 5.33: Beispielausschnitt einer *Concept Map* eines Teilchenphysikexperten

geschätzt und noch einmal konkret für ein von Lehrkräften zu erreichendes Niveau formuliert werden.

Abschließend muss noch einmal festgehalten werden, dass das hier modellierte Fachwissen zwar eine wichtige Grundlage für Lehrkräfte bildet, um Teilchenphysik zu unterrichten. Fachwissen stellt jedoch andererseits nur eine von mehreren Dimensionen des Professionswissens von Lehrkräften dar (siehe Kapitel 1). Um daher zukünftig geeignete Lehrkräftebildungsmaßnahmen konzipieren zu können, welche an den für den Unterricht zu erwartenden praktischen Nutzen anderer physikalischer Domänen heranreichen, muss in jedem Fall auch die Dimension des fachdidaktischen Wissens für die Teilchenphysik in Bezug auf das hier modellierte Fachwissen untersucht und beschrieben werden. Nach der ursprünglichen Definition von Shulman (1986) muss hierbei reflektiert werden, welches spezielle Wissen über Methoden und Strategien zur adressatengerechten Darstellung und Formulierung von Inhalten speziell für die teilchenphysikalischen Themen von den Lehrkräften für den Unterricht benötigt werden.

Zusammenfassend wurde mit der Arbeit ein Modell für das Fachwissen von Lehrkräften in der Teilchenphysik geschaffen, auf dem in weiteren Studien aufgebaut werden kann.

Teil V

Anhang

A

Fachwissenschaftliche Kategorien in den Befragungsrunden

A.1 Runde 2: Kategorienbeschreibungen

Bezeichnung	Titel	Zusatzinformationen
K1	Die Struktur der Materie	Untersuchungen/Entdeckungen und Wissen über die Struktur bzw. den Aufbau der Materie
K1.1	Materieaufbau	Wissen über den Materieaufbau/ die Struktur der Materie : * aus den verschiedenen Bausteinen * auf verschiedenen Ebenen: molekularer, atomarer, subatomarer
K1.2	Eigenschaften, Entdeckungen, Beziehungen von Bausteinen	Beschreibung von Eigenschaften oder Entdeckungen <u>einzelner Materiebausteine</u> sowie die <u>Beziehung zwischen Materiebausteinen</u>
K1.3	Kernphysik, Radioaktivität	Kernphysikgrundlagen sowie speziell Radioaktivität
K1.4	Historische Entdeckungen zum Materieaufbau	Historische Entwicklung des Kenntnisstandes über die Struktur der Materie sowie die Hauptentdeckungen
K1.5	Antimaterie	Wissen über Aufbau, Eigenschaften sowie Entdeckungen von Antimaterie
K2	Teilchen in der Hochenergiephysik	Die Elementarteilchen sowie aus diesen zusammengesetzte Teilchen. (Historische und moderne Verwendung des Begriffs "elementar")
K2.1	Überblick und Teilchenklassifikation	Überblick bezieht sich auf die Frage: Welche gibt es? Klassifikationen sind z.B. Fermionen und Bosonen, Leptonen und Quarks, Einteilung der Fermionen in 3 Generationen, ...
K2.2	Teilchenentdeckungen	Bemerkung: Auch Entdeckungen von historisch als "elementar" angesehenen Teilchen
K2.3	Teilcheneigenschaften	Unter anderem: Masse, Lebensdauer, Ladungen und andere Quantenzahlen
K2.4	Antiteilchen	Konzept, Eigenschaften, Entdeckungen
K2.5	Zusammengesetzte Teilchen und ihr Aufbau	Beispiele zusammengesetzter Teilchen sind Hadronen, Baryonen und Mesonen, ... Ein Beispiel zum Aufbau ist das Quarkmodell.
K3	SRT und QM mit Bezug zur Teilchenphysik; QFT	Der Teilchenphysik zugrundeliegende Konzepte aus der speziellen Relativitätstheorie sowie aus der Quantenmechanik; Quantenfeldtheorie
K3.1	Grundlagen aus der Speziellen Relativitätstheorie	Beispiele sind Relativistische Masse, Einsteins Energie-Impuls-Beziehung.
K3.2	Grundlagen aus der Quantenmechanik	Beispiele sind Quantenzahlen für Spin etc.
K3.3	Quantenfeldtheorie	Beispiele sind der quantisierte Feldbegriff, Dirac-Gleichung, QED, QCD,
K4	Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte	Die fundamentalen Wechselwirkungen bzw. Kräfte
K4.1	Die fundamentalen Wechselwirkungen	Überblick: Welche fundamentalen Wechselwirkungen/Kräfte gibt es? Welche Teilchen nehmen daran teil?
K4.2	Austauschteilchen	Konzept von (Vektor-) Bosonen als Austausch- bzw. Botenteilchen

Bezeichnung	Titel	Zusatzinformationen
K4.3	Ladungen	Zusammenhang von Wechselwirkungen zu Ladungen der an der WW teilnehmenden Elementarteilchen
K4.4	Reichweiten und Stärken	Reichweiten und Stärken fundamentaler Kräfte
K4.5	Zusammenhang zu bekannten Wechselwirkungen/Kräften	Zurückführung (in der Schule) bereits bekannter Phänomene/physikalischer Gesetze auf die fundamentalen Kräfte bzw. Wechselwirkungen. Beispiele: Gravitation und elektromagnetische Kraft als die bereits bekannten makroskopischen Kräfte; Schwache Wechselwirkung <-> Radioaktiver Betazerfall, Kernfusion; Starke Wechselwirkung <-> Zusammenhalt der Nukleonen im Atomkern
K5	Symmetrien und Erhaltungsgrößen	Symmetrie als Invarianz physikalischer Gesetze/Phänomene unter gewissen Transformationen und die damit zusammenhängenden Erhaltungsgrößen
K5.1	Symmetrien	Definition (mit Beispielen) der Symmetrie als Invarianz einer Wechselwirkung (gleichbleibende Form der physikalischen Gesetze/Phänomene) unter gewissen Transformationen. Beispiele für Transformation: Diskrete Transformationen (Paritätsumkehr, Ladungskonjugation, Zeitumkehr) und Kontinuierliche Transformationen (Lorentz-Transformation, Eichsymmetrien)
K5.2	Erhaltungssätze und Erhaltungsgrößen	Beispiele sind Ladung, (Dreh-) Impuls, Energie, Farbe, Isospin, Flavour, Baryonenzahl, Leptonenzahl, Eigenwerte zu C-, P-Transformationen
K5.3	Zusammenhang von Symmetrien zu Erhaltungsgrößen	Hauptsächlich Noethertheorem
K5.4	Symmetrieverletzung	Beschreibung und Ursachen von Wechselwirkungen mit verletzter Symmetrie
K6	Teilcheninteraktionen und zerfälle	Die den Experimenten in der Kern- und Teilchenphysik zugrundeliegenden Teilcheninteraktionen: Streuprozesse und Spektroskopie
K6.1	Arten von Experimenten	Grundlegende Beschreibung, Ziele, sowie Unterschiede zwischen Streu-experimenten (z.B. Fixed-Target, Collider) und spektroskopischen Experimenten (Fokus auf Zerfallsprodukten angeregter Zustände)
K6.2	Basisprozesse in der Feynman-Darstellung	Aufstellung und Beschreibung möglicher Basisteilcheninteraktionen zu einem bestimmten Set von Eingangs- und/oder Ausgangsteilchen - eingeschlossen das Konzept von Teilchen in virtuellen Zuständen - anhand der graphischen Feynmandarstellung (Feynman-Diagramme). Eventuell auch prozesse höherer Ordnung im Sinne einer Störungsreihe
K7	Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson	Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson
K7.1	Higgs-Mechanismus	Motivation und Idee des Higgs-Mechanismus als Ursprung der Teilchenmassen

A Fachwissenschaftliche Kategorien in den Befragungsrunden

Bezeichnung	Titel	Zusatzinformationen
K7.2	Higgs-Boson	Theoretische Vorhersagen, die Suche und die Entdeckung des Higgs-Bosons
K8	Das Standardmodell der Teilchenphysik	Das Standardmodell der Teilchenphysik
K8.1	Das Modell mit seinen Facetten und Aspekten	Facetten und Aspekte sind u.a. Teilcheninhalt, Fundamentale Prozesse und ihr Zusammenhang zu Ladungen, Bosonische Austauschteilchen, gemeinsame Beschreibung der Wechselwirkungen mithilfe renormalisierbarer Eichtheorien
K8.2	Motivation und Geschichte	Motivation für und die Geschichte von der Entwicklung des Standardmodells
K8.3	Erfolg, Genauigkeit und Vorhersagekraft	Erfolge, Genauigkeit und Vorhersagekraft des Standardmodells
K8.4	Vollständigkeit	Wie vollständig ist das aktuelle Standardmodell? Beschreibung von möglichen Erweiterungstheorien
K9	Kosmologie und kosmische Strahlung; ART	Kosmologie als Forschung zum Ursprung, der Entwicklung und der heutigen Struktur des Universums und die Rolle der (Astro-) Teilchenphysik darin; ausgewählte Zusammenhänge zur Allgemeinen Relativitätstheorie
K9.1	Kosmologie - Ursprung und Entwicklung des Universums	Aspekte sind zum Beispiel das Urknallmodell, das "Standardmodell der Kosmologie", Thermische Entwicklung und Beschleunigte Expansion des Universums, Mikrowellenhintergrund (CMB)
K9.2	Entstehung von Strukturen im Universum	Entstehung von Elementen (Nucleosynthese), von Galaxien, Erzeugung und Vernichtung von Sternen
K9.3	Strahlung aus dem Weltraum - Neutrinos, Photonen, Kosmische Strahlung	Erkenntnisse aus und über Multimessenger-Signale aus dem Weltraum in Form von Teilchen(strahlen). Beispiele sind Neutrinos, Photonen, kosmische Strahlung (Myonen, Pionen, ...)
K9.4	Gravitationswellen	Erkenntnisse aus und über Multimessenger-Signale aus dem Weltraum in Form von Gravitationswellen
K10	Offene Fragen und theoretische Hypothesen	Offene Fragen und Problemstellungen aktueller Forschungsergebnisse bzw. sowie verfügbare theoretische Lösungsansätze
K10.1	Belegtes Problem im SM - Neutrino-Eigenschaften	Weshalb gibt es die (durch die Neutrinoszillationen nachgewiesenen) Unterschiede in den Neutrinomassen? Sind sie damit wirklich und falls ja warum von Null verschieden? Weiterführende Frage: Sind Neutrinos eventuell doch ihre eigenen Antiteilchen (und damit eventuell doch ein Majorana-Teilchen und kein Dirac-Teilchen)?
K10.2	Belegtes Problem im SM - Baryogenese	Warum herrscht im Universum eine Asymmetrie zwischen dem Baryonen- und dem Antibaryoneninhalt (Baryogenese, die vor der primordialen Nucleosynthese stattfand)?
K10.3	Belegtes Problem im SM - Dunkle Materie und Dunkle Energie	Was ist Dunkle Materie und was ist Dunkle Energie?

Bezeichnung	Titel	Zusatzinformationen
K10.4	Theoretischer Lösungswunsch - Grund für Größe der Fermionmassen	Nach welchem Gesetz haben Fermionen genau diese ihre Masse?
K10.5	Theoretischer Lösungswunsch - Hierarchieproblem(e)	Weshalb ist die (Kopplungs-) Stärke der fundamentalen Wechselwirkungen bei geringen Energien so unterschiedlich groß (insbesondere zwischen Gravitation und elektroschwacher WW sowie zwischen elektroschwacher und starker WW)?
K10.6	Theoretischer Lösungswunsch - Vereinigung der Wechselwirkungen	Gibt es eine Theorie, die die fundamentalen Wechselwirkungen als Ausprägungen einer einzigen vereinheitlichten Wechselwirkung beschreiben kann? Beispiel: GUT (<i>Grand Unified Theory</i>)
K10.7	Erweiterte theoretische Modelle	Erweiterte Modell bzw. Lösungsansätze, die jeweils versuchen, möglichst viele der ungelösten Fragen im derzeitigen Standardmodell zu beantworten. <u>Beispiele:</u> Stringtheorie (Alternative zum Konzept der Elementarteilchen) , Supersymmetrie (Theorie der Superpartner von Teilchen, bei denen sich Bosonen und Fermionen ineinander umwandeln können)

A.2 Runde 3: Kategorienbeschreibungen

Bezeichnung	Titel	Zusatzinformationen
K1	Die Struktur der Materie	Untersuchungen/Entdeckungen und Wissen über die Struktur bzw. den Aufbau der uns umgebenden Materie
K1.1	Materieaufbau - vom Molekül bis zum Quark	1) Heutiges Wissen über den Materieaufbau bzw. die Struktur der Materie : * aus den verschiedenen Bausteinen * auf verschiedenen Ebenen: molekularer, atomarer, subatomarer 2) Untersuchungsmethoden zur Struktur der Materie (eingeschlossen Grundlagen aus der Atomphysik wie Spektroskopie und Energieniveaus) 3) Besondere Entdeckungen in der historischen Entwicklung des Kenntnisstandes zur Struktur der Materie (z.B. Rutherford)
K1.2	Eigenschaften und Beziehungen von Materiebausteinen	Beschreibung von Eigenschaften <u>einzelner Materiebausteine</u> sowie die <u>Beziehung zwischen Materiebausteinen</u>
K1.3	Kernphysik und Radioaktivität auf Teilchenebene	Kernphysikgrundlagen sowie speziell Radioaktivität mit Bezug zur Teilchenphysik (z.B. der Beta-Zerfall auf Elementarteilchenebene)
K2	Teilchen in der Hochenergiephysik	Die Elementarteilchen sowie aus diesen zusammengesetzte Teilchen. (Historische und moderne Verwendung des Begriffs "elementar")
K2.1	Überblick und Teilchenklassifikation	Überblick bezieht sich auf die Frage: Welche gibt es? Klassifikationen sind z.B. Fermionen und Bosonen, Leptonen und Quarks, Einteilung der Fermionen in 3 Generationen, ...
K2.2	Besondere Teilchenentdeckungen und -suchen	Teilchenentdeckungen von besonderer Bedeutung (Meilensteine) sowie ausgewählte Suchen von bisher nur theoretisch vorhergesagten Teilchen.
K2.3	Teilcheneigenschaften	Unter anderem: Masse, Lebensdauer, Ladungen und andere Quantenzahlen
K2.4	Antiteilchen und Antimaterie	Das Konzept, die Eigenschaften und die Entdeckungen von Antiteilchen sowie Wissen über Aufbau, Eigenschaften und Entdeckungen bzw. Produktion von Antimaterie
K2.5	Zusammengesetzte Teilchen und ihr Aufbau	Beispiele zusammengesetzter Teilchen sind Hadronen, Baryonen und Mesonen, ... Ein Beispiel zum Aufbau ist das Quarkmodell.
K3	SRT und QM in der Teilchenphysik; QFT	Der Teilchenphysik zugrundeliegende Konzepte aus der speziellen Relativitätstheorie sowie aus der Quantenmechanik; Quantenfeldtheorie inklusive Feynman-Darstellung
K3.1	Grundlagen zur Teilchenphysik aus der Speziellen Relativitätstheorie	Grundlagen aus der Speziellen Relativitätstheorie, auf der die moderne Teilchenphysik (insb. die Quantenfeldtheorie) basiert. Beispiele sind Einsteins Energie-Impuls-Beziehung, Relativistische Masse sowie insbesondere Konzeptuelle Betrachtungen zu Bezugssystemen

Bezeichnung	Titel	Zusatzinformationen
K3.2	Grundlagen zur Teilchenphysik aus der Quantenmechanik	Grundlagen aus der Quantenmechanik, auf der die moderne Teilchenphysik (insb. die Quantenfeldtheorie) basiert. Beispiele sind die Energiequantisierung und die Rolle von Wahrscheinlichkeiten
K3.3	Elemente der Quantenfeldtheorie; Feynman	1) Spezielle Begriffe bzw. Konzepte aus der Quantenfeldtheorie, die <u>besonders grundlegend und einfach</u> oder aber <u>sehr populär</u> sind. Beispiele sind das Konzept quantisierter Felder und die Lagrange-Dichte des Standardmodells 2) Die Feynman-Darstellung als eine "Visualisierung" der in der QFT gemeinsam beschriebenen Teilchen und Felder. Zusammenhang zu Kategorie 4 (Wechselwirkungen) sind die Basisprozesse in der Feynman-Darstellung: Aufstellung und Beschreibung möglicher Basisteilcheninteraktionen zu einem bestimmten Set von Eingangs- und/oder Ausgangsteilchen - eingeschlossen das Konzept von Teilchen in virtuellen Zuständen.
K4	Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte	Die fundamentalen Wechselwirkungen bzw. Kräfte
K4.1	Die fundamentalen Wechselwirkungen	1) Überblick: Welche fundamentalen Wechselwirkungen/Kräfte gibt es? Welche Teilchen nehmen daran teil? Eingeschlossen sind hier auch die Wechselwirkungen von Austauschteilchen mit sich selbst. 2) Den Wechselwirkungen zugrundeliegende Basisprozesse in der Feynman-Darstellung: Aufstellung und Beschreibung möglicher Basisteilcheninteraktionen zu einem bestimmten Set von Eingangs- und/oder Ausgangsteilchen. 3) Symmetrien als Basis der Wechselwirkungen
K4.2	Austauschteilchen	Konzept von (Vektor-) Bosonen als Austausch- bzw. Botenteilchen
K4.3	Ladungen	Zusammenhang zwischen Wechselwirkungen und Ladungen der an der WW teilnehmenden Elementarteilchen
K4.4	Reichweiten und Stärken von Wechselwirkungen	Die Reichweiten und Stärken der fundamentalen Wechselwirkungen/Kräfte sowie der Zusammenhang zur Masse der Austauschteilchen. Ebenfalls die Energieabhängigkeit der Kopplungsstärken und das Phänomen des Quark-Confinement.
K4.5	Zusammenhang fundamentaler Wechselwirkungen zu makroskopischen Kräften	Zurückführung (in der Schule) bereits bekannter Phänomene/physikalischer Gesetze auf die fundamentalen Kräfte bzw. Wechselwirkungen. Beispiele: Gravitation und elektromagnetische Kraft als die bereits bekannten makroskopischen Kräfte; Schwache Wechselwirkung <-> radioaktiver Betazerfall, Kernfusion; Starke Wechselwirkung <-> Zusammenhalt der Nukleonen im Atomkern

A Fachwissenschaftliche Kategorien in den Befragungsrunden

Bezeichnung	Titel	Zusatzinformationen
K5	Symmetrien und Erhaltungsgrößen	Symmetrie als Invarianz physikalischer Gesetze/Phänomene unter gewissen Transformationen und die damit zusammenhängenden Erhaltungsgrößen
K5.1	Symmetrien	1) Definition (mit Beispielen) der " <u>physikalischen</u> " <u>Symmetrie</u> als Invarianz einer Wechselwirkung (gleichbleibende Form der physikalischen Gesetze/Phänomene) unter gewissen Transformationen. Beispiele für Transformation: Diskrete Transformationen (Paritätsumkehr, Ladungskonjugation, Zeitumkehr) und Kontinuierliche Transformationen (Lorentz-Transformation, Eichsymmetrien) 2) Vergleich/Zusammenhang (soweit vorhanden) zu Symmetrien im Alltag (z.B. Achsensymmetrie etc..). 3) Thematisierung, dass manche physikalische Symmetrien nicht anschaulich vorstellbar, sondern nur formal nachvollziehbar sind (z.B. Isospin).
K5.2	Erhaltungssätze und Erhaltungsgrößen	Beispiele sind Ladung, (Dreh-) Impuls, Energie, Farbe, Isospin, Flavour, Baryonenzahl, Leptonenzahl, Eigenwerte zu C-, P-Transformationen
K5.3	Zusammenhang von Symmetrien zu Erhaltungsgrößen	Noethertheorem
K5.4	Symmetrieverletzung und nicht-erhaltene Quantenzahlen	1) Beschreibung und Ursachen von Wechselwirkungen mit verletzter Symmetrie 2) Betrachtung von Größen, die nicht in allen Prozessen erhalten sind, z.B. die Strangeness S, die in der Schwachen WW nicht erhalten bleiben muss
K6	Arten von Experimenten	Experimente in der Kern- und Teilchenphysik aufgeteilt nach verschiedenen interessierenden Prozessen im Wechselwirkungspunkt
K6.1	Streuexperimente	Grundlegende Beschreibung des Aufbaus, der Ziele und der Unterschiede von Streuexperimenten (Fixed-Target, Collider) sowie insbesondere die Aufstellung und Beschreibung (Feynman) der dazugehörigen möglichen Streuprozesse auf Teilchenebene im Wechselwirkungspunkt
K6.2	Untersuchung von Zerfällen	Experimente mit bzw. das Vorkommen von verschiedenen Teilchenzerfällen in der Natur und wie diese als Wechselwirkungen auf Teilchenebene (mittels Feynman) beschrieben werden können. Ebenfalls: Messung von Lebensdauer, Zerfallsbreite, Verzweungsverhältnissen und der Zusammenhang dieser Größen.
K6.3	Spektroskopie von Bindungszuständen	Aufbau und Ziele von Spektroskopischen Experimenten (Fokus auf Zerfallsprodukte angeregter Zustände, Messung von Energieniveaus) und insbesondere die Beschreibung der Prozesse auf Teilchenebene

Bezeichnung	Titel	Zusatzinformationen
K7	Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson	Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson
K7.1	Spontane Symmetriebrechung/Verstärkte Symmetrie	Definition und Einführung in das Konzept der Symmetriebrechung als ein Übergang eines Zustands höherer zu einem Zustand niedriger Symmetrie. Insbesondere: Spontane versus explizite Symmetriebrechung; Symmetrie des Gesetzes und des Grundzustands/Vakuums; Wahl eines entarteten Grundzustands
K7.2	Higgs-Mechanismus: Theorie und Vorhersage	Theorie des Higgs-Mechanismus als Ursprung der Elementarteilchenmassen und die Vorhersage des Higgs-Bosons. Unterscheidung von Higgs-Feld, Higgs-Kondensat (Vakuumerwartungswert) und Higgs-Boson als Anregung des Felds.
K7.3	Higgs-Boson: Phänomenologie, Suche und Nachweis	Die Phänomenologie (die Produktions- und Zerfallskanäle), die Suche nach und der Nachweis des Higgs-Bosons
K8	Das Standardmodell der Teilchenphysik	Das Standardmodell der Teilchenphysik
K8.1	Die verschiedenen Facetten des Modells	Facetten und Aspekte sind u.a. Teilcheninhalt, fundamentale Prozesse und ihr Zusammenhang zu Ladungen, bosonische Austauschteilchen, gemeinsame Beschreibung der Wechselwirkungen mithilfe renormierbarer Eichtheorien
K8.2	Motivation für und Geschichte des Standardmodells	Motivation für und die Geschichte von der Entwicklung des Standardmodells
K8.3	Erfolg, Genauigkeit und Vorhersagekraft des Standardmodells	Erfolge, Genauigkeit (qualitative) und Vorhersagekraft des Standardmodells
K9	Teilchenphysik in der Kosmologie	Der Beitrag der (Astro-) Teilchenphysik in der Kosmologie. Kosmologie als Forschung zum Ursprung, der Entwicklung und der heutigen Struktur des Universums.
K9.1	Ursprung und Entwicklung des Universums	Die Rolle der Teilchenphysik bei der Erforschung des Ursprungs und der Entwicklung unserer Universums. Aspekte sind u.a.: Urknallmodell, das Standardmodell der Kosmologie, Thermische Entwicklung und Beschleunigte Expansion, Entstehung von Elementen (Nucleosynthese), von Galaxien, Erzeugung und Vernichtung von Sternen
K9.2	Heutige Struktur des Universums	Die heutige Struktur des Universums auf Teilchenebene. Aspekte sind u.a.: Baryoneninhalt, Mikrowellenhintergrund (CMB).

Bezeichnung	Titel	Zusatzinformationen
K10	Offene Fragen der Teilchenphysik	Offene Fragen und Problemstellungen aktueller Forschungsergebnisse
K10.1	Beobachtete Neutrino-Eigenschaften	Fragen zur durch die Neutrino-Oszillationen nachgewiesenen Unterschiede in den Neutrinomassen: Sind alle 3 Neutrinos massiv? Was ist die absolute Massenskala bzw. was die Masse des leichtesten Neutrino? Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen (d.h. Majorana-Teilchen oder doch Dirac-Teilchen wie z.B. das Elektron)? Wie lassen sich die Massen in Erweiterungen des Standardmodells beschreiben?
K10.2	Beobachtete Materie-Antimaterie-Asymmetrie	Größe des Ungleichgewichts zwischen Materie- und Antimaterieinhalt des Universums. Sacharovbedingungen zur Erklärung der Asymmetrie
K10.3	Beobachtete Dunkle Materie und Dunkle Energie	Evidenz für Dunkle Materie und Dunkle Energie; Kandidaten für Dunkle Materie: WIMPs, Axionen, Neutrinos, primordiale Schwarze Löcher ...
K10.4	Theoretischer Wunsch: Vereinigung der Kräfte	Gibt es eine Theorie, die die fundamentalen Wechselwirkungen als Ausprägungen einer einzigen vereinheitlichten Wechselwirkung mit energieabhängigen Kopplungen beschreiben kann?

Auswertungsdokumentation

B.1 Runde 1: Kodierleitfaden

Kodierleitfaden zur Erstellung eines Kategoriensystems in Runde 1

Allgemeine Kodierregeln:

- Kodiereinheit: Es werden nur ganze Nennungen kodiert, aber als Auswahlkriterium für die Zuweisung eines Codes gilt auch nur ein Teil einer Nennung -> Als Folge kann eine Kodiereinheit gleichzeitig mehreren Kategorien zugeordnet werden
- Erklärungen in Klammern machen nur den Zusammenhang klar und tragen nicht allein zu einer Kodierung bei
- Besonderes Augenmerk ist auf die genannten Begriffe „Ladung“ und „Quantenzahlen“ zu richten:
 - ➔ Ladungen werden als Teilcheneigenschaft und als Einzelnennung mit K2, als Größe, an die Wechselwirkungen koppeln (z.B. unter dem Begriff „Farbladung“) mit K4 und als Erhaltungsgröße mit K5 kodiert
 - ➔ Quantenzahlen werden als Teilcheneigenschaft mit K2, als quantenmechanisches Konzept (z.B. mit dem Zusatz Eigenwerte) und als Einzelnennung mit K3 und als Erhaltungsgröße mit K5 kodiert
- Jede der Kategorien K1 bis K10 enthält gewisse Unterkategorien. Diese sind im folgenden Leitfaden jeweils mit Kx.y markiert (z.B. K1.1). Für die Zuweisung der Unterkategorien gilt: Generell ist der Wunsch, allen Nennungen neben einer Haupt- auch einer Unterkategorie zuzuordnen. Dies ist jedoch eventuell nicht immer möglich bei sehr allgemeinen Äußerungen. Zu beachten ist: Nicht jede Nennung, die einer Hauptkategorie zugeordnet ist, muss auch zwingend einer Unterkategorie zugeordnet werden. Jedoch muss jede Nennung, die einer Unterkategorie zugeordnet wird, zuvor auch der passenden Hauptkategorie zugeordnet worden sein.

Kategorienüberblick Hauptkategorien:

K1	<u>Struktur der Materie</u>
K2	<u>Teilchen in der Hochenergiephysik</u>
K3	<u>SRT und QM mit Bezug zur Teilchenphysik, QFT</u>
K4	<u>Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte</u>
K5	<u>Symmetrien und Erhaltungsgrößen</u>
K6	<u>Teilchenzerfälle und -interaktionen</u>
K7	<u>Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson</u>
K8	<u>Das Standardmodell</u>
K9	<u>Kosmologie und kosmische Strahlung, ART</u>
K10	<u>Offene Fragen und theoretische Hypothesen</u>

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K1: Struktur der Materie	Untersuchungen/ Entdeckungen und Wissen über die Struktur bzw. den Aufbau der uns umgebenden Materie K1.1: Allgemeiner Materieaufbau/-struktur evtl. aus den Bausteinen und evtl. <u>auf verschiedenen Ebenen</u>: molekularer, atomarer, subatomarer K1.2: Beschreibung von Eigenschaften oder Entdeckungen <u>einzelner Bausteine</u> sowie die <u>Beziehung zwischen Bausteinen</u>, solange der Bezug zum Materieaufbau erkennbar ist. K1.3: Kernphysikgrundlagen sowie Radioaktivität K1.4: Historische Entdeckungen/ Kenntnisstände zum Materieaufbau K1.5: Antimaterie	<u>Ankerbeispiele:</u> • <i>Aufbau der Materie</i> • <i>Struktur der Materie</i> • <i>Bausteine der Welt</i> • <i>Aufbau des Atomkerns aus Protonen u. Neutronen → Aufbau dieser aus Quarks</i> • <i>Bohrsches Atommodell</i> <u>Gegenbeispiel:</u> <i>Elektron</i>	1. „Aufbau der Materie“ wird synonym mit „Struktur der Materie“ verwendet (engl. nur <i>structure</i>) 2. Die Antwort muss das Wort Materie (bzw. Welt) direkt enthalten oder alternativ mind. einen der folgenden Bestandteile: Molekül, Atom, (Atom)kern, Nukleus. Bei der Erwähnung von Materiebestandteilen auf subatomarer Ebene (Proton, Neutron, Quark, Elektron, Lepton) muss jedoch ein klarer Bezug zur Materie erkennbar sein, nicht nur eine isolierte Nennung der Bestandteile. 3. Dunkle Materie zählt nicht in diese Kategorie, Antimaterie jedoch schon (nicht jedoch: Antiteilchen)	Für K1: <u>Berger Kap. 1.1:</u> „Strukturen der Materie“ (Teilchen und Kräfte, Abstands- und Energieskalen) Für K1.1: <u>Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 1.1:</u> „Grundbausteine der Materie“ Für K1.2 und K1.3: <u>Povh, Rith, Scholz, Zetsche Teil I:</u> „Bausteine der Materie“ (u.a. Das Atom und seine Bausteine, Nuklide, Stabilität der Kerne) Für K1.4: <u>Demtröder Kap.1.2:</u> „Historische Entwicklung der Kern- und Elementarteilchenphysik“ Für K1.5: <u>Berger Kap. 1.2.1:</u> „Antimaterie“

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K2: Teilchen in der Hochenergiephysik	Die Elementarteilchen sowie aus diesen zusammengesetzte Teilchen. K2.1: Elementarteilchen Bem: Historische und moderne Verwendung des Begriffs „elementar“ K2.2: Teilchenentdeckungen K2.3: Teilcheneigenschaften: v.a. Ladungen und andere Quantenzahlen K2.4: Antiteilchen K2.5: Zusammengesetzte Teilchen und ihr Aufbau: z.B. Hadronen, Baryonen und Mesonen, Quarkmodell, K2.6: Teilchenklassifikationen (nicht „Standardmodell“): z.B. Fermionen und Bosonen, Leptonen und Quarks, Einteilung der Fermionen in 3 Generationen ...	<u>Ankerbeispiele:</u> • <i>Elektron, Positron, Proton, Antiproton, Myon, Tauon, Charme-Quark ...</i> • <i>Quarks und Leptonen</i> • <i>Das Proton ist aus Quarks zusammengesetzt</i> • <i>Elementarteilchen sind nicht weiter zerteilbar</i> • <i>Entdeckung der Ladung des Elektrons</i> • <i>Entdeckung des Myons</i> • <i>Ladungen</i> • <i>Quantenzahlen der Elementarteilchen</i> • <i>Teilchenzoo</i> <u>Gegenbeispiel:</u> • <i>Quantenzahlen</i>	1. Eigenschaften wie Ladung und Quantenzahlen müssen für diese Kategorie in Verbindung mit mind. einem Elementarteilchen oder in direkter gleichzeitiger Nennung mit dem Wort „Teilchen“ auftauchen. 2. Kerne als zusammengesetzte Teilchen gehören nicht in diese Kategorie, sondern in K1. 3. Nicht in diese Kategorie gehören folgende spezielle Teilchen bzw. Begriffe: • Higgs-Boson • Austauschteilchen wie Photon, W-/Z-Boson, Gluon • (virtuelle) Zustände von Teilchen • Wechselwirkungen der Teilchen	Für K2 und K2.1: <u>Berger Kap. 1.2:</u> „Die Elementarteilchen“ Für K2.2: <u>z.B. Demtröder Kap. 7.1:</u> „Die Entdeckung der Myonen und Pionen“ Für K2.3: <u>z.B. Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 10.1:</u> „Eigenschaften der Leptonen“ Für K2.4: <u>Bleck-Neuhaus, Kap. 9.3.2:</u> „Zu Teilchen gibt es Antiteilchen“ Für K2 und K2.5: <u>Povh, Rith, Scholz, Zetsche Teil II:</u> „Zusammengesetzte Systeme“ (u.a. Quarkonia, Mesonen, Baryonen) Für K2.6: <u>Demtröder Kap. 7.2.5:</u> „Klassifikation der Teilchen“

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K3: SRT und QM mit Bezug zur Teilchenphysik, QFT	Teilchenphysikalische Grundlagen aus der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) (K3.1) sowie Grundlagen aus der Quantenmechanik (QM) (K3.2) Speziell auch: Quantenfeldtheorie (QFT) (K3.3)	<u>Ankerbeispiele QM:</u> • <i>Welle-Teilchen-Dualismus</i> • <i>Heisenberg'sche Unschärferelation</i> • <i>De-Broglie-Wellenlänge</i> • <i>Quantenzahlen</i> <u>Gegenbeispiel QM:</u> • <i>Quantenzahlen von Elementarteilchen</i> <u>Ankerbeispiele SRT:</u> • <i>Relativistische Masse</i> • <i>Einsteins Masse-Energie-Beziehung</i> <u>Ankerbeispiele QFT:</u> • <i>Dirac-Gleichung</i> • <i>Feldbegriff</i> • <i>Quantenelektrodynamik (QED)</i> • <i>Quantenchromodynamik (QCD)</i> • <i>Elektroschwache Vereinigung</i>	1. Grundlagen aus der QM und SRT können direkt mit Bezug zur Teilchenphysik genannt sein oder indirekt in Form von Prinzipien, die der Teilchenphysik zugrunde liegen. 2. Quantenzahlen gehören in diese Kategorie, falls sie nicht mit Bezug bzw. gemeinsam mit Teilchen, Symmetrien oder Erhaltungsgrößen erwähnt werden. 3. Quantenmechanische bzw. Quantenfeldtheoretische Begriffe, die speziell im Zusammenhang zu Streuprozessen stehen, gehören in K6 (Bsp: Quantenmechanischer Stoßprozess, Basisreaktion der QED, Wirkungsquerschnitt ...).	Für K3.1: <u>z.B. Demtröder Kap. 4.1.1:</u> „Geschwindigkeit, Impuls und Beschleunigung bei relativistischen Energien“ Für K3.2: <u>z.B. Bleck-Neuhaus Kap. 9.1:</u> „Welle-Teilchen-Dualismus“ Für K3.3: <u>z.B. Bleck-Neuhaus Kap. 9.4:</u> „Zweite Quantisierung/ Anfänge der Quantenfeldtheorie“ <u>z.B. Berger Kap. 3:</u> „Elementare Quantenelektrodynamik“

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K4: Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte	Die Fundamentalen Wechselwirkungen (WW) (K4.1): Gravitations-, elektro-magnetische, starke, schwache K4.2: Entdeckungen der WW K4.3: Nähere Beschreibungen, Implikationen d. WW K4.4: Bosonen als Austauschteilchen: (Graviton), Photon, Gluon, W-/Z-Boson Die fundamentalen Kräfte (K4.5) K4.6: Reichweiten und Stärken fundamentaler Kräfte K4.7: Zusammenhang zu bekannten Wechselwirkungen/ Kräften in beobachtbaren Alltagsphänomenen K4.8: Zusammenhang von WW/ Kräften zu Ladungen der an der WW teilnehmenden Elementarteilchen: Konzept der elektrischen, Farb- und schwachen Ladung	<u>Ankerbeispiele:</u> • <i>Die schwache Wechselwirkung</i> • <i>Quark-Confinement</i> (als Implikation der starken WW) • <i>(Schwacher) β-Zerfall</i> (als Implikation der schwachen WW) • <i>Das Photon als Überträger der elektromagnetischen Kraft</i> • <i>Fundamentale Kräfte spielen im Alltag eine große Rolle</i> • <i>Die Starke WW koppelt mittels Gluonen an Teilchen, die Farbladung tragen.</i> • <i>Wechselwirkungen und Ladungen der teilnehmenden Teilchen</i> <u>Gegenbeispiel:</u> <i>Erhalt der elektrischen Ladung</i>	1. Wechselwirkung = WW (engl. <i>interaction</i>) 2. Das Wort „fundamental“ ist nicht zwingend erforderlich. 3. Ladungen gehören nur in diese Kategorie, wenn der Bezug zur WW deutlich ist: Es muss entweder eine gemeinsame Nennung bestehen oder die Ladung als Größe, an die WW koppelt oder die Begriffe elektrische, Farb-, schwache Ladung (ohne gemeinsame Erwähnung mit einem Teilchen oder einer Erhaltungsgröße 4. Feldinterpretationen von WW gehören nicht in diese Kategorie, sondern in K3.3 Ausnahme: „Austauschteilchen als Modell zur Veranschaulichung von Feldwirkungen“ o. ä. 5. Das Higgs-Boson zählt nicht zu den Austauschteilchen und gehört nicht in diese Kategorie	Für K4 und K4.1: <u>Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 1.2:</u> „Die fundamentalen Wechselwirkungen“ Für K4.2: <u>In Bleck-Neuhaus Kap. 1.3.1 („Physikalische Entdeckungen“), S.20:</u> “[...] zwei neue Naturkräfte namens starke und schwache Wechselwirkung.“ Für K4.3: <u>z.B. Bleck-Neuhaus Kap. 13.3.2:</u> „Quantenchromodynamik - Einschluss (Confinement)“ Für K4.4: <u>Demtröder Kap. 7.6.1:</u> „W- und Z-Bosonen als Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung“ Für K4.5: <u>Berger Kap. 1.3:</u> „Teilchen und Kräfte“ Für K4.6: <u>in Berger, Kap.1.1 („Strukturen der Materie“), S.11:</u> „[...] Verglichen mit dem Coulomb-Potenzial fällt das Yukawa-Potenzial sehr viel stärker ab, die Reichweite der Kernkraft ist sehr kurz!“ <u>Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 10.3:</u> „Kopplungsstärke der schwachen Wechselwirkung“ Für K4.7: <u>In Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 1.2 („Die fundamentalen Wechselwirkungen: „[...] Wir kennen somit vier fundamentale Wechselwirkungen, auf denen alle physikalischen Phänomene beruhen.“</u> Für K4.8: <u>Demtröder Kap.7.4.6:</u> „Farbladungen“

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K5: Symmetrien und Erhaltungsgrößen	Symmetrien (K5.1) als Invarianz einer WW (gleichbleibende Form der physikalischen Gesetze/ Phänomene) unter gewissen Transformationen K5.2: WW-Prozesse können unter Transformationen symmetrisch sein: Parität (P), Ladungskonjugation (C), Zeitumkehr (T) sowie Kombinationen: z.B. CP, CPT K5.3: Symmetrieverletzung K5.4: Zusammenhang von Symmetrien und Erhaltungsgrößen: Noether-Theorem (In Kürze: <i>Zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines Systems gehört eine Erhaltungsgröße</i>) K5.5: Erhaltungssätze und Erhaltungsgrößen: z.B. Ladung, (Dreh-) Impuls, Energie, Farbe, Isospin, Flavour, Baryonenzahl, Leptonenzahl, Eigenwerte zu C-, P-Transformationen ...	<u>Ankerbeispiele:</u> • <i>Die elektrische Ladung ist in allen Prozessen erhalten</i> • <i>Aus der Symmetrie bezüglich Zeitumkehr folgt die Energieerhaltung</i> • <i>Die CP-Verletzung im Universum</i> • <i>Die Erhaltung von Quantenzahlen wie Drehimpuls</i> • <i>Erhaltungssätze, Ladungen und Quantenzahlen</i>	1. <u>Generell gilt:</u> „Symmetrien“ allein gehört in K5.1, „Erhaltungsgrößen und -sätze“ allein in K5.5 und eine gemeinsame Nennung in K5.4. 2. Quantenzahlen und Ladungen gehören in diese Kategorie, wenn ein Bezug zu Erhaltungsgrößen besteht.	Für K5.1: <u>Bleck-Neuhaus, 11.2.1:</u> „Symmetrien der Wechselwirkung“ Für K5.2: z.B. Berger Kap. 2.5: „Spiegelungen und die Paritätsinvarianz“ -> Kap. 2.5.1 „Die Paritätstransformation“ Für K5.3: <u>Demtröder Kap. 7.6.3:</u> „Paritätsverletzung bei der schwachen Wechselwirkung“ Für K5.4: <u>In: Berger, Kap. 2 („Die Streumatrix und ihre Symmetrien) [S.92]:</u> „[...] haben wir so das berühmte Noethersche Theorem der Feldtheorie gefunden.“ Für K5.5: <u>Demtröder Kap. 6.2:</u> „Erhaltungssätze“ <u>Demtröder Kap. 7.2.6:</u> „Quantenzahlen und Erhaltungsgrößen“

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K6: Teilchenzerfälle und -interaktionen	Die den Experimenten in der Kern- und Teilchenphysik zugrundeliegenden Teilchenreaktionen K6.1: Arten von Experimenten: Streuprozesse, Spektroskopie, Zerfälle K6.2: Mögliche Basisprozesse zu einem bestimmten Set Eingangs- und/ oder Ausgangsteilchen (Mitenthalten: Teilchen in virtuellen Zuständen) K6.3: Graphische Darstellung durch Feynman-Diagramme K6.4: Prozesse höherer Ordnung K6.5: Quantenmechanische Beschreibung von Prozessen: Streuwelle, Störungstheorie, Born'sche Näherung, Fermis Goldene Regel, (differentieller) Wirkungsquerschnitt, Zerfallsbreite, Lebensdauer	<u>Ankerbeispiele:</u> • <i>Welche grundlegenden Prozesse sind möglich?</i> • <i>Die Basisreaktion der QED</i> • <i>Zusammenhang von Zerfallsbreite und Lebensdauer von Teilchen</i> • <i>Fermis Goldene Regel</i> • <i>Teilchen können auch aus „unphysikalischen“ (virtuellen) Zuständen heraus messbare Wirkungen entfalten</i> • <i>Teilchenzerfälle</i>	1. Teilweise gehören quantenmechanische Betrachtungen und Begriffe in diese Kategorie und nicht in K3. Jedoch nur, wenn ein Zusammenhang zu Streuprozessen o. Teilchenzerfällen erkennbar ist (darunter fallen auch Nennungen wie „Basisreaktionen der QED, QCD“).	Für K6 und K6.1: In Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 1.4 („Experimente“) [S.5]: „[...] Vereinfacht kann man die Experimente in zwei Gruppen aufteilen (...): Streuexperimente und Spektroskopie.“ Für K6.2: Berger Kap. 3.2: „Basis-Reaktionen der QED“ Für K6.3: Bleck-Neuhaus Kap. 9.7: „Feynman-Graphen“ Für K6.4: Berger Kap. 3.3: „Prozesse höherer Ordnung“ Für K6.5: Bleck-Neuhaus Kap.5: „Stoßprozesse quantenmechanisch“ Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 4.3: „Die Goldene Regel“ Berger Kap 1.3: „Wirkungsquerschnitte und Zerfallsraten“

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K7: Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson	K7.1: Motivation und Idee des Higgs-Mechanismus als Ursprung der Teilchenmassen. K7.2: Theoretische Vorhersagen, die Suche und die Entdeckung des Higgs-Bosons.	<u>Ankerbeispiele:</u> • <i>Higgs-Feld</i> • <i>Higgs-Mechanismus</i> • <i>Higgs-Boson</i> • <i>Higgs-Teilchen</i> • <i>Der letzte Beweis des Standardmodells</i> • <i>Entdeckung des Higgs-Bosons 2012</i> • <i>Analogien zum Mechanismus</i>	1. Jegliche Nennung, die eines der folgenden Wörter enthält, gehört in diese Kategorie: ➔ Higgs ➔ Massen-Mechanismus ➔ Ursprung der Masse ➔ EBH(GHK) – Mechanismus ➔ Spontane Symmetriebrechung	Für K7.1: <u>In: Bleck-Neuhaus Kap. 12.5.2 („Konstruktion von Austauschteilchen als Eichbosonen“)</u> <u>[S.571]: „[...]Der Higgs-Mechanismus wurde (...) dahingehend ausgedehnt, dass er nicht nur den Austauscbosonen der Schwachen Wechselwirkung ihre Massen gibt, sondern auch allen anderen fundamentalen Teilchen des Standardmodells.“</u> Für K7.2: <u>Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 12.5:</u> <u>„Das Higgs-Boson“</u> <u>Bleck-Neuhaus Kap. 14.6: „Higgs-Feld und Higgs-Boson“</u>

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K8: Das Standardmodell	Das Standardmodell der Teilchenphysik: K8.1: Reine Nennung des Standardmodells ohne weitere Spezifizierung K8.2: Facetten und Aspekte des Standardmodells: Teilcheninhalt (Fermionen und (Austausch-) Bosonen), fundamentale Prozesse, Rolle der Ladungen, fundamentale Wechselwirkungen und (teilweise) vereinheitlichte Verständnis, Eichtheorien, Higgs-Mechanismus <u>Aussagen zu dem Modell als Ganzem. Das kann folgende Bereiche betreffen:</u> → K8.3: Motivation, Geschichte → K8.4: Erfolge, Genauigkeit und Vorhersagekraft → K8.5: Vollständigkeit	<u>Ankerbeispiele:</u> • <i>Der Teilcheninhalt des Standardmodells</i> • <i>Die Grundmotivation für das SM: die Natur erklären mithilfe weniger Parameter, Bausteine, Kräfte</i> • <i>Die Geschichte des Standardmodells</i> • <i>Vorhersagekraft und Genauigkeit des Standardmodells</i> <u>Gegenbeispiel:</u> • <i>Das Standardmodell kann derzeit viele offene Fragen noch nicht beantworten</i>	1. Standardmodell = SM (engl. <i>standard model</i>) 2. „Standardmodell“ bzw. „SM“ muss explizit genannt sein für diese Kategorie (Ausnahme: Hinweise zur Vereinheitlichung v. Kräften/ Wechselwirkungen als Motivation für ein Modell gehören auch in diese Kategorie) 3. <u>Wichtiger Hinweis:</u> Aussagen über die Unvollständigkeit des SM und Theorien, die über das SM hinaus gehen (BSM, <i>Beyond Standard Model</i>) für die Klärung noch offener Fragen gehören in K10 und nicht in K8.	Für K8 und K8.1: <u>Berger Kap.7:</u> „Das Standardmodell“ Für K8.2: <u>In: Demtröder Kap.7.7 („Das Standardmodell der Teilchenphysik“)</u> [S.193]: „[...] Es (das Standardmodell) basiert auf einer Eichtheorie (...) Nach unserem heutigen Kenntnisstand besteht die gesamte Materie und ihre Wechselwirkungen aus drei Sorten elementarer Teilchen: Leptonen, Quarks und Austauschteilchen.“ Für K8.3, K8.4, K8.5: <u>In: Bleck-Neuhaus Kap. 14 („Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik“)</u>[S.633]: Das heutige Standard-Modell der Elementarteilchenphysik, wie es sich seit den 1970er Jahren herausgebildet hat, erreicht von einer – nach früheren Begriffen –fast unvorstellbar einfachen Grundlage aus eine nahezu vollständige und quantitative Beschreibung der elementaren Erscheinungen in der materiellen Welt. <u>Bleck-Neuhaus Kap. 14.1:</u> „Genauigkeitsrekord: Leptonen g-Faktor“ <u>In: Demtröder Kap.7.7 („Das Standardmodell der Teilchenphysik“)</u> [S.195]: „Damit (mit dem Higgs-Boson) wäre das letzte noch fehlende Teilchen, das von der Standard-Theorie gefordert wurde, gefunden.“

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K9: Kosmologie und kosmische Strahlung, ART	Kosmologie: Forschung zum Ursprung, der Entwicklung und der heutigen Struktur des Universums Insbesondere hier: Die Rolle der Teilchenphysik in der Kosmologie bzw. allgemeiner Erkenntnisse aus der Astroteilchenphysik → K9.1: Allgemeine Nennung von Kosmologie und/oder Astroteilchenphysik → Aspekte der Kosmologie: K9.2: Urknallmodell K9.3: Thermische Entwicklung des Universums, CMB K9.4: Beschleunigte Expansion, Inflation K9.5: Standardmodell der Kosmologie K9.6: Entstehung von Strukturen im Universum (Elementen (Baryogenese), Galaxien, Erzeugung und Vernichtung von Sternen) → K9.7: Strahlung aus dem Weltraum - Neutrinos, Photonen, Kosmische Strahlung (Myonen, Pionen, Strange-Teilchen ...) → K9.8: Gravitationswellen (Aspekt der ART)	<u>Ankerbeispiele:</u> • <i>Die Geschichte des Universums</i> • <i>Aufbau und Energiehaushalt des Universums</i> • <i>Cosmic Microwave Background (CMB)</i> • <i>Entdeckung von Pionen in kosmischer Höhenstrahlung</i> • <i>Hubble-Konstante</i>	1. Das Wort „Universum“ ist hinreichend für diese Kategorie, jedoch nicht zwingend erforderlich. Genannte Aspekte aus der Kosmologie/ Astroteilchenphysik genügen. 2. <u>Ausnahme:</u> Dunkle Materie, Dunkle Energie und die CP-Verletzung im Universum gehören in K10 als offene Fragen und nicht in K9.	Für K9 und K9.1: <u>Demtröder Kap. 12:</u> „Die Entwicklung und heutige Struktur des Universums.“ Für K9.2: <u>In: Berger Kap. 1.1), „Strukturen der Materie“) [S.5]:</u> „Im derzeit akzeptierten Modell der Kosmologie ist die Welt aus einem Urknall, dem <i>big bang</i> entstanden.“ Für K9.3: <u>Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 20.4:</u> „Teilchenphysik und Thermodynamik im frühen Universum“ <u>Demtröder Kap. 12.1.2:</u> „Kosmische Hintergrundstrahlung“ Für K9.4: <u>Demtröder Kap. 12.1.1:</u> „Die Expansion des Weltalls“ <u>Demtröder Kap. 12.3.12:</u> „Das inflationäre Universum“ Für K9.5: <u>Demtröder Kap. 12.3:</u> „Das Standardmodell (der Kosmologie)“ Für K9.6: <u>Povh, Rith, Scholz, Zetsche Kap. 20.5:</u> „Sternentwicklung u. Elementsynthese“ Für K9.7: <u>Demtröder Kap. 9.5.10:</u> „Nachweis der Kosmischen Höhenstrahlung“ Für K9.8: <u>In: Demtröder Kap. 9.2 („Messdaten von Himmelskörpern“)[S.234]: „[...] Gravitationswellen, die von beschleunigten Massen im Kosmos emittiert werden.“</u>

Kategorie	Definition	Beispiele	Kodierregeln	Beispielnennung in Lehrwerken
K10: Offene Fragen und theoretische Hypothesen	Offene Fragen und Problemstellungen aktueller Modelle bzw. Forschungsergebnisse sowie verfügbare theoretische Lösungsansätze Insbesondere: Offene Fragen das SM betreffend und Theorien, wie dieses erweitert werden kann bzw. alternative Modelle K10.1: Allgemein „offene Fragen“ (ohne weitere Spezifizierung) <u>Belegte Probleme im SM:</u> • K10.2: Neutrino-Eigenschaften (insb. Massen) • K10.3: Baryogenese (insb. Baryon-Antibaryon-Asymmetrie) • K10.4: Dunkle Materie und Dunkle Energie <u>Theoretische Lösungswünsche:</u> • K10.5: Grund für Größen der Fermionmassen • K10.6: Hierarchieproblem(e) • K10.7: Quantengravitation • K10.8: Vereinigung der Wechselwirkungen (z.B. durch GUT (<i>Grand Unified Theory</i>)) K10.9: Allgemein Lösungsansätze (ohne weitere Spezifizierung) <u>Erweiterte theoretische Modelle:</u> • K10.10: Susy (Supersymmetrie) • K10.11: Stringtheorie • K10.12: BSM (<i>Beyond Standard Model</i>)	<u>Ankerbeispiele:</u> • <i>Offene Fragen des Standardmodells</i> • <i>Grenzen derzeitigen Wissens</i> • <i>Theorien, die das Standardmodell erweitern</i> • <i>Dunkle Materie</i> • <i>Neutrino-oszillationen</i> • <i>CP-Verletzung im Universum</i> • <i>Hierarchieproblem</i> • <i>Supersymmetrie</i> • <i>BSM (Beyond Standard Model)</i>	1. „Offene Fragen“ kann in dieser oder ähnlicher Form explizit genannt sein oder aber implizit, in dem die Gegenstände der offenen Fragen genannt werden. 2. Das Gleiche gilt für „(theoretische) Lösungsansätze“ 3. Vorsicht: Neutrinos gehören normalerweise als Elementarteilchen in K2 und nur in Verbindung mit den Zusätzen „-masse“ oder „-oszillation“ in K10.	Für K10, K10.1: <u>Bleck-Neuhaus Kap. 14.7:</u> „Offene Fragen“ Für K10.2: In: Demtröder Kap. 12.3.3 („Die frühe Phase des Universums“)[S.379]: „[...] Wegen der leichten Asymmetrie (...) bleibt nach der Zerstrahlung ein kleiner Rest (...) der ursprünglichen Hadronenzahl übrig. Sie bilden die Grundlage für unsere heutige Materie im Weltall.“ Für K10.3: <u>Berger Kap. 7.9:</u> „Neutrinomassen und Neutrino-Oszillationen“ Für K10.4: <u>Demtröder Kap. 12.6:</u> „Das dunkle Universum“ Für K10.5: In: Bleck-Neuhaus Kap. 14.7.1 („Noch zu viele Parameter (im Standardmodell)“)[S.672]: „[...] 6 Massen der Leptonen, 6 Massen der Quarks [...]“ Für K10.6: <u>Berger Kap. 7.10.4:</u> „Hierarchie und Feinabstimmung“ Für K10.7: In: Demtröder Kap. 12.3.3 („Die frühe Phase des Universums“)[S.379]: „[...] Theoretische Modelle nehmen an, dass (man) (...) eine Quantengravitation zur Beschreibung von Vorgängen unterhalb der Planckzeit braucht.“ Für K10.8: <u>Berger Kap. 7.10.3:</u> „Die große Vereinheitlichung“

				Für K10 und K10.9: <u>Demtröder Kap. 7.8:</u> „Neue, bisher experimentell nicht bestätigte Theorien“ Für K10.10: <u>Berger Kap. 7.10.5:</u> „Die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells“ Für K10.11: <u>In: Bleck-Neuhaus Kap. 14.7 („Offene Fragen“)</u> <u>[S.675]:</u> „[...] Die <i>string</i>-Theorie interpretiert alle Teilchen als Schwingungsmoden winziger Fäden oder Membranen in einem vieldimensionalen Raum [...]“ Für K10.12: <u>Berger Kap. 7.10:</u> „Jenseits des Standardmodells“
--	--	--	--	--

B.2 Runde 2: Kodierleitfaden

Kodierleitfaden – Delphi Runde 2

Hinweis: Das im Folgenden beschriebene Kategoriensystem dient dazu, offene Textantworten von Expert*innen mithilfe einer Inhaltlich Strukturierenden Qualitativen Inhaltsanalyse zusammenzufassen. Diese Antworten wurden im Rahmen eines Online-Fragebogens jeweils auf folgende beiden Fragen zu 10 verschiedenen gezeigten thematischen Hauptkategorien (mit jeweils mehreren Unterkategorien) gegeben:

1. *Gibt es Unterkategorien auf der linken Seite, die Ihrer Ansicht nach kein Teil des Wissens sind, das eine Lehrperson über die angezeigte Hauptkategorie haben muss?*
2. *Gibt es fundamental wichtige Aspekte, die Ihrer Ansicht nach in der Liste der Unterkategorien auf der linken Seite fehlen?*

Eine Übersicht über die Haupt- und Unterkategorien, die die Expert*innen im Fragebogen einschätzen sollten, liegt zur Übersichtlichkeit diesem Kodierleitfaden bei.

Allgemeine Kodierregeln:

- Es wird versucht, die Antworten der Expert*innen in ein System von Veränderungsvorschlägen einzuordnen. Diese Veränderungsvorschläge werden im Folgenden **Subkategorien** genannt.
- Alle Subkategorien, die eine Aussage zu dem jeweils gleichen der 10 Hauptthemen machen, bilden zusammen eine **Hauptkategorie** im folgenden System. Da es 10 Hauptthemen zur Bewertung im Fragebogen gab, gibt es dementsprechend auch hier 10 Hauptkategorien.
- Kodiert werden nur ganze Kodiereinheiten innerhalb der Textantworten, wobei eine **Kodiereinheit hier eine Sinneinheit (keine ganze Antwort!) ist, die eine Aussage über eine oder mehrere (potenzielle) Unterthemen enthält.**
- Jeder Kodiereinheit wird beim Kodieren –falls möglich - einer Subkategorie zugeordnet. Hauptkategorien werden nicht zugeordnet!
- Die Definition der Subkategorien wird in den meisten Fällen als ausreichend für die Zuordnung von Textstellen erachtet. Für einige Subkategorien wurden im folgenden Leitfaden Beispiele formuliert, um die Kodierung zu erleichtern.
- Lässt sich die Kodiereinheit keiner Subkategorie zuordnen, so bleibt sie unkodiert. Lässt sie sich mehreren Subkategorien zuordnen, so erhält sie die entsprechende mehrfache Kodierung.
- Jede Subkategorie Sx.y existiert in **zweifacher Ausführung**: Sx.ya und Sx.yb. Die Kodiereinheit wird dabei jeweils einer der beiden Subkategorien zugeordnet, je nachdem, ob **a)** innerhalb der Einheit eine Begründung gegeben wurde oder **b)** ob keine Begründung gegeben wurde. Die Qualität der Begründung spielt dabei keine Rolle. Beispiele für Begründungen finden sich für verschiedene Subkategorien im folgenden Kodierleitfaden.

• Kategorienüberblick:

K1	<u>Aussagen zu Hauptthema 1 (Struktur der Materie)</u>
K2	<u>Aussagen zu Hauptthema 2 (Teilchen in der Hochenergiephysik)</u>
K3	<u>Aussagen zu Hauptthema 3 (SRT und QM bzgl. Teilchenphysik; QFT)</u>
K4	<u>Aussagen zu Hauptthema 4 (Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte)</u>
K5	<u>Aussagen zu Hauptthema 5 (Symmetrien und Erhaltungsgrößen)</u>
K6	<u>Aussagen zu Hauptthema 6 (Teilchenzerfälle und -interaktionen)</u>
K7	<u>Aussagen zu Hauptthema 7 (Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson)</u>
K8	<u>Aussagen zu Hauptthema 8 (Das Standardmodell der Teilchenphysik)</u>
K9	<u>Aussagen zu Hauptthema 9 (Kosmologie und Kosmische Strahlung; ART)</u>
K10	<u>Aussagen zu Hauptthema 10 (Offene Fragen und Theoretische Hypothesen)</u>

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K1: Aussagen zu Hauptthema 1 (Struktur der Materie) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub1.1: Alle Informationen zu Materiebausteinen aus K1.2 (Eigenschaften, Entdeckungen, Beziehungen von Bausteinen) sollten in K1.1 (Materieaufbau) verschoben werden.		• Weil 1.2 sich dann nur noch mit Kräften/WW (Beziehungen) zw. Bausteinen beschäftigt
	Sub1.2: Es gibt Überschneidungen zwischen K1.2 (Entdeckungen, Beziehungen v. Bausteinen), K2.2 (Teilchenentdeckungen) und K1.4 (Historische Entdeckungen)		
	Sub1.3: Der Zusammenhang zw. Teilchenphysik und Radioaktivität (Beta-Zerfall) sollte in das Kategoriensystem (am besten in Kategorie 1) mit aufgenommen werden (bezieht sich auf K1.3)		
	Sub1.4: K1.4 (Historische Entdeckungen) sollte aus Kategorie 1 herausgenommen werden oder in andere Abschnitte dieser Kategorie aufgenommen werden.		• Es steht nicht die Wissenschaft Physik, sondern eher die Geschichte (der Physik) bei K1.4 im Fokus.
	Sub1.5: K1.5 (Antimaterie) sollte keine (eigenständige) Unterkategorie von Kategorie 1 sein. Es könnte eventuell ein Aspekt von Antiteilchen (K2.4) sein.		• Kategorie 1 sollte sich nur mit "gewöhnlicher" Materie beschäftigen
	Sub1.6: Untersuchungsmethoden zu Materiebausteinen		• Es ist ein wichtiger Teil von K1.2 und K1.4

	sollten in Kategorie 1 hinzugefügt werden.		
	Sub1.7: Grundlagen über makroskopische Strukturformen (nur Existenz) könnten in Kategorie 1 mitaufgenommen werden.	<i>Grundlagen über makroskopische Strukturformen sind z.B. Wissen über Kristallformen oder Bindungswinkel.</i>	
	Sub1.8: Es sollten Grundlagen aus der Atomphysik in Kategorie 1 aufgenommen werden.	<i>Beispiele: Spektroskopie und das Konzept von Energieniveaus</i>	• <i>Mindestens so wichtig wie Kernphysik</i>

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K2: Aussagen zu Hauptthema 2 (Teilchen in der HEP) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub2.1: Die Reihenfolge der Unterkategorien in Kategorie 2 sollte geändert werden.		• <i>Derzeitige Reihenfolge ergibt keinen logischen Sinn.</i>
	Sub2.2: K2.1 (Überblick und Teilchenklassifikation) und K2.3 (Teilcheneigenschaften) sind eine gemeinsame Unterkategorie.		
	Sub2.3: Teilchenentdeckungen (K2.2) sollte aus Kategorie 2 herausgenommen werden oder zumindest sollten nicht alle Entdeckungen thematisiert werden.		• <i>Irrelevanz für Schule</i>
	Sub2.4: Antiteilchen (K2.4) ist in dieser Zusammenstellung keine eigenständige Unterkategorie von Kategorie 2, sondern nur Teilaspekt anderer Unterkategorien.		• <i>Antiteilchen ist durch Teilchenklassifikation (K2.1) und Teilcheneigenschaften (K2.3) abgedeckt.</i>
	Sub2.5: Teilchensuchen (durch Modelle vorhergesagte und (noch nicht) gefundene Teilchen) sollten als Aspekt in Kategorie 2 mitaufgenommen werden.		
	Sub2.6: Das Konzept des Welle-Teilchen-Dualismus könnte in Kategorie 2 mitaufgenommen (nur "erwähnt") werden.		
	Sub2.7: BSM-Aspekte sollten in Kategorie 2 mitaufgenommen werden.	<i>Beispiele: Mischungswinkel, Sterile Neutrinos</i>	

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K3: Aussagen zu Hauptthema 3 (SRT und QM bzgl. Teilchenphysik, QFT) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub3.1: Für SRT (K3.1) und QM (K3.2) ist kein vertieftes Wissen für den Schulunterricht notwendig.		• <i>Es ist einfach zu komplex, mit zu vielen Details</i>
	Sub3.2: Es ist unmöglich, SRT (K3.1) und QM (K3.2) oder gar ART (Kategorie 9) in der Schule zu unterrichten (außer für ungewöhnliche Lehrende/ Lernende).		• <i>ART wird erst im dritten Jahr der Universität angesprochen.</i>
	Sub3.3: Es sind zu wenige Beispiele für Grundlagen/ wesentliche Konzepte für das Grundverständnis zur Quantenmechanik (K3.2) und für die SRT (K3.1) in den Definitionen beschrieben.		
	Sub3.4: QFT (K3.3) sollte in Teilen oder ganz aus Kategorie 3 entfernt werden (eventuell nur, falls Lehrender auf Niveau High-School/erstes Jahr Uni arbeitet).		• <i>Geht zu weit</i> • <i>für generelles Verständnis der Teilchenphysik nicht wichtig</i> • <i>Da man aus Erfahrung und dem Curriculum der Lehrerausbildung bereits 3.1 und 3.2 in den Lehrplänen verteidigen muss.</i>
	Sub3.5: Es sollte der Aspekt des Einheitensystems in der Teilchenphysik mit in Kategorie 3 aufgenommen werden.	<i>Erklärung über $e^2/(h \cdot c) = 1/137$ dass man h und c gleich ein setzen kann und das Einheiten-system bestimmt bleibt</i>	

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K4: Aussagen zu Hauptthema 4 (Fundamentale WW/ Kräfte) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub4.1: Die Unterkategorie "Ladungen" (K4.3) sollte als Teil des Lehrerwissens nicht als "allgemeintheoretisches" Konzept (Noether-Theorem) verstanden werden.		
	Sub4.2: "Massen der Austauschteilchen" sollte in Kategorie 4 hinzugefügt werden,		

	eventuell als Unteraspekt anderer Themen.		
	Sub4.3: Es sollte der Aspekt von Wechselwirkungen zwischen Austauscheteilchen (bei der starken WW) in Kategorie 4 hinzugefügt werden.		
	Sub4.4: Das Phänomen des Quark-Confinement sollte in Kategorie 4 hinzugefügt werden.		
	Sub4.5: Das Prinzip der Eichkovarianz als vereinheitlichendes Element der gesamten Teilchenphysik bzw. der Teilaspekt der Elektroschwachen Vereinheitlichung sollte in Kategorie 4 hinzugefügt werden.		
	Sub4.6: Es sollte der Aspekt des Zusammenhangs zwischen Symmetrie, Erhaltungsgröße UND Kraft im Kategoriensystem hinzugefügt werden.		Für das Verständnis der Teilchenphysik ist es essentiell zu verstehen, dass Kräfte durch Symmetrien beschrieben werden können.

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K5: Aussagen zu Hauptthema 5 (Symmetrien und Erhaltungsgrößen) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub5.1: Symmetrieverletzung (K5.4) sollte in Kategorie 5 nur erwähnt werden.		Ist weniger wichtig als andere Themen.
	Sub5.2: Größen, die nicht in allen Prozessen erhalten sind, sollten in Kategorie 5 hinzugefügt werden.	Beispiel: Strangeness S	
	Sub5.3: Es sollte der Aspekt von Symmetrien im Alltag in Kategorie 5 als eigenes Unterthema hinzugefügt werden.		Das Thema von Kategorie 5 ist sehr abstrakt und diese Abstraktheit sollte in der schulischen Lehre überwunden werden.
	Sub5.4: Es sollte in Kategorie 5 erwähnt werden, dass manche Symmetrien nicht anschaulich vorstellbar sind, sondern nur formal nachzuvollziehen und dass bei anderen die Verletzung der Vorstellungskraft widerspricht.	Nicht anschaulich vorstellbar: Isospin Verletzung widerspricht Vorstellungskraft: Paritätsinvarianz	

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K6: Aussagen zu Hauptthema 6 (Teilchenzerfälle und -interaktionen) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub6.1: Es besteht ein starker Zusammenhang/Übereinstimmung zwischen Inhalten aus Kategorie 6 mit Kategorie 2 und 4. Dabei; a) Wissen über beide für Kategorie 6 notwendig oder b) Vorschlag der Aufteilung von Kategorie 6.		• <i>Begründung für Aufteilung: Teilcheninteraktionen / -zerfälle als eigenständige Kategorie erscheint nicht passend.</i>
	Sub6.2: K6.1 (Arten von Experimenten) sollte aus Kategorie 6 entfernt werden.		
	Sub6.3: Teilweise sind Aspekte von K6.1 besser in Kategorie 1 hinzuzufügen.	<i>Beispiel: Spektroskopie als Untersuchungsmethode der Materie</i>	
	Sub6.4: Wechselwirkungen von Teilchen mit Materie bzw. allgemeiner Detektion für den Teilchennachweis könnte miteinbezogen werden in Kategorie 6 und würde die Arten von Experimenten (K6.1) beeinflussen.		
	Sub6.5: Feynman-Diagramme (K6.2) oder Teile daraus sollten aus Kategorie 6 herausgenommen werden.	<i>Beispiel für teilweisen Ausschluss: Loop-Diagramme, höhere Ordnungen der Störungstheorie</i>	• <i>Geht zu tief, vor allem die höheren Ordnungen sind "nicht nötig"</i>
	Sub6.6: Ein weiterer Aspekt von Kategorie 6 bzw. Unteraspekt von 6.2 sollten Pfadintegrale sein.		• <i>Feynman-Diagramme nur graphisch zu verstehen ist falsch.</i>
	Sub6.7: Feynman-Diagramme (K6.2) kann auch als Teil von QFT (K3.3) aufgefasst werden.		• <i>Feynman-Graphen sind eine Visualisierung von QFT</i>
	Sub6.8: Die Kenntnis von beispielhaften Zerfällen sollte mit in Kategorie 6 aufgenommen werden.		
	Sub6.9: Es sollten Erhaltungssätze in Teilcheninteraktionen und/oder insbesondere Paritätsverletzung und/oder das CPT-Theorem mit in Kategorie 6 aufgenommen werden.		• <i>Ist Basiswissen</i>

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K7: Aussagen zu Hauptthema 7 (Higgs-Mechanismus und -Boson) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub7.1: Der Aspekt/eine Einführung in Symmetriebrechung sollte in Kategorie 7 mitaufgenommen werden.		• <i>Nötig für das Verständnis des Higgs-Mechanismus</i> • <i>Es ist das allgemeinere Konzept (bezogen auf die Inhalte der Kategorie)</i>
	Sub7.2: Die Higgs-Produktion und die möglichen Higgs-Zerfälle sowie der Zusammenhang zwischen W-Masse, top-Massen und Higgs-Masse sollten in Kategorie 7 mitaufgenommen werden.		• <i>Sie sind wichtig für die Higgs-Suche (Der Zusammenhang der Massen gibt die Standardmodellvorhersage für kleine Higgs-Massen.)</i>
	Sub7.3: Der Meta-Aspekt der geschichtlichen Ausgangslage/Motivation und der theoretische Weg von Vorhersage und Eigenschaften des Higgs-Bosons (und des Feldes als Begleiterscheinung) sollte in Kategorie 7 aufgenommen werden.		
	Sub7.4: Das Higgs-Feld sollte eine eigene Unterkategorie in Kategorie 7 sein (und nicht nur Unteraspekt von K7.1)		• <i>Das Higgs-Feld ist immens wichtig.</i>
	Sub7.5: Für den Higgs-Mechanismus (K7.1) ist die Bedeutung von Symmetrien und die Erkenntnis des Problems von masselosen Bosonen und Fermionen Voraussetzung.		
	Sub7.6: Die Beschreibung/Inhalte des Higgs-Mechanismus (K7.2) sind zu spezifizieren.	• <i>Erstmal gibt das Feld nur den W-/Z-Bosonen Masse, während das Photon masselos bleibt und auf Gluonen nicht eingegangen wird. Die Masse der Fermionen ist eine zusätzliche Kopplung, die weiter eingeführt werden muss</i> • <i>Es sollte hervorgehoben werden, dass es nicht das Higgs-Feld ist, das</i>	• (Für das "Teilchenerzeugen"): Es gilt nicht für die Proton- und Neutronmassen bzw. die "Konstituenten-Quarkmassen". Ihre Massen stammen vom Gluonfeld, das innerhalb der Protonen/Neutronen eine Rolle ähnlich des Higgs-Feldes spielt.

		die Teilchenmassen „erzeugt“.	
	Sub7.7: Higgs-Mechanismus (K7.2) generell sollte kein Teil der gymnasialen Ausbildung sein.		• Zu viele spezielle Details sind nicht zielführend.

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K8: Aussagen zu Hauptthema 8 (Standardmodell) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub8.1: Der Higgs-Mechanismus und die Symmetriebrechung (Kategorie 7) und/oder Kräfte und Wechselwirkungen (Kategorie 4) sollten keine eigenen Kategorien, sondern Teil des Standardmodells (Kategorie 8) sein.		
	Sub8.2: Es gibt Überschneidungen in Kategorie 8.		
	Sub8.3: Es sollte der Aspekt der Renormalisierung aus Kategorie 8 (genauer K8.1) entfernt werden.		• Zu aufwändig für die Oberstufe. Kommt im Studium auch erst nach dem Bachelor und gehört nicht zur Grundbildung.
	Sub8.4: Erfolg, Genauigkeit und Vorhersagekraft (K8.3) sollte sich auf eine qualitative Beschreibung beschränken.		• Genauigkeit ändert sich ständig, so dass eine Lehrkraft schwer auf aktuellem Stand bleiben kann.
	Sub8.5: Die Vollständigkeit (K8.4) sollte aus Kategorie 8 herausgenommen werden.		• (Derzeit) nicht relevant, da wir zu 95% Dunkle Materie bzw. Energie im Universum besitzen • Zu kompliziert für den Schuleinsatz
	Sub8.6: Es sollte in Kategorie 8 der Aspekt der Bedeutung des Standardmodells aufgenommen werden.	Wofür steht das Standardmodell? Was sind die dazugehörigen Anwendungen in Bereichen außerhalb der Teilchenphysik?	
	Sub8.7: In Kategorie 8 sollte der Aspekt der zugehörigen Experimente mit aufgenommen werden.		

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K9: Aussagen zu Hauptthema 9 (Kosmologie und Kosmische Strahlung; ART) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub9.1: Kosmische Strahlung und Kosmologie sollte keine gemeinsame Kategorie sein.		• Die Themen haben außer dem Namen sehr unterschiedlichen Inhalt • Sie haben nur entfernt etwas miteinander zu tun.
	Sub9.2: Der Titel (und der Kategorieninhalt) von Kategorie 9 sollte ART ausschließen oder Grundvorstellung zur ART miteinbeziehen (bisher nicht explizit) bzw. sich auf diese Grundvorstellungen über die Konzepte beziehen/ beschränken.	Beispiele für die Konzepte, die aufzunehmen/ beizubehalten wären: <i>Generell Gravitation, grav. Rotverschiebung, schwarze Löcher/Schwarzschildradius, Gravitationslinsen</i>	• ART zu beherrschen kann man von Lehramtskandidaten nicht verlangen • darüber wird normalerweise erst im 3. Jahr der Universität gesprochen • (Für Beschränkung spricht:) Wird öfters in den Medien diskutiert.
	Sub9.3: Zum Thema Kosmologie (K9.1) sollte die Zusammensetzung des Universums aufgenommen werden.	<i>Speziell zur aktuellen Zusammensetzung: Dunkle Materie/Energie</i>	
	Sub9.4: Die Kosmische Hintergrundstrahlung (in K9.1) könnte auch Teil von K9.3 sein.		
	Sub9.5: Thema K9.1 (Kosmologie) sollte ganz oder teilweise aus Kategorie 9 entfernt werden.		• Themen auch an einer Universität nur Inhalt im Master. Detailliertes Wissen von Lehrern dazu ist unrealistisch, aber über Grundideen sollten sie Bescheid wissen.
	Sub9.6: Thema K9.3 (Strahlung aus dem Weltraum) sollte aus Kategorie 9 entfernt werden.		• Nur CMB ist wichtig, der Rest viel weniger.
	Sub9.7: Thema K9.2 (Strukturen im Universum) und Thema K9.4 (Gravitationswellen) sollten aus Kategorie 9 entfernt werden.		• Obwohl Nobelpreis an GW, sind Inhalte dieser Themen als wünschenswert anzusehen, aber nicht als unbedingte Voraussetzung • Themen auch an einer Universität nur Inhalt im Master. Detailliertes Wissen von Lehrern dazu

			<i>ist unrealistisch, aber über Grundideen sollten sie Bescheid wissen.</i>
	Sub9.8: Es sollte die Beschreibung zu Gravitationswellen (K9.4) angepasst werden.	<i>Insbesondere: Es ist kein Multimessengersignal.</i>	• Erzeugungsmechanismen von GW sollte Lehrkräften bekannt sein, aber Wissen über Multimessengersignaturen in Begleitung zu Gravitationswellensignaturen zu verlangen geht zu weit.
	Sub9.9: Wechselwirkungen von Teilchen sollte in Kategorie 9 aufgenommen werden.		
	Sub9.10: Es sind interdisziplinäre Aspekte in Kategorie 9 aufzunehmen wie der Einfluss von Photonen und kosmischer Strahlung auf biologische Systeme, Zeitbestimmung etc.		

Kategorie	Definition Subkategorien	Beispiele	Beispielbegründungen
K10: Aussagen zu Hauptthema 10 (Fragen und Hypothesen) sowie zu dazugehörigen (potenziellen) Unterthemen	Sub10.1: Die Unterkategorientitel in Kategorie 10 könnten angepasst werden.	<i>Insb. Anpassungen: Theoretischer Wunsch->Theoretische Idee; Evidenzbasiertes Problem-> Problem im Zshg. Mit; Außerdem ist 10.1 (Neutrinoeigenschaften) kein Problem des Standardmodells</i>	• Formulierungen zu schwierig für das Publikum • (für Neutrinos:) Es benötigt präzisere Messungen und es gibt die Möglichkeit von Majorana Neutrinos (muss ein Lehrer aber nicht wissen).
	Sub10.2: Die Themen K10.1 (Neutrinoeigenschaften), K10.2 (Baryogenese) und K10.3 (Dunkle Materie/Energie) sollten in Kategorie 10 bleiben.		• Sie sind unverzichtbar für die Vermittlung im Schulunterricht, da sie Probleme der Modernen Physik aufzeigen.
	Sub10.3 Die Themen K10.1 (Neutrinoeigenschaften), K10.3 (Dunkle Materie/Energie) und K10.6 (Vereinigung der WW) sollten in Kategorie 10 bleiben.		• Lehrer sollten etwas dazu sagen können
	Sub10.4: Thema K10.1 (Neutrinoeigenschaften) sollte aus Kategorie 10 entfernt werden.		• Ist höchstens für einen Ausblick relevant

	Sub10.5: Thema K10.2 (Baryogenese) sollte kein Hauptthema in Kategorie 10 sein oder man sollte exemplarischer vorgehen.		• <i>Baryogenese möglicherweise zu schwer für die Schule</i> • <i>zu detailliert und nicht zielführend</i> • <i>überambitioniert für Schule, da 90% der MSC-Abgänger nichts dazu wissen</i> • <i>höchstens für einen Ausblick relevant</i>
	Sub10.6: Thema K10.4 (Grund für Größen der Fermionmassen) könnte aus Kategorie 10 entfernt werden.		• <i>Weniger wichtig für Lehrerwissen als 10.5 (Hierarchieprobleme) oder 10.6 (Vereinigung der Wechselwirkungen)</i> • <i>wünschenswert, aber nicht unverzichtbar</i> • <i>überambitioniert für Schule, da 90% der MSC-Abgänger nichts dazu wissen</i> • <i>höchstens für einen Ausblick relevant</i>
	Sub10.7: Thema K10.5 (Hierarchieprobleme) könnte aus Kategorie 10 entfernt werden.		• <i>Wünschenswert, aber nicht unverzichtbar</i> • <i>überambitioniert für Schule, da 90% der MSC-Abgänger nichts dazu wissen</i> • <i>höchstens für einen Ausblick relevant</i> • <i>nicht interessant für Lehrer</i>
	Sub10.8: Thema K10.6 (Vereinigung der Wechselwirkungen) könnte aus Kategorie 10 entfernt werden.		• <i>Wünschenswert, aber nicht unverzichtbar</i> • <i>höchstens für einen Ausblick relevant.</i>
	Sub10.9: Thema K10.7 (Erweiterte theoretische Modelle) könnte aus Kategorie 10 entfernt werden.		• <i>Nicht erwartbar für ein Lehrerwissen. Das Thema ist zu sehr im Fluss und kann nicht in aller Aktualität von Lehrpersonen erwartet werden</i> • <i>überambitioniert für Schule, da 90% der MSC-Abgänger nichts dazu wissen</i> • <i>Führt für die Schule zu weit</i>

			• <i>höchstens für einen Ausblick relevant</i> • <i>nicht interessant für Lehrer</i>
	Sub10.10: In Kategorie 10 könnte der Aspekt der Kompetenz zur Modellkritik hinzugefügt werden.		
	Sub10.11: Es sollten Interpretationsfragen mit in Kategorie 10 aufgenommen werden.	<i>Beispiele: "Was sind Teilchen", das "Messproblem" in der QFT, Nichtlokalität</i>	
	Sub10.12: Es könnten weitere offene Fragen mit in Kategorie 10 aufgenommen werden.	<i>Beispiel: exakten Gleichheit der Protonenladung und derjenigen geladener Leptonen oder Gravitation auf Teilchenniveau</i>	• <i>Weil es immer weitere Fragen gibt</i>

B.3 Runde 2: Code-Matrix-Browser der Subkategorien

Codesystem	
▲ Aussagen zu Thema 1	
Sub1.1_a Infos aus K1.1 in K1.2 MIT BEGRÜNDUNG	
Sub1.1_b Infos aus K1.1 in K1.2 OHNE BEGRÜNDUNG	1
Sub1.2_a Überschneidungen K1.2, K2.2, K1.4 MIT BEGRÜNDUNG	
Sub1.2_b Überschneidungen K1.2, K2.2 K1.4, OHNE BEGRÜNDUNG	1
Sub1.3_a Radioaktivität MIT BEGRÜNDUNG	
Sub1.3_b Radioaktivität OHNE BEGRÜNDUNG	1
Sub1.4_a Entferne K1.4 MIT BEGRÜNDUNG	2
Sub1.4_b Entferne K1.4 OHNE BEGRÜNDUNG	
Sub1.5_a K1.5 nicht eigenständig MIT BEGRÜNDUNG	2
Sub1.5_b K1.5 nicht eigenständig OHNE BEGRÜNDUNG	1
Sub1.6_a Untersuchungsmethoden MIT BEGRÜNDUNG	1
Sub1.6_b Untersuchungsmethoden OHNE BEGRÜNDUNG	
Sub1.7_a Strukturformen MIT BEGRÜNDUNG	
Sub1.7_b Strukturformen OHNE BEGRÜNDUNG	1
Sub1.8_a Atomphysik MIT BEGRÜNDUNG	1
Sub1.8_b Atomphysik OHNE BEGRÜNDUNG	
▲ Aussagen zu Thema 2	
Sub2.1_a Reihenfolge MIT BEGRÜNDUNG	1
Sub2.1_b Reihenfolge OHNE BEGRÜNDUNG	
Sub2.2_a K2.1 und K2.3 zusammen MIT BEGRÜNDUNG	
Sub2.2_b K2.1 und K2.3 zusammen OHNE BEGRÜNDUNG	1
Sub2.3_a K2.2 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	1
Sub2.3_b K2.2 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	2
Sub2.4_a K2.4 nicht eigenständig MIT BEGRÜNDUNG	1
Sub2.4_b K2.4 nicht eigenständig OHNE BEGRÜNDUNG	1
Sub2.5_a Teilchensuchen MIT BEGRÜNDUNG	
Sub2.5_b Teilchensuchen OHNE BEGRÜNDUNG	2
Sub2.6_a Dualismus MIT BEGRÜNDUNG	
Sub2.6_b Dualismus OHNE BEGRÜNDUNG	1
Sub2.6_a BSM MIT BEGRÜNDUNG	
Sub2.6_b BSM OHNE BEGRÜNDUNG	1

▲ 	Aussagen zu Thema 3	
	Sub3.1_a K3.1, K3.2 Kein Vertieftes Wissen MIT BEGRÜNDUNG	1
	Sub3.1_b K3.1, K3.2 Kein Vertieftes Wissen OHNE BEGRÜNDUNG	
	Sub3.2_a Unmöglich K3.1, K3.2, ART MIT BEGRÜNDUNG	1
	Sub3.2_b Unmöglich K3.1, K3.2, ART OHNE BEGRÜNDUNG	
	Sub3.3_a Mehr Beispiele K3.1, K3.2 MIT BEGRÜNDUNG	2
	Sub3.3_b Mehr Beispiele K3.1, K3.2 OHNE BEGRÜNDUNG	1
	Sub3.4_a Mehr QFT entfernen MIT BEGRÜNDUNG	3
	Sub3.4_b Mehr QFT entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	3
	Sub3.5_a Einheitensystem MIT BEGRÜNDUNG	
	Sub3.5_b Einheitensystem OHNE BEGRÜNDUNG	1
▲ 	Aussagen zu Thema 4	
	Sub4.1_a Ladungen nicht theoretisch MIT BEGRÜNDUNG	
	Sub4.1_b Ladungen nicht theoretisch OHNE BEGRÜNDUNG	1
	Sub4.2_a Massen Austauschteilchen MIT BEGRÜNDUNG	
	Sub4.2_b Massen Austauschteilchen OHNE BEGRÜNDUNG	1
	Sub4.3_a WW Austauschteilchen MIT BEGRÜNDUNG	
	Sub4.3_b WW Austauschteilchen OHNE BEGRÜNDUNG	1
	Sub4.4_a Quark Confinement MIT BEGRÜNDUNG	
	Sub4.4_b Quark Confinement OHNE BEGRÜNDUNG	1
	Sub4.5_a Eichkovarianz MIT BEGRÜNDUNG	
	Sub4.5_b Eichkovarianz OHNE BEGRÜNDUNG	2
	Sub4.6_a Zshg Symmetrie Kraft MIT BEGRÜNDUNG	1
	Sub4.6_b Zshg Symmetrie Kraft OHNE BEGRÜNDUNG	
▲ 	Aussagen zu Thema 5	
	Sub5.1_a Erwähnung Verletzung MIT BEGRÜNDUNG	1
	Sub5.1_b Erwähnung Verletzung OHNE BEGRÜNDUNG	
	Sub5.2_a Größen manchmal MIT BEGRÜNDUNG	
	Sub5.2_b Größen manchmal OHNE BEGRÜNDUNG	1
	Sub5.3_a Alltagssymmetrie MIT BEGRÜNDUNG	1
	Sub5.3_b Alltagssymmetrie OHNE BEGRÜNDUNG	
	Sub5.4_a Vorstellungskraft MIT BEGRÜNDUNG	
	Sub5.4_b Vorstellungskraft OHNE BEGRÜNDUNG	1

▲	 Aussagen zu Thema 6	
	 Sub6.1_a Zshg Kat 6 mit 2 und 4 MIT BEGRÜNDUNG	1
	 Sub6.1_b Zshg Kat 6 mit 2 und 4 OHNE BEGRÜNDUNG	1
	 Sub6.2_a K6.1 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	1
	 Sub6.2_b K6.1 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub6.3_a K6.1 in Kat 1 MIT BEGRÜNDUNG	
	 Sub6.3_b K6.1 in Kat 1 OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub6.4_a WW Teilchen Materie MIT BEGRÜNDUNG	
	 Sub6.4_b WW Teilchen Materie OHNE BEGRÜNDUNG	2
	 Sub6.5_a K6.2 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	1
	 Sub6.5_b K6.2 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	1
	 Sub6.6_a Pfadintegrale MIT BEGRÜNDUNG	1
	 Sub6.6_b Pfadintegrale OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub6.7_a Feynman in QFT MIT BEGRÜNDUNG	
	 Sub6.7_b Feynman in QFT OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub6.8_a Beispiele Zerfälle MIT BEGRÜNDUNG	
	 Sub6.8_b Beispiele Zerfälle OHNE BEGRÜNDUNG	2
	 Sub6.9_a Erhaltung Interaktion MIT BEGRÜNDUNG	1
	 Sub6.9_b Erhaltung Interaktion OHNE BEGRÜNDUNG	1
▲	 Aussagen zu Thema 7	
	 Sub7.1_a Symmetriebrechung MIT BEGRÜNDUNG	2
	 Sub7.1_b Symmetriebrechung OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub7.2_a Higgs-Produktion MIT BEGRÜNDUNG	1
	 Sub7.2_b Higgs-Produktions OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub7.3_a Geschichte Motivation MIT BEGRÜNDUNG	
	 Sub7.3_b Geschichte Motivation OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub7.4_a Higgs-Feld MIT BEGRÜNDUNG	1
	 Sub7.4_b Higgs-Feld OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub7.5_a Voraussetzung Mechanismus MIT BEGRÜNDUNG	
	 Sub7.5_b Voraussetzung Mechanismus OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub7.6_a Spezifikation Mechanismus MIT BEGRÜNDUNG	2
	 Sub7.6_b Spezifikation Mechanismus OHNE BEGRÜNDUNG	
	 Sub7.7_a Mechanismus etnfernen MIT BEGRÜNDUNG	1
	 Sub7.7_b Mechanismus etnfernen OHNE BEGRÜNDUNG	

▲	🔍 Aussagen zu Thema 8	
	🔍 Sub8.1_a Kat 7 und 4 in 8 MIT BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub8.1_b Kat 7 und 4 in 8 OHNE BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub8.2_a Überschneidungen Kat 8 MIT BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub8.2_b Überschneidungen Kat 8 OHNE BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub8.3_a Renormalisierung MIT BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub8.3_b Renormalisierung OHNE BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub8.4_a K8.3 Qualitativ MIT BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub8.4_b K8.3 qualitativ OHNE BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub8.5_a K8.4 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	2
	🔍 Sub8.5_b K8.4 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub8.6_a K8.4 Bedeutung SM MIT BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub8.6_b K8.4 Bedeutung SM OHNE BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub8.7_a Experimente MIT BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub8.7_b Experimente OHNE BEGRÜNDUNG	1
▲	🔍 Aussagen zu Thema 9	
	🔍 Sub9.1_a Trennung Kosmologie MIT BEGRÜNDUNG	2
	🔍 Sub9.1_b Trennung Kosmologie OHNE BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub9.2_a ART MIT BEGRÜNDUNG	3
	🔍 Sub9.2_b ART OHNE BEGRÜNDUNG	2
	🔍 Sub9.3_a Zusammensetzung MIT BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub9.3_b Zusammensetzung OHNE BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub9.4_a CMB in K9.3 MIT BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub9.4_b CMB in K9.3 OHNE BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub9.5_a K9.1 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub9.5_b K9.1 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub9.6_a K9.3 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub9.6_b K9.3 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub9.7_a K9.2 und K9.4 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	2
	🔍 Sub9.7_b K9.2 und K9.4 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub9.8_a Gravitationswellen anpassen MIT BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub9.8_b Gravitationswellen anpassen OHNE BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub9.9_a WW Teilchen Kat 9 MIT BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub9.9_b WW Teilchen Kat 9 OHNE BEGRÜNDUNG	1
	🔍 Sub9.10_a Interdisziplinarität MIT BEGRÜNDUNG	
	🔍 Sub9.10_b Interdisziplinarität OHNE BEGRÜNDUNG	1

▲	🔍 Aussagen zu Thema 10	
🔍	Sub10.1_a Titel anpassen MIT BEGRÜNDUNG	2
🔍	Sub10.1_b Titel anpassen OHNE BEGRÜNDUNG	
🔍	Sub10.2_a K10.1, K10.2, K10.3 bleiben MIT BEGRÜNDUNG	1
🔍	Sub10.2_b K10.1, K10.2, K10.3 OHNE BEGRÜNDUNG	
🔍	Sub10.3_a K10.1, K10.2, K10.6 bleiben MIT BEGRÜNDUNG	1
🔍	Sub10.3_b K10.1, K10.2, K10.6 OHNE BEGRÜNDUNG	
🔍	Sub10.4_a K10.1 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	1
🔍	Sub10.4_b K10.1 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	
🔍	Sub10.5_a K10.2 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	4
🔍	Sub10.5_b K10.2 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	2
🔍	Sub10.6_a K10.4 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	3
🔍	Sub10.6_b K10.4 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	1
🔍	Sub10.7_a K10.5 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	3
🔍	Sub10.7_b K10.5 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	2
🔍	Sub10.8_a K10.6 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	1
🔍	Sub10.8_b K10.6 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	1
🔍	Sub10.9_a K10.7 entfernen MIT BEGRÜNDUNG	5
🔍	Sub10.9_b K10.7 entfernen OHNE BEGRÜNDUNG	
🔍	Sub10.10_a Modellkritik MIT BEGRÜNDUNG	
🔍	Sub10.10_b Modellkritik OHNE BEGRÜNDUNG	1
🔍	Sub10.11_a Interpretation MIT BEGRÜNDUNG	
🔍	Sub10.11_b Interpretation OHNE BEGRÜNDUNG	1
🔍	Sub10.12_a Weitere Fragen MIT BEGRÜNDUNG	1
🔍	Sub10.12_b Weitere Fragen OHNE BEGRÜNDUNG	

B.4 Runde 3: Reliabilitätsanalysen

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 1.1: Materieaufbau	.55	.43
K 1.2: Materiebausteine	.31	.53
K 1.3: Kernphysik u. Radioaktivität	.63	.37

Tabelle B.1: Reliabilitätsanalyse für „Die Struktur der Materie“ (Hauptkategorie 1) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.6$

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 2.1: Teilchenüberblick u. -klassifikation	.80	.59
K 2.2: Teilchenentdeckungen u. -suchen	.80	.62
K 2.3: Teilcheneigenschaften	.78	.69
K 2.4: Antiteilchen u. -materie	.81	.56
K 2.5: Zusammengesetzte Teilchen	.78	.67

Tabelle B.2: Reliabilitätsanalyse für „Teilchen in der Hochenergiephysik“ (Hauptkategorie 2) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.83$

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 3.1: Grundlagen aus der SRT	.76	.65
K 3.2: Grundlagen aus der QM	.70	.71
K 3.3: QFT; Feynman	.77	.64

Tabelle B.3: Reliabilitätsanalyse für „SRT u. QM mit Bezug zur TP; QFT“ (Hauptkategorie 3) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.81$

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 4.1: Fundamentale WW	.83	.70
K 4.2: Austauschteilchen	.84	.64
K 4.3: Ladungen	.83	.68
K 4.4: Reichweiten u. Stärken	.82	.73
K 4.5: WW u. makroskopische Kräfte	.84	.66

Tabelle B.4: Reliabilitätsanalyse für „Fundamentale Wechselwirkungen/Kräfte“ (Hauptkategorie 4) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.86$

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 5.1: Symmetrien	.84	.86
K 5.2: Erhaltungssätze u. -größen	.95	.53
K 5.3: Symmetrien u. Erhaltungen	.82	.90
K 5.4: Symmetrieverletzungen	.85	.85

Tabelle B.5: Reliabilitätsanalyse für „Symmetrien und Erhaltungsgrößen“ (Hauptkategorie 5) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.90$

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 6.1: Streuexperimente	.68	.65
K 6.2: Untersuchung v. Zerfällen	.68	.64
K 6.3: Spektroskopie v. Bindungszuständen	.76	.59

Tabelle B.6: Reliabilitätsanalyse für „Arten von Experimenten“ (Hauptkategorie 6) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.78$

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 7.1: SSB, Verst. Symmetrie	.92	.81
K 7.2: Higgs-Mechanismus	.83	.91
K 7.3: Higgs-Boson	.91	.82

Tabelle B.7: Reliabilitätsanalyse für „Higgs-Mechanismus u. -Boson“ (Hauptkategorie 7) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.92$

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 8.1: Facetten des SM	.85	.70
K 8.2: SM: Motivation u. Geschichte	.80	.76
K 8.3: SM: Erfolg, Genauigkeit	.78	.77

Tabelle B.8: Reliabilitätsanalyse für „Das Standardmodell“ (Hauptkategorie 8) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.86$

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 9.1: Ursprung u. Entwicklung Universum	.84	.84
K 9.2: Struktur Universum	.71	.84

Tabelle B.9: Reliabilitätsanalyse für „Kosmologie in der Teilchenphysik“ (Hauptkategorie 9) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.92$

Unterkategorie	Korrigierte Item-Skala-Korrelation	Cronbachs α ohne Item
K 10.1: Neutrino-Eigenschaften	.92	.81
K 10.2: Materie-Antimaterie-Asymmetrie	.89	.90
K 10.3: Dunkle Materie u. Energie	.90	.87
K 10.4: Vereinigung der Kräfte	.93	.77

Tabelle B.10: Reliabilitätsanalyse für „Offene Fragen der Teilchenphysik“ (Hauptkategorie 10) mit Stichprobengröße $N = 143$ und Cronbachs $\alpha = 0.93$

B.5 Runde 3: Faktorenanalysen

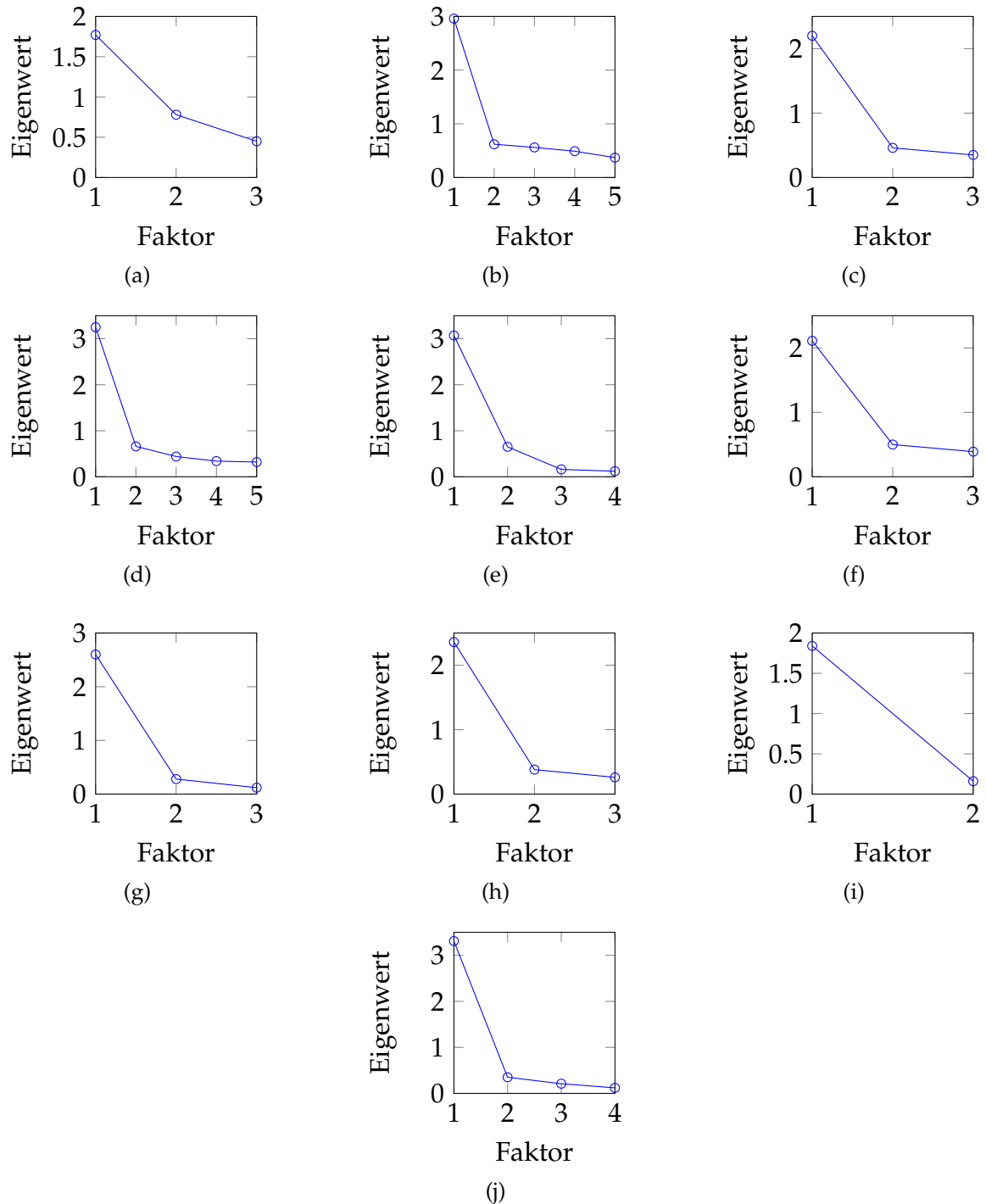


Abbildung B.1: Screeplots: Eigenwerte möglicher Faktoren in den Rating-Daten aus Runde 3. Verwendete Items aufsteigend aus a) Hauptkategorie 1 bis j) Hauptkategorie 10

Rotierte Komponentenmatrizen der Faktorenanalysen in Runde 3

Unterkategorie	Faktor 1
K 2.1: Teilchenüberblick u. -klassifikation	.74
K 2.2: Teilchenentdeckungen u. -suchen	.77
K 2.3: Teilcheneigenschaften	.82
K 2.4: Antiteilchen u. -materie	.71
K 2.5: Zusammengesetzte Teilchen	.81
Eigenwert:	2.96
% der Varianz:	59

Tabelle B.11: Rotierte Komponentenmatrix für die Unterkategorien aus Hauptkategorie 2.
Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin (nicht-orthogonal)

Unterkategorie	Faktor 1
K 3.1: Grundlagen aus der SRT	.85
K 3.2: Grundlagen aus der QM	.88
K 3.3: QFT; Feynman	.84
Eigenwert:	2.20
% der Varianz:	73

Tabelle B.12: Rotierte Komponentenmatrix für die Unterkategorien aus Hauptkategorie 3.
Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin (nicht-orthogonal)

Unterkategorie	Faktor 1
K 4.1: Fundamentale WW	.81
K 4.2: Austauscheteilchen	.78
K 4.3: Ladungen	.80
K 4.4: Reichweiten u. Stärken	.84
K 4.5: WW u. makroskopische Kräfte	.79
Eigenwert:	3.25
% der Varianz:	65

Tabelle B.13: Rotierte Komponentenmatrix für die Unterkategorien aus Hauptkategorie 4.
Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin (nicht-orthogonal)

Unterkategorie	Faktor 1
K 5.1: Symmetrien	.93
K 5.2: Erhaltungssätze u. -größen	.67
K 5.3: Symmetrien u. Erhaltungen	.95
K 5.4: Symmetrieverletzungen	.92
Eigenwert:	3.07
% der Varianz:	77

Tabelle B.14: Rotierte Komponentenmatrix für die Unterkategorien aus Hauptkategorie 5. Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin (nicht-orthogonal)

Unterkategorie	Faktor 1
K 6.1: Streuexperimente	.85
K 6.2: Untersuchung v. Zerfällen	.85
K 6.3: Spektroskopie v. Bindungszuständen	.81
Eigenwert:	2.11
% der Varianz:	70

Tabelle B.15: Rotierte Komponentenmatrix für die Unterkategorien aus Hauptkategorie 6. Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin (nicht-orthogonal)

Unterkategorie	Faktor 1
K 7.1: SSB; Versteckte Symmetrie	.91
K 7.2: Higgs-Mechanismus	.96
K 7.3: Higgs-Boson	.92
Eigenwert:	2.60
% der Varianz:	87

Tabelle B.16: Rotierte Komponentenmatrix für die Unterkategorien aus Hauptkategorie 7. Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin (nicht-orthogonal)

Unterkategorie	Faktor 1
K 8.1: Facetten des SM	.86
K 8.2: SM: Motivation u. Geschichte	.90
K 8.3: SM: Erfolg, Genauigkeit etc.	.90
Eigenwert:	2.36
% der Varianz:	79

Tabelle B.17: Rotierte Komponentenmatrix für die Unterkategorien aus Hauptkategorie 8.
Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin (nicht-orthogonal)

Unterkategorie	Faktor 1
K 9.1: Ursprung u. Entwicklung Universum	.96
K 9.2: Heutige Struktur Universum	.96
Eigenwert:	1.84
% der Varianz:	92

Tabelle B.18: Rotierte Komponentenmatrix für die Unterkategorien aus Hauptkategorie 9.
Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin (nicht-orthogonal)

Unterkategorie	Faktor 1
K 10.1: Neutrino-Eigenschaften	.89
K 10.2: Materie-Antimaterie-Asymmetrie	.95
K 10.3: Dunkle Materie u. Energie	.93
K 10.4: Vereinigung der Kräfte	.87
Eigenwert:	3.31
% der Varianz:	83

Tabelle B.19: Rotierte Komponentenmatrix für die Unterkategorien aus Hauptkategorie 10.
Extraktion: Hauptkomponentenanalyse. Rotationsmethode: oblimin (nicht-orthogonal)

B.6 Runde 3: Varianzanalysen

ANOVA mit Messwiederholung: Expertisedatensatz

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

Data: mydata_MainCats_exp_long_new

AIC	BIC	logLik
997.84	1053.185	-484.92

Random effects:

Formula: ~1 | Teilnehmer
(Intercept)

StdDev: 0.4490299

Formula: ~1 | Kategorie %in% Teilnehmer
(Intercept) Residual

StdDev: 0.7397947 0.2946807

Fixed effects: Rating ~ Kategorie

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	5.742857	0.1567839	340	36.62912	0.0000
KategorieHK1_b	-1.000000	0.1931371	340	-5.17767	0.0000
KategorieHK2	-0.428571	0.1931371	340	-2.21900	0.0271
KategorieHK3	-1.142857	0.1931371	340	-5.91734	0.0000
KategorieHK4	0.000000	0.1931371	340	0.00000	1.0000
KategorieHK5	-1.142857	0.1931371	340	-5.91734	0.0000
KategorieHK6	-0.771429	0.1931371	340	-3.99420	0.0001
KategorieHK7	-1.685714	0.1931371	340	-8.72807	0.0000
KategorieHK8	-1.314286	0.1931371	340	-6.80494	0.0000
KategorieHK9	-0.600000	0.1931371	340	-3.10660	0.0021
KategorieHK10	-1.285714	0.1931371	340	-6.65700	0.0000

Correlation:

	(Intr)	KtHK1_	KtgHK2	KtgHK3	KtgHK4	KtgHK5	KtgHK6	KtgHK7	KtgHK8	KtgHK9
KategorieHK1_b	-0.616									
KategorieHK2	-0.616	0.500								
KategorieHK3	-0.616	0.500	0.500							
KategorieHK4	-0.616	0.500	0.500	0.500						
KategorieHK5	-0.616	0.500	0.500	0.500	0.500					
KategorieHK6	-0.616	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500				
KategorieHK7	-0.616	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500			
KategorieHK8	-0.616	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500		
KategorieHK9	-0.616	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	
KategorieHK10	-0.616	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500

Standardized Within-Group Residuals:

Min	Q1	Med	Q3	Max
-1.33564580	-0.17339817	0.04385887	0.23569088	0.98325747

Number of Observations: 385

Number of Groups:

Teilnehmer	Kategorie %in% Teilnehmer
35	385

ANOVA mit Messwiederholung: Lehrkräftedatensatz

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

Data: mydata_MainCats_lul_long_new

AIC	BIC	logLik
3070.993	3142.114	-1521.497

Random effects:

Formula: ~1 | Teilnehmer
(Intercept)

StdDev: 0.6961356

Formula: ~1 | Kategorie %in% Teilnehmer
(Intercept) Residual

StdDev: 0.7234846 0.3063992

Fixed effects: Rating ~ Kategorie

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	5.722222	0.1014804	1070	56.38746	0e+00
KategorieHK1_b	-0.509259	0.1074175	1070	-4.74094	0e+00
KategorieHK2	-0.666667	0.1074175	1070	-6.20632	0e+00
KategorieHK3	-1.148148	0.1074175	1070	-10.68865	0e+00
KategorieHK4	-0.379630	0.1074175	1070	-3.53415	4e-04
KategorieHK5	-1.759259	0.1074175	1070	-16.37778	0e+00
KategorieHK6	-0.814815	0.1074175	1070	-7.58550	0e+00
KategorieHK7	-2.425926	0.1074175	1070	-22.58409	0e+00
KategorieHK8	-1.194444	0.1074175	1070	-11.11965	0e+00
KategorieHK9	-0.750000	0.1074175	1070	-6.98210	0e+00
KategorieHK10	-1.490741	0.1074175	1070	-13.87801	0e+00

Correlation:

(Intr)	KtHK1_	KtgHK2	KtgHK3	KtgHK4	KtgHK5	KtgHK6	KtgHK7	KtgHK8	KtgHK9
KategorieHK1_b	-0.529								

```

KategorieHK2  -0.529  0.500
KategorieHK3  -0.529  0.500  0.500
KategorieHK4  -0.529  0.500  0.500  0.500
KategorieHK5  -0.529  0.500  0.500  0.500  0.500
KategorieHK6  -0.529  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500
KategorieHK7  -0.529  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500
KategorieHK8  -0.529  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500
KategorieHK9  -0.529  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500
KategorieHK10 -0.529  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500  0.500

```

Standardized Within-Group Residuals:

```

          Min          Q1          Med          Q3          Max
-1.46531062 -0.19930382  0.03417481  0.24072621  1.08012671

```

Number of Observations: 1188

Number of Groups:

```

      Teilnehmer Kategorie %in% Teilnehmer
              108              1188

```

Faktorielle Mixed-ANOVA: Delphi-Gruppen im Gesamtdatensatz

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

Data: mydata_MainCats_comb_long_new

```

      AIC      BIC    logLik
4069.168 4203.186 -2009.584

```

Random effects:

```

Formula: ~1 | Teilnehmer
(Intercept)

```

StdDev: 0.6444724

```

Formula: ~1 | Kategorie %in% Teilnehmer
(Intercept) Residual

```

StdDev: 0.7273036 0.3040679

Fixed effects: Rating ~ Kategorie + Gremium + Kategorie:Gremium

```

              Value Std.Error   DF  t-value p-value
(Intercept)    5.742857 0.1733270 1410  33.13308  0.0000
KategorieHK1_b   -1.000000 0.1897732 1410  -5.26945  0.0000
KategorieHK2     -0.428571 0.1897732 1410  -2.25834  0.0241
KategorieHK3     -1.142857 0.1897732 1410  -6.02223  0.0000
KategorieHK4      0.000000 0.1897732 1410   0.00000  1.0000

```

```

KategorieHK5          -1.142857 0.1897732 1410 -6.02223 0.0000
KategorieHK6          -0.771429 0.1897732 1410 -4.06500 0.0001
KategorieHK7          -1.685714 0.1897732 1410 -8.88279 0.0000
KategorieHK8          -1.314286 0.1897732 1410 -6.92556 0.0000
KategorieHK9          -0.600000 0.1897732 1410 -3.16167 0.0016
KategorieHK10         -1.285714 0.1897732 1410 -6.77501 0.0000
GremiumLehrer        -0.020635 0.1994446 141 -0.10346 0.9177
KategorieHK1_b:GremiumLehrer 0.490741 0.2183690 1410 2.24730 0.0248
KategorieHK2:GremiumLehrer -0.238095 0.2183690 1410 -1.09033 0.2758
KategorieHK3:GremiumLehrer -0.005291 0.2183690 1410 -0.02423 0.9807
KategorieHK4:GremiumLehrer -0.379630 0.2183690 1410 -1.73848 0.0823
KategorieHK5:GremiumLehrer -0.616402 0.2183690 1410 -2.82276 0.0048
KategorieHK6:GremiumLehrer -0.043386 0.2183690 1410 -0.19868 0.8425
KategorieHK7:GremiumLehrer -0.740212 0.2183690 1410 -3.38973 0.0007
KategorieHK8:GremiumLehrer 0.119841 0.2183690 1410 0.54880 0.5832
KategorieHK9:GremiumLehrer -0.150000 0.2183690 1410 -0.68691 0.4923
KategorieHK10:GremiumLehrer -0.205026 0.2183690 1410 -0.93890 0.3479

```

Standardized Within-Group Residuals:

Min	Q1	Med	Q3	Max
-1.4495378	-0.1957261	0.0374566	0.2417811	1.0907683

Number of Observations: 1573

Number of Groups:

Teilnehmer	Kategorie %in% Teilnehmer
143	1573

Faktorielle Mixed-ANOVA: Berufsgruppen im Expertisedatensatz

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

Data: my_data_personen_eue_beruf_long

AIC	BIC	logLik
997.619	1096.45	-473.8095

Random effects:

Formula: ~1 | Teilnehmer
(Intercept)

StdDev: 0.4529566

Formula: ~1 | Kategorie %in% Teilnehmer
(Intercept) Residual

StdDev: 0.7162368 0.2865833

Fixed effects: Rating ~ Kategorie + Beruf + Kategorie:Beruf

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	5.772222	0.1682060	330	34.31639	0.0000
KategorieHK1_b	-1.138889	0.2051330	330	-5.55195	0.0000
KategorieHK2	-0.322222	0.2051330	330	-1.57080	0.1172
KategorieHK3	-1.133333	0.2051330	330	-5.52487	0.0000
KategorieHK4	-0.050000	0.2051330	330	-0.24374	0.8076
KategorieHK5	-1.082222	0.2051330	330	-5.27571	0.0000
KategorieHK6	-0.805556	0.2051330	330	-3.92699	0.0001
KategorieHK7	-1.772222	0.2051330	330	-8.63938	0.0000
KategorieHK8	-1.375992	0.2051330	330	-6.70780	0.0000
KategorieHK9	-0.565773	0.2051330	330	-2.75808	0.0061
KategorieHK10	-1.438889	0.2051330	330	-7.01442	0.0000
BerufBerufe 2 und 3	-0.205556	0.4450312	33	-0.46189	0.6472
KategorieHK1_b:BerufBerufe 2 und 3	0.972222	0.5427309	330	1.79135	0.0742
KategorieHK2:BerufBerufe 2 und 3	-0.744444	0.5427309	330	-1.37166	0.1711
KategorieHK3:BerufBerufe 2 und 3	-0.066667	0.5427309	330	-0.12284	0.9023
KategorieHK4:BerufBerufe 2 und 3	0.350000	0.5427309	330	0.64489	0.5194
KategorieHK5:BerufBerufe 2 und 3	-0.424444	0.5427309	330	-0.78205	0.4347
KategorieHK6:BerufBerufe 2 und 3	0.238889	0.5427309	330	0.44016	0.6601
KategorieHK7:BerufBerufe 2 und 3	0.605556	0.5427309	330	1.11576	0.2653
KategorieHK8:BerufBerufe 2 und 3	0.431944	0.5427309	330	0.79587	0.4267
KategorieHK9:BerufBerufe 2 und 3	-0.239588	0.5427309	330	-0.44145	0.6592
KategorieHK10:BerufBerufe 2 und 3	1.072222	0.5427309	330	1.97561	0.0490

Standardized Within-Group Residuals:

Min	Q1	Med	Q3	Max
-1.38064406	-0.19322195	0.03254845	0.24327818	0.90478717

Number of Observations: 385

Number of Groups:

Teilnehmer	Kategorie	%in%	Teilnehmer
35			385

Faktorielle Mixed-ANOVA: Länder im Lehrkräftedatensatz

Linear mixed-effects model fit by maximum likelihood

Data: my_data_personen_lul_long

AIC	BIC	logLik
3056.625	3183.625	-1503.312

Random effects:

Formula: ~1 | Teilnehmer
(Intercept)

StdDev: 0.6919175

Formula: ~1 | Kategorie %in% Teilnehmer
(Intercept) Residual

StdDev: 0.711729 0.3019276

Fixed effects: Rating ~ Kategorie + Land + Kategorie:Land

	Value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	5.663766	0.1527603	1060	37.07615	0.0000
KategorieHK1_b	-0.280787	0.1609805	1060	-1.74423	0.0814
KategorieHK2	-0.834688	0.1609805	1060	-5.18502	0.0000
KategorieHK3	-1.022654	0.1609805	1060	-6.35266	0.0000
KategorieHK4	-0.300443	0.1609805	1060	-1.86633	0.0623
KategorieHK5	-1.783447	0.1609805	1060	-11.07865	0.0000
KategorieHK6	-0.803482	0.1609805	1060	-4.99118	0.0000
KategorieHK7	-2.722115	0.1609805	1060	-16.90959	0.0000
KategorieHK8	-1.332071	0.1609805	1060	-8.27474	0.0000
KategorieHK9	-0.770288	0.1609805	1060	-4.78497	0.0000
KategorieHK10	-1.740965	0.1609805	1060	-10.81476	0.0000
LandNONDE	0.103497	0.2032626	106	0.50918	0.6117
KategorieHK1_b:LandNONDE	-0.404508	0.2142004	1060	-1.88846	0.0592
KategorieHK2:LandNONDE	0.297480	0.2142004	1060	1.38879	0.1652
KategorieHK3:LandNONDE	-0.222186	0.2142004	1060	-1.03728	0.2998
KategorieHK4:LandNONDE	-0.140200	0.2142004	1060	-0.65453	0.5129
KategorieHK5:LandNONDE	0.042824	0.2142004	1060	0.19992	0.8416
KategorieHK6:LandNONDE	-0.020064	0.2142004	1060	-0.09367	0.9254
KategorieHK7:LandNONDE	0.524401	0.2142004	1060	2.44818	0.0145
KategorieHK8:LandNONDE	0.243667	0.2142004	1060	1.13757	0.2556
KategorieHK9:LandNONDE	0.035919	0.2142004	1060	0.16769	0.8669
KategorieHK10:LandNONDE	0.443021	0.2142004	1060	2.06825	0.0389

Standardized Within-Group Residuals:

Min	Q1	Med	Q3	Max
-1.48028144	-0.20276628	0.03480268	0.23165287	1.02132459

Number of Observations: 1188

Number of Groups:

Teilnehmer	Kategorie %in% Teilnehmer
108	1188

	HK 1a	HK 1b	HK 2	HK 3	HK 4	HK 5	HK 6	HK 7	HK 8	HK 9
HK 1a	-									
HK 1b	.65	-								
HK 2	-	-	-							
HK 3	.73	-	-	-						
HK 4	-	.62	.54	.69	-					
HK 5	.72	-	.54	-	.72	-				
HK 6	.68	-	-	-	.69	-	-			
HK 7	.85	-	.73	-	.88	-	.66	-		
HK 8	.85	-	.66	-	.84	-	-	-	-	
HK 9	.66	-	-	-	.59	-	-	.70	.60	-
HK 10	.72	-	.56	-	.74	-	-	-	-	-

Tabelle B.20: Effektstärken R für paarweise Mittelwertvergleiche (t-Tests) der Hauptkategorieeneinschätzungen durch das Expertisegremium

	HK 1a	HK 1b	HK 2	HK 3	HK 4	HK 5	HK 6	HK 7	HK 8	HK 9
HK 1a	-									
HK 1b	.47	-								
HK 2	.56	-	-							
HK 3	.77	.50	.40	-						
HK 4	.42	-	-	.65	-					
HK 5	.81	.68	.61	.47	.73	-				
HK 6	.73	.27	-	.33	.43	.65	-			
HK 7	.91	.81	.81	.73	.87	.57	.84	-		
HK 8	.77	.47	.39	-	.61	.42	.38	.76	-	
HK 9	.60	-	-	.32	-	.63	-	.84	.41	-
HK 10	.79	.60	.56	-	.70	-	.54	.74	-	.63

Tabelle B.21: Effektstärken R für paarweise Mittelwertvergleiche (t-Tests) der Hauptkategorieeneinschätzungen durch die Lehrkräfte

- Aartsen, M. G., Abbasi, R., Abdou, Y., Ackermann, M., Adams, J., Aguilar, J. A., . . . Zoll, M. (2013). Measurement of South Pole ice transparency with the IceCube LED calibration system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 711, 73–89.
- Abell, S. K. (2007). Research on Science Teacher Knowledge. In S. K. Abell & N. G. Lederman (Hrsg.), *Handbook of Research on Science Education* (S. 1105–1149). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Ahlen, S., Balebanov, V. M., Battiston, R., Becker, U., Burger, J., Capell, M., . . . Zichichi, A. (1994). An antimatter spectrometer in space. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 350(1-2), 351–367.
- ALPHA Collaboration, Andresen, G. B., Ashkezari, M. D., Baquero-Ruiz, M., Bertsche, W., Butler, E., Cesar, C. L., . . . Yamazaki, Y. (2011). Confinement of antihydrogen for 1000 seconds. *Nature Physics*, 7(7), 558–564.
- Anderson, C. D. (1933). The Positive Electron. *Physical Review*, 43(6), 491–494.
- Anderson, J. R., Funke, J. & Plata, G. (Hrsg.). (2007). *Kognitive Psychologie*, Berlin: Spektrum Akadem. Verl.
- Artelt, C., Baumert, J., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M. & Schiefele, U. (Hrsg.). (2001). *PISA 2000. Zusammenfassung zentraler Befunde.*, Berlin: Max-Planck-Institut für Bildungsforschung.
- ATLAS Collaboration, Aad, G., Abajyan, T., Abbott, B., Abdallah, J., Abdel Khalek, S., Abdelalim, A. A., . . . Zwahlen, L. (2012). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.
- ATLAS Collaboration, Aad, G., Abat, E., Abdallah, J., Abdelalim, A. A., Abdesselam, A., Abidinov, O., . . . Zychacek, V. (2008). The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. *Journal of Instrumentation*, 3(08), S08003.
- ATLAS Outreach & Education. (2019). ATLAS Outreach & Education. Verfügbar 20. Mai 2019 unter <http://atlas.cern/resources/multimedia/outreach>
- Aubert, J. J., Becker, U., Biggs, P. J., Burger, J., Chen, M., Everhart, G., . . . Wu, S. L. (1974). Experimental Observation of a Heavy Particle J. *Physical Review Letters*, 33(23), 1404–1406.
- Augustin, J.-E., Boyarski, A., Breidenbach, M., Bulos, F., Dakin, J. T., Feldman, G. J., . . . Zipse, J. E. (1974). Discovery of a Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation. *Physical Review Letters*, 33(23), 1406–1408.

- BaBar Experiment, Aubert, B., Bona, M., Karyotakis, Y., Lees, J. P., Poireau, V., Principe, E., ... Wu, S. L. (2008). Observation of the bottomonium ground state in the decay Upsilon(3S)-gamma eta. *Physical Review Letters*, 101(7), 071801.
- Ball, D. L., Hill, H. C. & Bass, H. (2005). Knowing Mathematics for Teaching. *American Educator*, 29(3), 14–17.
- Balzer, L. (2005). *Wie werden Evaluationsprojekte erfolgreich? Ein integrierender theoretischer Ansatz und eine empirische Studie zum Evaluationsprozess*. Landau: Verl. Empirische Pädagogik.
- Bartlett, M. (1937). Properties of Sufficiency and Statistical Tests. *Proceedings of the Royal Statistical Society Series A*, 160, 268–282.
- Baumert, J., Kunter, M., Blum, W., Klusmann, U., Krauss, S. & Neubrand, M. (2011). Professionelle Kompetenz von Lehrkräften, kognitiv aktivierender Unterricht und die mathematische Kompetenz von Schülerinnen und Schülern (COACTIV) - Ein Forschungsprogramm. In M. Kunter, J. Baumert, W. Blum & M. Neubrand (Hrsg.), *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften* (S. 7–25). Münster: Waxmann.
- Baumert, J. & Kunter, M. (2006). Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 9(4), 469–520.
- Baumert, J. & Kunter, M. (2011). Das Kompetenzmodell von COACTIV. In M. Kunter, J. Baumert, W. Blum & M. Neubrand (Hrsg.), *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften* (S. 29–53). Münster: Waxmann.
- Berger, C. (2014). *Elementarteilchenphysik: Von den Grundlagen zu den modernen Experimenten* (3., aktualisierte und überarb. Aufl.). Berlin: Springer Spektrum.
- Berners-Lee, T. (1989). Information Management: A Proposal. Verfügbar 19. Oktober 2020 unter <http://www.w3.org/History/1989/proposal.html>
- Bernholt, S., Parchmann, I. & Labudde, P. (2010). *Kompetenzmodellierung in der Chemie: Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*. Berlin: Logos-Verl.
- Bleck-Neuhaus, J. (2013). *Elementare Teilchen: Von den Atomen über das Standard-Modell bis zum Higgs-Boson* (2. Auflage). Berlin: Springer Spektrum.
- Blind, K. & Cuhls, K. (2001). Der Einfluss der Expertise auf das Antwortverhalten in Delphi-Studien: ein Hypothesentest. *ZUMA Nachrichten*, 25(49), 57–80.
- Blömeke, S., Gustafsson, J.-E. & Shavelson, R. J. (2015). Beyond Dichotomies: Competence Viewed as a Continuum. *Zeitschrift für Psychologie*, 223(1), 3–13.
- Bohr, N. (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules. *Philosophical Magazine*, 26, 1–25.

- Borko, H. & Putnam, R. (1996). Learning to Teach. In D. Berliner & R. Calfee (Hrsg.), *Handbook of Educational Psychology* (S. 673–708). New York: McMillan.
- Bransford, J., Darling-Hammond, L. & LePage, P. (2005). Introduction. In L. Darling-Hammond & J. Bransford (Hrsg.), *Preparing teachers for a changing world* (S. 1–39). San Francisco, CA: Jossey-Bass.
- Breidenbach, M., Friedman, J. I., Kendall, H. W., Bloom, E. D., Coward, D. H., DeStaeble, H., ... Taylor, R. E. (1969). Observed Behavior of Highly Inelastic Electron-Proton Scattering. *Phys. Rev. Lett.*, 23(16), 935–939.
- Bromme, R. (1992). *Der Lehrer als Experte: Zur Psychologie des professionellen Wissens* (1. Aufl.). Bern: Huber.
- Bromme, R. (1997). Kompetenzen, Funktionen und unterrichtliches Handeln des Lehrers. In F. E. Weinert, N. Birbaumer & C. F. Graumann (Hrsg.), *Psychologie des Unterrichts und der Schule* (S. 177–212). Göttingen: Hogrefe Verl. für Psychologie.
- Brüning, O. S., Poole, J., Collier, P., Lebrun, P., Ostojic, R., Myers, S. & Proudlock, P. (2004). *LHC Design Report*. Geneva: CERN.
- Cauet, E. (2016). *Testen wir relevantes Wissen? Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten*. Berlin: Logos Verlag.
- CDF Collaboration, Abe, F., Akimoto, H., Akopian, A., Albrow, M. G., Amendolia, S. R., Amidei, D., ... Zucchelli, S. (1995). Observation of Top Quark Production in p-bar p Collisions with the Collider Detector at Fermilab. *Physical review letters*, 74(14), 2626–2631.
- CERN Press Office. (2018). Applications of CERN Technologies in Society. Verfügbar 12. Oktober 2018 unter <https://kt.cern/cern-technologies-society?utm>
- Chadwick, J. (1932). Possible Existence of a Neutron. *Nature*, 129, 312.
- CMS Collaboration, Chatrchyan, S., Khachatryan, V., Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Aguilo, E., ... Wenman, D. (2012). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Commons, M. L., Trudeau, E. J., Stein, S. A., Richards, F. A. & Krause, S. R. (1998). Hierarchical Complexity of Tasks Shows the Existence of Developmental Stages. *Developmental Review*, 18(3), 237–278.
- Compton, A. H. (1923). A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements. *Physical Review*, 21(5), 483–502.
- Cortina, J. M. (1993). What is coefficient alpha? An examination of theory and applications. *Journal of Applied Psychology*, 78(1), 98–104.

- Cowan, C. L., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W. & McGuire, A. D. (1956). Detection of the Free Neutrino: a Confirmation. *Science (New York, N.Y.)*, 124, 103–104.
- D0 Collaboration, Abachi, S., Abbott, B., Abolins, M., Acharya, B. S., Adam, I., Adams, D. L., . . . Zylberstejn, A. (1995). Observation of the Top Quark. *Physical review letters*, 74(14), 2632–2637.
- Dalkey, N. & Helmer, O. (1963). An Experimental Application of the Delphi Method to the Use of Experts. *Management Science*, 9(3), 458–467.
- Dalton, J. (1805). On the Absorption of Gases by Water and Other Liquids. *Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester*, 2(1), 271–287.
- de Jong, T. & Ferguson-Hessler, M. G. M. (1996). Types and Qualities of Knowledge. *Educational Psychologist*, 31, 105–113.
- Demtröder, W. (2017). *Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik* (5. Auflage). Berlin: Springer Spektrum.
- Depaepe, F., Verschaffel, L. & Kelchtermans, G. (2013). Pedagogical content knowledge: A systematic review of the way in which the concept has pervaded mathematics educational research. *Teaching and Teacher Education*, 34, 12–25.
- DESY. (2018). Standardmodell der Teilchenphysik. Verfügbar 23. Dezember 2018 unter http://www.desy.de/e409/e116959/e119238/media/5999/2002-02-11_S.M.-Grafik_stufig.jpg
- Dirac, P. A. M. (1928). The Quantum Theory of the Electron. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 117(778), 610–624.
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322(6), 132–148.
- Erler, J. & Schott, M. (2019). Electroweak Precision Tests of the Standard Model after the Discovery of the Higgs Boson. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 106, 86–119.
- Europäische Union. (2016). Verordnung (EU) des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG (Datenschutz-Grundverordnung): Verordnung (EU) 2016/679.
- Fenstermacher, G. (1994). The Knower and the Known: The Nature of Knowledge in Research on Teaching. *Review of Research in Education*, 20, 3–56.

- Feynman, R. P. (1949). Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics. *Physical Review*, 76(6), 769–789.
- Feynman, R. P. (1985). *QED - die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München: Piper.
- Field, A., Miles, J. & Field, Z. (2012). *Discovering statistics using R*. Los Angeles: Sage.
- Fischer, H. E., Borowski, A. & Tepner, O. (2012). Professional Knowledge of Science Teachers. In B. J. Fraser, K. Tobin & C. J. McRobbie (Hrsg.), *Second International Handbook of Science Education* (S. 435–448). Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V.
- Fraunhofer ISI. (2009). Foresight-Prozess im Auftrag des BMBF: Zukunftsfelder neuen Zuschnitts. Verfügbar 2. April 2019 unter [https://www.bmbf.de/files/44Foresight-Prozess_BMBF_Zukunftsfelder_neuen_Zuschnitts\(5\).pdf](https://www.bmbf.de/files/44Foresight-Prozess_BMBF_Zukunftsfelder_neuen_Zuschnitts(5).pdf)
- Friege, G. & Lind, G. (2004). Leistungsmessung im Leistungskurs. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 57(5), 259–265.
- Fritzsche, H., Gell-Mann, M. & Leutwyler, H. (1973). Advantages of the color octet gluon picture. *Physics Letters B*, 47(4), 365–368.
- Fritzsche, H. & Gell-Mann, M. (1972). Current algebra: Quarks and what else? 16. *International Conference on High energy physics*, 2, 135.
- Früh, W. (2011). *Inhaltsanalyse: Theorie und Praxis* (7., überarb. Aufl.). Konstanz: UVK-Verl.-Ges.
- Geiger, H. & Marsden, E. (1909). On a Diffuse Reflection of Alpha-Particles. *Proceedings of the Royal Society* 82A, 495–500.
- Gell-Mann, M. (1961). The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry. *California Institute of Technology Report CTSL-20*.
- Gell-Mann, M. (1964). A schematic model of baryons and mesons. *Physics Letters B*, 8, 214.
- George, D. & Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference, 11.0 update* (4th ed.). Boston: A & B.
- Gess-Newsome, J. (2015). A model of teacher professional knowledge and skill including PCK: Results of the thinking from the PCK Summit. In A. Berry, P. Friedrichsen & J. Loughran (Hrsg.), *Re-examining Pedagogical Content Knowledge in Science Education* (S. 28–42). New York: Routledge.
- Glaser, B. G. & Strauss, A. L. (1967). *The discovery of grounded theory*. Chicago: Aldine.
- Glashow, S. L. (1959). The renormalizability of vector meson interactions. *Nuclear Physics*, 10, 107–117.

- Gramzow, Y., Riese, J. & Reinhold, P. (2013). Modellierung fachdidaktischen Wissens angehender Physiklehrkräfte. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 19, 7–30.
- Griffiths, D. J. (2011). *Introduction to elementary particles* (2. $\frac{1}{4}$ berarb. Auflage). Weinheim: Wiley-VCH.
- Grossman, P., Schoenfeld, A. & Lee, C. (2005). Teaching Subject Matter. In L. Darling-Hammond & J. Bransford (Hrsg.), *Preparing teachers for a changing world* (S. 201–231). San Francisco, CA: Jossey-Bass.
- Gruber, H. (2008). Lernen und Wissenserwerb. In W. Schneider, M. Hasselhorn & J. Bengel (Hrsg.), *Handbuch der pädagogischen Psychologie* (S. 95–104). Göttingen: Hogrefe.
- Häder, M. (2014). *Delphi-Befragungen: Ein Arbeitsbuch* (3. Aufl.). Wiesbaden: Springer VS.
- Häder, M. & Häder, S. (1994). Die Grundlagen der Delphi-Methode: ein Literaturbericht. *ZUMA-Arbeitsbericht*, 54(2).
- Haller, J., Hoecker, A., Kogler, R., Mönig, K., Peiffer, T. & Stelzer, J. (2018). Update of the global electroweak fit and constraints on two-Higgs-doublet models. *The European Physical Journal C*, 78(8), 493.
- Hedderich, J. & Sachs, L. (2018). *Angewandte Statistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Heinze, A., Dreher, A., Lindmeier, A. & Niemand, C. (2016). Akademisches versus schulbezogenes Fachwissen – ein differenzierteres Modell des fachspezifischen Professionswissens von angehenden Mathematiklehrkräften der Sekundarstufe. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 19(2), 329–349.
- Helmke, A. (2009). *Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität: Diagnose, Evaluation und Verbesserung des Unterrichts* (1. Aufl.). Stuttgart: Klett und Klett Kallmeyer.
- Herb, S. W., Hom, D. C., Lederman, L. M., Sens, J. C., Snyder, H. D., Yoh, J. K., ... Kephart, R. D. (1977). Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions. *Physical Review Letters*, 39(5), 252–255.
- Higgs, P. W. (1964). Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. *Physical Review Letters*, 13(16), 508–509.
- Hill, H. C., Rowan, B. & Ball, D. L. (2005). Effects of Teachers' Mathematical Knowledge for Teaching on Student Achievement. *American Educational Research Journal*, 42(2), 371–406.
- Hill, H. C., Schilling, S. & Ball, D. L. (2004). Developing Measures of Teachers' Mathematics Knowledge for Teaching. *Elementary School Journal*, 105(1), 11–30.

- Hohls, R., Schröder, I. & Siegrist, H. (2005). *Europa und die Europäer: Quellen und Essays zur modernen europäischen Geschichte; [Festschrift für Hartmut Kaelble zum 65. Geburtstag]*. Stuttgart: Steiner.
- IPPOG. (2019). International Particle Physics Outreach Group. Verfügbar 20. Mai 2019 unter <http://ippog.org/>
- Jolliffe, I. T. (1986). *Principal Component Analysis*. New York, NY: Springer New York.
- Kaiser, H. (1960). The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 141–151.
- Kaiser, H. (1970). A Second-generation little jiffy. *Psychometrika*, 35, 401–415.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(3), 3–18.
- Kirschner, S. (2013). *Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften*. Berlin: Logos.
- Kirschner, S., Borowski, A., Fischer, H. E., Gess-Newsome, J. & von Aufschnaiter, C. (2016). Developing and evaluating a paper-and-pencil test to assess components of physics teachers' pedagogical content knowledge. *International Journal of Science Education*, 38(8), 1343–1372.
- Klieme, E., Avenarius, H., Blum, W., Döbrich, P., Gruber, H., Prenzel, M., ... Vollmer, H. J. (2003). *Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards. Eine Expertise*. Berlin.
- Klieme, E. & Leutner, D. (2006). Kompetenzmodelle zur Erfassung individueller Lernergebnisse und zur Bilanzierung von Bildungsprozessen. Beschreibung eines neu eingerichteten Schwerpunktprogramms der DFG. *Zeitschrift für Pädagogik*, 52(6), 876–903.
- Kobel, M., Bilow, U., Lindenau, P., Bachmann, G. & Schorn, B. (2018). *Forschungsmethoden*. Hamburg: Joachim Hertz Stiftung.
- Kobel, M., Bilow, U., Lindenau, P. & Schorn, B. (2017). *Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen*. Hamburg: Joachim Hertz Stiftung.
- Krauss, S., Blum, W., Brunner, M., Neubrand, M., Baumert, J., Kunter, M., ... Neubrand, M. (2011). Konzeptualisierung und Testkonstruktion zum fachbezogenen Professionswissen von Mathematiklehrkräften. In M. Kunter, J. Baumert, W. Blum & M. Neubrand (Hrsg.), *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften* (S. 135–161). Münster: Waxmann.
- Krauss, S., Lindl, A., Schilcher, A., Fricke, M., Göhring, A., Hofmann, B., ... Mulder, R. H. (Hrsg.). (2017). FALKO: Fachspezifische Lehrerkompetenzen: Kon-

- zeption von Professionswissenstests in den Fächern Deutsch, Englisch, Latein, Physik, Musik, Evangelische Religion und Pädagogik : Mit neuen Daten aus der COACTIV-Studie, Münster: Waxmann.
- Krauss, S., Lindl, A., Schilcher, A. & Tepner, O. (2017). Das Forschungsprojekt FALKO - ein einleitender Überblick. In S. Krauss, A. Lindl, A. Schilcher, M. Fricke, A. Göhring, B. Hofmann & et al. (Hrsg.), *FALKO: Fachspezifische Lehrerkompetenzen* (S. 9–65). Münster: Waxmann.
- Krauss, S., Neubrand, M., Blum, W., Baumert, J., Brunner, M., Kunter, M. & Jordan, A. (2008). Die Untersuchung des professionellen Wissens deutscher Mathematik-Lehrerinnen und -Lehrer im Rahmen der COACTIV-Studie. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 29(3-4), 233–258.
- Kröger, J., Euler, M., Neumann, K. & Petersen, S. (2012). Messung Professioneller Kompetenz im Fach Physik. In S. Bernholt (Hrsg.), *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht* (S. 616–618). Münster: LIT.
- Kuckartz, U. (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung* (3. überarbeitete Auflage). Weinheim: Beltz Juventa.
- Kunina-Habenicht, O., Lohse-Bossenz, H., Kunter, M., Dicke, T., Förster, D., Gößling, J., ... Terhart, E. (2012). Welche bildungswissenschaftlichen Inhalte sind wichtig in der Lehrerbildung? *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 15(4), 649–682.
- Kunter, M., Baumert, J., Blum, W. & Neubrand, M. (Hrsg.). (2011). Professionelle Kompetenz von Lehrkräften: Ergebnisse des Forschungsprogramms COACTIV, Münster: Waxmann.
- Leiner, D. (2019). SoSci Survey. Verfügbar 19. Oktober 2020 unter <https://www.soscisurvey.de>
- Leuders, T., Nückles, M., Mikelskis-Seifert, S. & Philipp, K. (2015a). Fachbezogene Pädagogische Kompetenzen und Wissenschaftsverständnis. In T. Leuders, M. Nückles, S. Mikelskis-Seifert & K. Philipp (Hrsg.), *Pädagogische Professionalität in Mathematik und Naturwissenschaften* (S. 3–44). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Leuders, T., Nückles, M., Mikelskis-Seifert, S. & Philipp, K. (Hrsg.). (2015b). Pädagogische Professionalität in Mathematik und Naturwissenschaften, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Lipowsky, F. (2006). Auf den Lehrer kommt es an. Empirische Evidenzen für Zusammenhänge zwischen Lehrerkompetenzen, Lehrerhandeln und dem Lernen der Schüler. In C. Allemann-Ghionda & E. Terhart (Hrsg.), *Kompetenzen und Kompetenzentwicklung von Lehrerinnen und Lehrern* (S. 47–70). Weinheim: Beltz.

- Marcastel, F. (2006). The ATLAS Experiment: From Fundamental Science to Everyone's Life. Verfügbar 12. Oktober 2018 unter <https://cds.cern.ch/record/1019620?ln=de>
- MARK-J Collaboration, Barber, D. P., Becker, U., Benda, H., Boehm, A., Branson, J. G., Bron, J., . . . Zhu, R. (1979). Discovery of Three-Jet Events and a Test of Quantum Chromodynamics at PETRA. *Physical Review Letters*, 43(12), 830–833.
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (12., überarb. Aufl.). Weinheim: Beltz.
- Millikan, R. A. (1913). On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant. *Physical Review*, 2(2), 109–143.
- Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg. (2016). Bildungsplan des Gymnasiums: Physik. Verfügbar 3. Februar 2020 unter http://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lsbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW_ALLG_GYM_PH.pdf
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen. (2014). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik. Verfügbar 19. Oktober 2020 unter https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOSt_Physik.pdf
- Ne'eman, Y. (1961). Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance. *Nuclear Physics*, 26, 222–229.
- Ne'eman, Y. & Kirsh, Y. (1995). Berlin: Springer-Verlag.
- Neddermeyer, S. H. & Anderson, C. D. (1937). Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles. *Physical Review*, 51, 884.
- Netzwerk Teilchenwelt. (2018). Einführungsvortrag Masterclasses für Vermittler. Verfügbar 23. Dezember 2018 unter https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Vermittler/Masterclass_Vorlage_Einfuehrungsvortrag_171207.pdf
- Netzwerk Teilchenwelt. (2019). Netzwerk Teilchenwelt. Verfügbar unter <https://www.teilchenwelt.de/>
- Neumann, I., Pigge, C. & Heinze, A. (2018). Mathematische Lernvoraussetzungen für MINT-Studiengänge aus Sicht der Hochschulen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik*, 105, 22–26.
- Noether, E. (1918). Invariante Variationsprobleme. *Gött. Nachr.*, 235–257.
- Paris, S. G., Lipson, M. Y. & Wixson, K. K. (1983). Becoming a strategic reader. *Contemporary Educational Psychology*, 8(3), 293–316.

- Particle Data Group, Tanabashi, M., Hagiwara, K., Hikasa, K., Nakamura, K., Sumino, Y., Takahashi, F., . . . Zyla, P. A. (2018). Review of Particle Physics. *Physical Review D*, 98(3).
- Pauli, W. (1930). *The proposal of the neutrino: Brief an die Gruppe der Radioaktiven*.
- Perl, M. L., Abrams, G. S., Boyarski, A. M., Breidenbach, M., Briggs, D. D., Bulos, F., . . . Wiss, J. (1975). Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+e^- Annihilation. *Physical Review Letters*, 35(22), 1489–1492.
- PLUTO Collaboration, Berger, Ch., Genzel, H., Grigull, R., Lackas, W., Raupach, F., Klovning, A., . . . Wacker, K. (1979). Evidence for gluon bremsstrahlung in e^+e^- annihilations at high energies. *Physics Letters B*, 86(3-4), 418–425.
- Povh, B., Rith, K., Scholz, C., Zetsche, F. & Rodejohann, W. (2014). *Teilchen und Kerne: Eine Einführung in die physikalischen Konzepte* (9. Aufl.). Berlin: Springer Spektrum.
- R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Wien, Österreich.
- Resag, J. (2010). *Die Entdeckung des Unteilbaren: Quanten, Quarks und der LHC*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Riese, J. (2009). *Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften*. Berlin: Logos-Verl.
- Riese, J., Kulgemeyer, C., Zander, S., Borowski, A., Fischer, H. E., Gramzow, Y., . . . Tomczyszyn, E. (2015). Modellierung und Messung des Professionswissens in der Lehramtsausbildung Physik. *Zeitschrift für Pädagogik*, (Beiheft 61), 55–79.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2010). Empirische Erkenntnisse zur Struktur professioneller Handlungskompetenz von angehenden Physiklehrkräften. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 167–187.
- Riese, J. & Reinhold, P. (2012). Die professionelle Kompetenz angehender Physiklehrkräfte in verschiedenen Ausbildungsformen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 15(1), 111–143.
- Rutherford, E. (1911). The Scattering of Alpha and Beta Particles by Matter and the Structure of the Atom. *Philosophical Magazine*, 21(6), 669–688.
- Rutherford, E. (1919). Collision of Alpha Particles with Light Atoms IV: An Anomalous Effect in Nitrogen. *Philosophical Magazine*, 37(6), 581–587.
- Salam, A. & Ward, J. C. (1959). Weak and electromagnetic interactions. *Il Nuovo Cimento*, 11(4), 568–577.

- Schaper, N., Fuchs, C., Wüsten, S., Sandmann, A. & Neuhaus, B. (2009). Aufgabengebiete und Perspektiven bei der Kompetenzmodellierung und -messung in der Lehrerbildung. *Lehrerbildung auf dem Prüfstand*, 2(1), 166–199.
- Schecker, H. & Parchmann, I. (2006). Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 12, 45–66.
- Schödl, A. & Göhring, A. (2017). FALKO-P: Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften. In S. Krauss, A. Lindl, A. Schilcher, M. Fricke, A. Göhring, B. Hofmann & et al. (Hrsg.), *FALKO: Fachspezifische Lehrerkompetenzen* (S. 201–244). Münster: Waxmann.
- Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik*, 384(4), 361–376.
- Schwab, J. (1978). *Science, curriculum and liberal education*. Chicago: University of Chicago Press.
- Shavelson, R. J., Ruiz-Primo, M. A. & Wiley, E. W. (2005). Windows into the Mind. *Higher Education*, 49(4), 413–430.
- Shulman, L. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4–14.
- Shulman, L. (1987). Knowledge and Teaching Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1–23.
- Smith, J. A. (1996). Beyond the divide between cognition and discourse: Using interpretative phenomenological analysis in health psychology. *Psychology & Health*, 11(2), 261–271.
- Sorge, S., Kröger, J. & Neumann, K. (2017). Die Modellierung und Entwicklung professioneller Kompetenz von Lehramtsstudierenden im Fach Physik. In H. Fischler & E. Sumfleth (Hrsg.), *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik* (S. 21–37). Berlin: Logos Verlag.
- Sorge, S., Kröger, J., Petersen, S. & Neumann, K. (2017). Structure and development of pre-service physics teachers' professional knowledge. *International Journal of Science Education*, 28(10), 1–28.
- Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. (2004). Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik (Beschluss der Kultusministerkonferenz 01.12.1989 i.d.F. vom 05.02.2004).
- Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. (2005). Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss: Beschluss vom 16.12.2004. München: Luchterhand.

- Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. (2017). Ländergemeinsame inhaltliche Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.10.2008 i. d. F. vom 12.10.2017. Bonn.
- Streater, R. F. & Wightman, A. S. (2000). *PCT, spin and statistics, and all that*. Princeton, N.J: Princeton University Press.
- TASSO Collaboration, Brandelik, R., Braunschweig, W., Gather, K., Kadansky, V., Lübelmeyer, K., Mättig, P., . . . Wallraff, W. (1979). Evidence for planar events in $e+e-$ annihilation at high energies. *Physics Letters B*, 86(2), 243–249.
- Tepner, O., Borowski, A., Dollny, S., Fischer, H. E., Jüttner, M., Kirschner, S., . . . Wirth, J. (2012). Modell zur Entwicklung von Testitems zur Erfassung des Professionswissens von Lehrkräften in den Naturwissenschaften. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 9–30.
- Terhart, E. (2002). *Standards für die Lehrerbildung: Eine Expertise für die Kultusministerkonferenz*. Westfälische Wilhelms-Universität Münster: ZKL.
- Thomson, J. J. (1897). Cathode Rays. *Philosophical Magazine*, 44, 293.
- Tipler, P. A., Baumgartner, M., Gedieh, D. & Götz, J. (Hrsg.). (1994). Physik, Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2004). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. München: Spektrum Akademischer Verlag.
- UA1 Collaboration, Arnison, G., Astbury, A., Aubert, B., Bacci, C., Bauer, G., Bezaguet, A., . . . Zurfluh, E. (1983). Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around 95 GeV/c² at the CERN SPS collider. *Physics Letters B*, 126(5), 398–410.
- UA2 Collaboration, Bagnaia, P., Bannerf, M., Battiston, R., Bloch, P., Bonaudi, F., Borer, K., . . . Zeller, W. (1983). Evidence for $Z^0 \rightarrow e+e-$ at the CERN p collider. *Physics Letters B*, 129(1-2), 130–140.
- VERBI Software. (1989-2019). MAXQDA, Software für qualitative Datenanalyse. Berlin, Deutschland: VERBI Software. Consult. Sozialforschung GmbH.
- Vogelsang, C., Borowski, A., Fischer, H., Kulgemeyer, C., Reinhold, P., Riese, J. & Schecker, H. (2016). ProfiLe-P+ - Professionskompetenz im Lehramtsstudium Physik. In O. Zlatkin-Troitschanskaia, H. A. Pan, C. Lautenbach & M. Toeppner (Hrsg.), *Kompetenzmodelle und Instrumente der Kompetenzerfassung im Hochschulsektor – Validierungen und methodische Innovationen (KoKoHs): Übersicht der Forschungsprojekte (KoKoHs Working Papers, 10)* (S. 39–43). Berlin und Mainz: Humboldt University und Johannes Gutenberg University.

- Vogelsang, C. (2014). *Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften: Zusammenhangsanalysen zwischen Lehrerkompetenz und Lehrerperformanz*. Berlin: Logos Berlin.
- Voss, T., Kunter, M. & Baumert, J. (2011). Assessing teacher candidates' general pedagogical/psychological knowledge: Test construction and validation. *Journal of Educational Psychology*, 103(4), 952–969.
- Weinberg, S. (1967). A Model of Leptons. *Physical Review Letters*, 19(21), 1264–1266.
- Weinert, F. E. (2001). Vergleichende Leistungsmessung in Schulen - eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In F. E. Weinert (Hrsg.), *Leistungsmessungen in Schulen* (S. 17–31). Weinheim: Beltz.
- Weltmaschine. (2018). Physik, CERN und LHC. Verfügbar 2. Oktober 2018 unter <https://www.weltmaschine.de/>
- Wirtz, M. A. (Hrsg.). (2014). *Dorsch - Lexikon der Psychologie*, Bern: Hogrefe Verlag.
- Wirtz, M. A. & Caspar, F. (2002). *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität: Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Zuverlässigkeit von Einschätzungen mittels Kategoriensystemen und Ratingskalen*. Göttingen: Hogrefe Verl. für Psychologie.
- Woitkowski, D. (2015). *Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung: Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung*. Berlin: Logos-Verl.
- Woitkowski, D. & Borowski, A. (2017). Fachwissen im Lehramtsstudium Physik. In H. Fischler & E. Sumfleth (Hrsg.), *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik* (S. 57–74). Berlin: Logos Verlag.
- Woitkowski, D. & Riese, J. (2017). Kriterienorientierte Konstruktion eines Kompetenzniveaumodells im physikalischen Fachwissen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 9(4), 469–483.
- Woitkowski, D., Riese, J. & Reinhold, P. (2011). Modellierung fachwissenschaftlicher Kompetenz angehender Physiklehrkräfte. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, (17), 289–313.
- Yukawa, H. (1935). On the interaction of elementary particles I. *Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan*, 17(3), 48–57.
- Zweig, G. (1964). An SU3 model for strong interaction symmetry and its breaking. *Developments in the Quark Theory of Hadrons*, 22–101.

Danksagungen

*Ich bin heute unseren Spuren gefolgt.
Ich ging unsere Wege noch einmal
und weißt du was:
Häufig musste ich lächeln
bei der Erinnerung an das,
was wir gemeinsam am Wegesrand bestaunten.
Irgendwo
auf diesen Serpentinien,
die sich durch unsere Zeit schlängelten,
hab ich deine Hand losgelassen.
Ich wäre nie so weit gekommen ohne dich.*

An dieser Stelle möchte ich mich von Herzen bei all jenen Personen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Silke, dir danke ich als Erstes für die Ermöglichung, solch ein spannendes Promotionsthema zu bearbeiten sowie vor allem für deine immer verfügbaren Ratschläge und genialen Ideen. Danke auch dafür, dass du mich hast meine eigenen Wege gehen lassen! Und danke, dass ich auch weiterhin bei dir in der Arbeitsgruppe tätig sein kann.

Lieber Markus, vielen Dank für deine Unterstützung als zweiter Betreuer, für deine fachkundigen Vorschläge bezüglich der teilchenphysikalischen Seite meiner Arbeit sowie für deine immer herzliche Anteilnahme.

Manuela, dir danke ich dafür, dass du ohne Zögern die Rolle als meine Mentorin angenommen hast und mir sehr hilfreiche, weil ehrliche und einfühlsame, Einblicke in den Alltag von Wissenschaftlerinnen in der Fachdidaktikforschung gegeben hast. Ich habe mich in Heidelberg bei dir und deiner tollen Truppe immer sehr gut aufgehoben gefühlt!

Mein Dank gilt ebenfalls Sascha Schmeling am CERN, ohne welchen ich niemals derart viele Lehrkräfte gefunden hätte, die bereitwillig an meinen Studien teilgenommen haben. Solch eine Unterstützung ist nicht selbstverständlich, danke dafür.

Der Physikabteilung an der PH Freiburg - allen voran Martina - danke ich für viele unterhaltsame Stunden beim Mittagessen, Grillen, Weihnachtsfeiern und beim Wein- fest sowie für den ein oder anderen guten Tipp.

Bille, du hast in vielen, vielen Stunden meine überaus umfangreiche Arbeit Korrektur gelesen und neben Rechtschreibung und Genderhinweisen auch immer den roten Faden mit im Auge behalten. Dafür kann ich dir gar nicht genug danken. Du bist

einfach toll und schon immer die beste Patin gewesen, die es gibt. Tausend Küsse! Meiner restlichen Familie, allen voran meinen liebevollen Eltern, danke ich für ihre jahrzehntelange finanzielle und seelisch-moralische Unterstützung. Ohne beides wäre ich niemals soweit gekommen. Danke, dass ihr mir immer alles ermöglicht habt und meinen Weg mit mir gegangen seid!

Marius, dir möchte ich ebenfalls danken für deine jahrelange Freundschaft und dass du mich immer verstehen oder doch zumindest gut nachvollziehen konntest, wie es mir gerade (beim Promovieren) geht.

Zum Schluss möchte ich dir, Dany, für den langen Weg danken, den wir gemeinsam schon beschritten haben und den wir auch zusammen weiter gehen werden. In Liebe. Micha

Bisher erschienene Bände der Reihe „*Studien zum Physik- und Chemielernen*“

ISSN 1614-8967 (vormals *Studien zum Physiklernen* ISSN 1435-5280)

- 1 Helmut Fischler, Jochen Peuckert (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie
ISBN 978-3-89722-256-4 40.50 EUR
- 2 Anja Schoster: Bedeutungsentwicklungsprozesse beim Lösen algorithmischer Physikaufgaben. *Eine Fallstudie zu Lernprozessen von Schülern im Physiknachhilfeunterricht während der Bearbeitung algorithmischer Physikaufgaben*
ISBN 978-3-89722-045-4 40.50 EUR
- 3 Claudia von Aufschnaiter: Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-89722-143-7 40.50 EUR
- 4 Susanne Haerberlen: Lernprozesse im Unterricht mit Wasserstromkreisen. *Eine Fallstudie in der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-89722-172-7 40.50 EUR
- 5 Kerstin Haller: Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. *Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-242-7 40.50 EUR
- 6 Michaela Horstendahl: Motivationale Orientierungen im Physikunterricht
ISBN 978-3-89722-227-4 50.00 EUR
- 7 Stefan Deylitz: Lernergebnisse in der Quanten-Atomphysik. *Evaluation des Bremer Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-89722-291-5 40.50 EUR
- 8 Lorenz Hucke: Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums
ISBN 978-3-89722-316-5 50.00 EUR
- 9 Heike Theyßen: Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. *Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*
ISBN 978-3-89722-334-9 40.50 EUR
- 10 Annette Schick: Der Einfluß von Interesse und anderen selbstbezogenen Kognitionen auf Handlungen im Physikunterricht. *Fallstudien zu Interessenhandlungen im Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-380-6 40.50 EUR
- 11 Roland Berger: Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik. *Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-445-2 40.50 EUR

- 12 Johannes Werner: Vom Licht zum Atom. *Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*
ISBN 978-3-89722-471-1 40.50 EUR
- 13 Florian Sander: Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum. *Eine empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum*
ISBN 978-3-89722-482-7 40.50 EUR
- 14 Jörn Gerdes: Der Begriff der physikalischen Kompetenz. *Zur Validierung eines Konstruktes*
ISBN 978-3-89722-510-7 40.50 EUR
- 15 Malte Meyer-Arndt: Interaktionen im Physikpraktikum zwischen Studierenden und Betreuern. *Feldstudie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-541-1 40.50 EUR
- 16 Dietmar Höttecke: Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. *Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*
ISBN 978-3-89722-607-4 40.50 EUR
- 17 Gil Gabriel Mavanga: Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums. *Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland*
ISBN 978-3-89722-721-7 40.50 EUR
- 18 Meike Ute Zastrow: Interaktive Experimentieranleitungen. *Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Experimentieren mit Messgeräten im Physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-802-3 40.50 EUR
- 19 Gunnar Friege: Wissen und Problemlösen. *Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs*
ISBN 978-3-89722-809-2 40.50 EUR
- 20 Erich Starauschek: Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie*
ISBN 978-3-89722-823-8 40.50 EUR
- 21 Roland Paatz: Charakteristika analogiebasierten Denkens. *Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich*
ISBN 978-3-89722-944-0 40.50 EUR
- 22 Silke Mikelskis-Seifert: Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. *Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen*
ISBN 978-3-8325-0013-9 40.50 EUR
- 23 Brunhild Landwehr: Distanzen von Lehrkräften und Studierenden des Sachunterrichts zur Physik. *Eine qualitativ-empirische Studie zu den Ursachen*
ISBN 978-3-8325-0044-3 40.50 EUR

- 24 Lydia Murmann: Physiklernen zu Licht, Schatten und Sehen. *Eine phänomenografische Untersuchung in der Primarstufe*
ISBN 978-3-8325-0060-3 40.50 EUR
- 25 Thorsten Bell: Strukturprinzipien der Selbstregulation. *Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-0134-1 40.50 EUR
- 26 Rainer Müller: Quantenphysik in der Schule
ISBN 978-3-8325-0186-0 40.50 EUR
- 27 Jutta Roth: Bedeutungsentwicklungsprozesse von Physikerinnen und Physikern in den Dimensionen Komplexität, Zeit und Inhalt
ISBN 978-3-8325-0183-9 40.50 EUR
- 28 Andreas Saniter: Spezifika der Verhaltensmuster fortgeschrittener Studierender der Physik
ISBN 978-3-8325-0292-8 40.50 EUR
- 29 Thomas Weber: Kumulatives Lernen im Physikunterricht. *Eine vergleichende Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik*
ISBN 978-3-8325-0316-1 40.50 EUR
- 30 Markus Rehm: Über die Chancen und Grenzen moralischer Erziehung im naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-0368-0 40.50 EUR
- 31 Marion Budde: Lernwirkungen in der Quanten-Atom-Physik. *Fallstudien über Resonanzen zwischen Lernangeboten und SchülerInnen-Vorstellungen*
ISBN 978-3-8325-0483-0 40.50 EUR
- 32 Thomas Reyer: Oberflächenmerkmale und Tiefenstrukturen im Unterricht. *Exemplarische Analysen im Physikunterricht der gymnasialen Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-0488-5 40.50 EUR
- 33 Christoph Thomas Müller: Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0543-1 40.50 EUR
- 34 Gabriela Jonas-Ahrend: 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 Leistungsd Diagnoseinstruments*
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 Schüller: 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
- 307 Nikola Schild: Eignung von domänenspezifischen Studieneingangsvariablen als Prädiktoren für Studienerfolg im Fach und Lehramt Physik
ISBN 978-3-8325-5226-8 42.00 EUR
- 308 Daniel Averbeck: Zum Studienerfolg in der Studieneingangsphase des Chemiestudiums. *Der Einfluss kognitiver und affektiv-motivationaler Variablen*
ISBN 978-3-8325-5227-5 51.00 EUR
- 309 Martina Strübe: Modelle und Experimente im Chemieunterricht. *Eine Videostudie zum fachspezifischen Lehrerwissen und -handeln*
ISBN 978-3-8325-5245-9 45.50 EUR
- 310 Wolfgang Becker: Auswirkungen unterschiedlicher experimenteller Repräsentationen auf den Kenntnisstand bei Grundschulkindern
ISBN 978-3-8325-5255-8 50.00 EUR
- 311 Marvin Rost: Modelle als Mittel der Erkenntnisgewinnung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Entwicklung und quantitative Dimensionalitätsanalyse eines Testinstruments aus epistemologischer Perspektive*
ISBN 978-3-8325-5256-5 44.00 EUR
- 312 Christina Kobl: Förderung und Erfassung der Reflexionskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5259-6 41.00 EUR
- 313 Ann-Kathrin Beretz: Diagnostische Prozesse von Studierenden des Lehramts – *eine Videostudie in den Fächern Physik und Mathematik*
ISBN 978-3-8325-5288-6 45.00 EUR
- 314 Judith Breuer: Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen. *Fallanalysen zum Nutzungsverhalten von Lehrkräften am Beispiel des Münchener Lehrgangs zur Quantenmechanik*
ISBN 978-3-8325-5293-0 50.50 EUR
- 315 Michaela Oettle: Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik. *Eine Delphi-Studie*
ISBN 978-3-8325-5305-0 57.50 EUR

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN direkt online (<http://www.logos-verlag.de>) oder per Fax (030 - 42 85 10 92) beim Logos Verlag Berlin bestellt werden.

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl 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 im deutschsprachigen Raum.

Die Herausgeber laden daher Interessenten zu neuen Beiträgen ein und bitten sie, sich im Bedarfsfall an den Logos-Verlag oder an ein Mitglied des Herausgeberteams zu wenden.

Kontaktadressen:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien,
Österreichisches Kompetenzzentrum
für Didaktik der Physik,
Porzellangasse 4, Stiege 2,
1090 Wien, Österreich,
Tel. +43-1-4277-60330,
e-mail: martin.hopf@univie.ac.at

Prof. Dr. Hans Niedderer
Inst. f. Didaktik der Naturwissenschaften,
Abt. Physikdidaktik,
FB Physik/ Elektrotechnik,
Universität Bremen,
Postfach 33 04 40, 28334 Bremen
Tel. 0421-218 4695 (Sekretariat),
e-mail: niedderer@physik.uni-bremen.de

Prof. Dr. Mathias Ropohl
Didaktik der Chemie,
Fakultät für Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen,
Tel. 0201-183 2704,
e-mail: mathias.ropohl@uni-due.de

Prof. Dr. Elke Sumfleth
Didaktik der Chemie,
Fakultät für Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen
Tel. 0201-183 3757/3761,
e-mail: elke.sumfleth@uni-due.de

Die Teilchenphysik als Domäne der modernen Physik gewinnt zunehmend an Bedeutung im schulischen Physikunterricht. In dieser Arbeit wird erstmalig das von Lehrkräften benötigte Fachwissen zur Teilchenphysik modelliert, wobei Fachwissen als ein Teil des Professionswissens verstanden wird. Als Fachwissensdimensionen werden die Inhaltsbereiche und die Wissensarten in den Fokus genommen, für welche jeweils Subfacetten identifiziert und präzise beschrieben werden.

Nach einem Überblick über die wesentlichen Ideen der Teilchenphysik wird in der Arbeit die sukzessive Modellierung des Fachwissens im Rahmen einer qualitativ und quantitativ angelegten Delphi-Studie in der Ausrichtung Konsensfindung vorgestellt. Unter einer professionsorientierten Perspektive wurden hierzu in drei Befragungsrunden zwischen 35 und 65 internationale Expertinnen und Experten aus der teilchenphysikbezogenen Forschung (Fachwissenschaft und Fachdidaktik), Öffentlichkeitsarbeit (u.a. Wissenschaftsjournalismus) sowie erfahrene Lehrkräfte zu den für das Fachwissen relevanten Themen der Teilchenphysik befragt.

Empirische Analysen der Befragungsrunden ergaben, dass sich die Dimension Inhaltsbereiche im deklarativen Wissen nach der Meinung der Expertise aus zehn teilchenphysikalischen Themen zusammensetzt, von welchen sechs als besonders relevant eingeschätzt wurden. Im Anschluss an die letzte Befragungsrunde wurde theoriegeleitet eine erste Modellierung der Inhaltsbereiche für die Wissensarten des prozeduralen und konditionalen Wissens vorgenommen.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5305-0