

Studien zum Physik- und Chemielernen

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

304

Malte S. Ubben

**Typisierung des Verständnisses
mentaler Modelle mittels empirischer
Datenerhebung am Beispiel
der Quantenphysik**

λογος

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Hans Niedderer, Helmut Fischler und Elke Sumfleth

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

Hans Niedderer

Helmut Fischler

Elke Sumfleth

Studien zum Physik- und Chemielernen

Band 304

Malte S. Ubben

**Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle
mittels empirischer Datenerhebung
am Beispiel der Quantenphysik**

Logos Verlag Berlin



Studien zum Physik- und Chemielernen

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

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© Copyright Logos Verlag Berlin GmbH 2020

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-5181-0

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>

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades in Erziehungswissenschaften
(Dr. paed.)
im Fachbereich Physik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Vorgelegt von Malte Steve Ubben aus Münster

Erster Gutachter: Prof. Dr. Stefan Heusler

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Rainer Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 14.08.2020

Tag der Promotion: 14.08.2020

Teile dieser Arbeit sind bereits veröffentlicht in:

HEUSLER, S., & UBBEN, M. (2019a). A Haptic Model for the Quantum Phase of Fermions and Bosons in Hilbert space Based on Knot Theory. In *Symmetry*, **11**(3), 426-436.

HEUSLER, S., & UBBEN, M. (2019b). A Haptic Model of Entanglement, Gauge Symmetries and Minimal Interaction Based on Knot Theory. In *Symmetry*, **11**(11), 1399ff.

HEUSLER, S., & UBBEN, M. (2018). Modeling spin. In *European Journal of Physics*, **39**(6), 065405.

UBBEN, M., & HEUSLER, S. (2018). A haptic model of vibration modes in spherical geometry and its application in atomic physics, nuclear physics and beyond. In *European Journal of Physics*, **39**(4), 045404.

UBBEN, M., & HEUSLER, S. (2019a). Modelle in der Atomphysik aus Lehrersicht. In C. Maurer (Hrsg.): *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe - Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Kiel 2018*. 476-479.

UBBEN, M. S., & HEUSLER, S. (2019b). Gestalt and Functionality as independent dimensions of mental models in science. In *Research in Science Education*, <https://doi.org/10.1007/s11165-019-09892-y>.

Danksagung

Zu Beginn möchte ich meinen Dank an meinen Doktorvater Prof. Dr. Stefan Heusler richten. Ohne sein Vertrauen in mich wäre ich nicht dort, wo ich heute bin. Stefan Heusler hatte immer ein offenes Ohr und eine offene Tür für mich, unterstützte mich wo er konnte und half mir, meinen eigenen Weg in der Forschung zu gehen. Durch die Freiheiten in meiner Forschung, die er mir einräumte, konnte ich es erst wagen, in die Erforschung von Verständnisprozessen vorzustoßen. Auch die vielen Reisen, die er mir ermöglichte, trugen in großen Maßen zu meiner wissenschaftlichen Entwicklung bei. Vielen Dank, Stefan!

Auch bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Rainer Müller, der sich trotz unzähliger Verpflichtungen dazu bereit erklärte, als mein Zweitgutachter zu fungieren. Auch danke ich ihm für seine Forschungsarbeit, die mir einen unschätzbaren wertvollen Zugang zum Fachgebiet der Schülervorstellungen im Bereich der Atomphysik gab und für die Offenheit, mit der er meinen Forschungsansätzen begegnete.

Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr. Gilbert Greefrath, der sich bereit erklärte, bei meiner Disputation als Drittprüfer zu fungieren. Auch danke ich ihm für seine Vorlesung zur Fachdidaktik Mathematik, in der ich zum ersten Mal in meinem Leben mit Modellierungen in Berührung kam.

Dank gilt auch Prof. Dr. Martin Bosen, der sich ebenfalls bereit erklärte, bei meiner Disputation als Drittprüfer zu fungieren. Zusätzlich danke ich ihm für sein Seminar zur Klassenführung, während dessen ich meine erste fundamentierte Einführung in bildungswissenschaftliche Arbeiten und qualitative Forschung bekam.

Großer Dank gilt auch meinem Bürokollegen Christoph Holz, welcher mit mir die lange Zeit des Studiums und der Promotion durchkämpfte und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Die vielen fachlichen Gespräche und Diskussionen haben mir ungemein geholfen, meine Gedanken zu präzisieren und in eine ertragreiche Richtung zu wenden.

Ebenso großer Dank gilt auch Paul Schlummer, der mir während unserer gemeinsamen Bürozeit oft half, über den Tellerrand hinwegzublicken und meine Gedanken in ungeahnte Richtungen weiterzuverfolgen. Auch halfen mir die Gespräche mit ihm oft, meine Gedanken auf den Punkt zu bringen.

Auch dankbar bin ich Tobias Martin, welcher mir mit seinem scharfen Geist half, die Definition des *mentalen Modells* so zu entwickeln, dass sie präziser und auch verständlicher wurde. Seine lieben Worte und ertragreichen Gedanken sowie seine Freundschaft halfen mir sehr oft, meinen Weg weiter zu gehen.

Alexander Pusch gilt ebenfalls großer Dank: Ohne sein großes methodisches Wissen und seine vielen Anregungen hätte ich es nie geschafft, so reflektiert mit Forschung umzugehen, wie ich es heutzutage tue. Auch brachte er mir unschätzbare viel über die Lehre und Experimentierpraxis bei, sodass ich mich auch als Dozent weiterentwickeln konnte und zudem half er mir mit seiner pragmatischen Methodik bei einigen gedanklichen Engpässen.

Zudem danke ich Philipp Bitzenbauer, welcher mir durch unsere Gesprächen oft half, meine Forschung weiter zu präzisieren und tiefer in die Materie einzudringen.

Daniel Laumann danke ich für die vielen unterstützenden Worte und die vielen Ratschläge, die mir halfen, Teile der Promotion ungemein effektiver anzugehen und zu bestehen.

Auch möchte ich mich vielmals bedanken bei Prof. Dr. Susanne Heinicke, welche mit ihrer Kreativität und den vielen guten Ratschlägen immer neue Wege aufzeigte und die maßgeblich zu meinem wissenschaftlichen Entwicklungsprozess beitrug. Auch weckte sie als Erste meine Leidenschaft für die Physikdidaktik, wofür ich ihr immer unendlich dankbar sein werde.

Ich bedanke mich gesamt bei der Physikdidaktik Münster, die mit ihrer freundlichen, offenen Art und der weiten Blicke einen wahrhaft großartigen Nährboden für meine wissenschaftliche Entwicklung geboten haben. Meine Kollegen Rosalie Heinen, Philipp Wichtrup und Larissa Fühner waren immer für offene Diskussionen zu haben und haben das Klima während der Promotionszeit stets in eine positive Atmosphäre verwandelt.

Prof. Dr. Joachim Schlichting danke ich für die vielen warmen Worte und die vielen Ermunterungen während meiner Promotionszeit. Dr. Wilfried Suhr danke ich für das Vertrauen in mich, als er mich einstellte und die vielen ideenträchtigen Gespräche, die wir in den letzten Jahren geführt haben.

Den Biologiedidaktikern Prof. Dr. Markus Hamann und Prof. Dr. Jörg Zabel gilt mein Dank für ihre Vorträge und Ideen zu Schülervorstellungen in der Biologiedidaktik, die mich dazu bewegten, eine interdisziplinäre Einordnung meiner Forschung zu wagen.

Mein Dank gilt auch den Forschern und Ideenschmiedern Steven Horst, Jordan Peterson, Hans Aebli und Andrea diSessa, deren Vorarbeiten einen nahrhaften Untergrund für meine Gedanken geboten haben.

Auch danke ich den Durchbruchmüllern für viele angenehme Abende, die mir halfen, mich von der Forschung abzulenken und zu entspannen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei den allerliebsten Menschen in meinem Leben bedanken.

Allergrößter Dank gilt meiner geliebten Frau Britta Ubben, die immer an mich geglaubt hat und mich stets unterstützte. Sie ist der Stern meines Lebens und ich bin unendlich froh darüber, dass ich sie während meiner Promotionszeit kennenlernen durfte und dass sie immer an meiner Seite blieb. Ich kann mir nicht ansatzweise vorstellen, wie ich meine Promotion ohne ihre Gesellschaft hätte schaffen können. Zusätzlich danke ich ihr auch für unsere beiden Kater Findus und Baghira Ubben. Die drei sind die beste Familie, die man sich wünschen könnte und ich liebe sie über alles.

Monika und Hermann mit Mareike Ubben danke ich ebenfalls über alle Maße: Sie haben mich in ihre Familie aufgenommen und mich immer behütet. Sie haben immer an mich geglaubt, mir immer einen Raum zur Entfaltung gegeben und mich zu dem werden lassen, der ich heute bin. Sie haben mir beigebracht, was Familie bedeutet und mir ermöglicht, den Lebensweg zu gehen, den ich bis jetzt beschritten habe.

Auch möchte ich meinem neueren Familienteil danken: Carsten und Arwed Meyer sowie Helmuth und Petra Meyer, die mich herzlich in ihren Familienkreis aufgenommen haben. Ich hätte mir keine bessere Erweiterung der Familie vorstellen können.

Allen, die ich nicht namentlich erwähnt hab, die mir aber begegnet sind und mich zu diesem Ziel geführt haben, danke ich ebenfalls, vor allem meinen Lehrern, welche mich schon früh unterstützten und meinen vielen wissenschaftlichen Kollegen, die mich mit offenen Armen in ihre Community aufgenommen haben.

Danke!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitende Worte	9
2	Mentale Modelle	13
2.1	Arbeitsdefinition des <i>mentalen Modells</i>	13
2.2	<i>Mentale Modelle</i> und physikalische Modelle in der Schule.....	19
2.3	<i>Mentale Modelle</i> von Lernenden in der Quantenphysik.....	22
3	Empirische Untersuchung zur Tiefenstruktur mentaler Modelle am Beispiel der Quantenphysik	33
3.1	Konzeption des Testinstruments	34
3.2	Auswertung der Durchführung.....	38
3.2.1	Erster Schritt der Datenanalyse	39
3.2.2	Explorative Faktoranalyse	42
3.2.3	Faktoranalyse mittels zweier Faktoren	43
3.3	Die vier Typen der Wahrnehmung mentaler Modelle.....	49
4	Atommodelle unter Betrachtung von Gestalt- und Funktionalitätstreue	57
4.1	Historische Perspektive auf das Verständnis von Atommodellen	57
4.1.1	Erste <i>mentale Modelle</i> zum Atom	58
4.1.2	Thomsons Atomverständnis.....	60
4.1.3	Rutherfords Atomverständnis	63
4.1.4	Bohrs Atomverständnis	64
4.1.6	Allgemeines Atomverständnis	69
4.2	Haptisch-visuelle Zugänge zu Atommodellen.....	70
4.2.1	Haptische Kugelflächenfunktionen- und Kugelwellenmodelle.....	70
4.2.2	Haptische Modelle für Spin.....	75
4.3	Gestalttreue und die Quantenphysik.....	78
4.3.1	Quantenphysikalische Gestalten: das Papierstreifenmodell.....	79
4.3.2	Das Korrespondenzprinzip.....	81
5	Vergleich empirischer Folgerungen mit weiterer Literatur	85
5.1	Vorstellungen in der Physik	89
5.1.1	Vorstellungen der Quantenphysik.....	89
5.1.2	Vorstellungen zum Licht	94
5.1.3	Vorstellungen zu Feldern.....	97
5.2	Vorstellungen in der Biologie	102
5.2.1	Vorstellungen zur Zelle.....	103
5.2.2	Vorstellungen zu Genetik.....	107
5.2.3	Vorstellungen zur Evolution.....	110
5.3	Vorstellungen in der Chemie	114
5.3.1	Vorstellungen zu Stoffumwandlungen	114
5.3.2	Vorstellungen zu Teilchen.....	118

5.4	Entwicklungspsychologische Aspekte.....	121
5.4.1	Stadienmodell der kognitiven Entwicklung nach Piaget	121
5.4.2	Moderne Entwicklungspsychologische Positionen	123
5.5	Neurologische Positionen	125
6	Zusammenfassung	129
7	Ausblick.....	133
9	Literaturverzeichnis.....	139
Anhang	157
	Anhang A – Faktorladungen	159
	Anhang B – Beschreibung der Schritte der Fragebogenvalidierung	160
	Anhang C - Andere Probanden	162

1 Einleitende Worte

Zu Beginn dieser Arbeit seien einige Anmerkungen zu den folgenden Kapiteln vorangestellt, die ich nutzen möchte, um einige Hintergründe zur Entstehung und Strukturierung dieser Arbeit zu geben. Begonnen hatte meine Forschung zum Thema *mentaler Modelle* mit einer Realisation, die ich während einer früheren Untersuchung hatte: In Oberstufenkursen tendieren die Lernenden ungewöhnlich oft dazu, ihre Vorstellungen von der Atomhülle nicht im Sinne der Quantenphysik weiter zu verfeinern, sondern halten hartnäckig an der Bohrschen oder früheren Beschreibungen fest. In der Tat findet sich diese Beobachtung auch oft in der Literatur, sodass sich mir die Frage nach dem Grund für dieses Festhalten am Bild des Planetensystems aufdrang. Nach einer Ausweitung der Recherchen auf Empirie zu Modellvorstellungen im Allgemeinen stieß ich auf den Artikel von GROSSLIGHT, UNGER und JAY (1991), welche feststellten, dass eine allgemeine Problematik beim Verstehen naturwissenschaftlicher Modelle ist, dass die Modelle als exakte Replikate der Realität gesehen werden – also skalierte Versionen dieser darstellen. Aufgrund dieser Erkenntnisse begann ich, eine Untersuchung zu planen, die diese beiden Feststellungen in gewissem Rahmen auf eine Abhängigkeit untereinander überprüfen konnte. Ich hatte das Glück, dass mein hierzu konzipiertes Instrument von mehr als 3000 Personen genutzt wurde und mein Datenmaterial dadurch eine statistisch wenig gestörte Aussagekraft hat (siehe dazu Kapitel 3).

Bei der Auswertung der Ergebnisse und der damit verbundenen inhaltlichen Interpretation meiner explorativen Faktoranalyse stieß ich schließlich auf die beiden Cluster, die ich als *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* betitelte: Die Probanden beurteilten die *Gestalt* und die *Funktionalität* eines Modelles unabhängig voneinander in Bezug auf die Realität.

An dieser Stelle möchte ich anmerken, dass im Laufe dieser Arbeit die Ideen, welche ich als „*mentales Modell*“, „*Gestalt*“, „*Funktionalität*“, „*Gestalttreue*“ und „*Funktionalitätstreue*“ bezeichne, immer kursiv geschrieben sind. Dies hat den Zweck zu zeigen, dass es meine eigenen Bezeichnungen sind und Autoren, deren Artikel ich anführe, auch andere Benennungen für diese oder sehr ähnliche Ideen nutzen. Zum Beispiel beschreiben einige Autoren „Konzepte“, „Schülvorstellungen“ oder Ähnliches, aber ich werde diese als *mentale Modelle* anführen, da sie meiner Arbeitsdefinition weiterstehend entsprechen. In Kapitel 2.3 habe ich diese originalen Bezeichnungen mit angeführt, um die Ähnlichkeit zu meiner Arbeitsdefinition zu illustrieren. In anderen Teilen der Arbeit ist dies nicht geschehen, so auch nicht in Kapitel 5, in dem ein Vergleich der Ergebnisse von Kapitel 3 mit der Literatur erfolgt. Die originalen Begriffe sind aber auch vergleichbar mit denen aus Kapitel 2.3.

In den folgenden Kapiteln befasse ich mich intensiv mit der psychologischen und neurologischen Perspektive auf Vorstellungen, Modelle und Modellvorstellungen (besonders Kapitel 2.1 und 5.5). Basierend auf meiner Forschung wählte ich auch die Bezeichnung *mentales Modell* für Vorstellungen. Dies geschah zum einen, weil die beiden Faktoren *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* sowohl die Interpretation von physikalischen (Atom)modellen als auch die Interpretation von Vorstellungen vom Atom beschreiben und ich daher ausdrücken möchte, dass der Modellcharakter mit Vorstellungen eng zusammenhängt. Zum anderen wählte ich die Benennung, da in der kognitiven Psychologie

spätestens seit SIMONS und CHABRIS (1999) das Bewusstsein selbst als (reduzierte) zielgeleitete Modellierung der Realität gesehen wird – und nicht in etwa eine 1:1 Abbildung dieser darstellt. Auch in der Literatur gibt es für Vorstellungen manchmal die Bezeichnung *mentales Modell*, aber oft wird das, was ich unter dem Begriff verstehen möchte, auch anders betitelt. Aus diesem Grund habe ich mir in Kapitel 2.1 einen Raum für eine begriffliche Klärung des *mental Modells* im Rahmen dieser Arbeit genommen, so wie einen Vergleich mit ähnlichen Ideen aus der Bildungspsychologie. Anschließend daran habe ich in Kapitel 2.2 die Beziehung von Modellen, die Lehrpersonen den Lernenden geben könnten und die daraus resultierenden Vorstellungen dargelegt, um schon an jener Stelle zu zeigen, wie nahe verwandt Vorstellungen und Modelle im Physikunterricht sich sind.

Die bereits angesprochene Feststellung, dass es große kognitive Probleme beim Übergang vom Lernen der klassischen Physik zur Quantenphysik gibt, sowie weitere Erkenntnisse über das Lernen von Quantenphysik habe ich in Kapitel 2.3 zusammengefasst. Dabei habe ich vor allem auch die Begriffe *Gestalt* und *Funktionalität* im Sinne der Arbeitsdefinition *mentaler Modelle* verwendet, um die Beziehung der Forschung zu der in dieser Arbeit vorgelegten Theorie und Empirie klar darzustellen.

Die Ergebnisse meiner empirischen Forschung und vor allem die daraus abgeleiteten verschiedenen Typen der Interpretation *mentaler Modelle* aus Kapitel 3 nutze ich in Kapitel 4.1, um einen Blick auf die historischen Aussagen zur Entwicklung von Atommodellen zu werfen und werde dafür argumentieren, dass in den meisten Fällen ein Verständnis der Atommodelle nach dem Typen IV (funktionales Verständnis) bei den Wissenschaftlern durchscheint. Auch möchte ich in Kapitel 4.2 und 4.3 einige eigens entwickelte haptisch-visuelle Modelle vorstellen und im Hinblick auf *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* reflektieren. An dieser Stelle möchte ich eine kurze Anmerkung tätigen: dieses Unterkapitel ist das einzige, welches stark fachphysikalische Inhalte thematisiert und daher vom Leser eher tiefes physikalisches Verständnis fordert.

Ein weiterer zentraler Teil der Arbeit wird in Kapitel 5 dargelegt: Basierend auf den Erkenntnissen von GROSSLIGHT et al. (1991) und anderen prominenten Studien in der Physik-, Chemie- und Biologiedidaktik führe ich Argumente dafür an, dass die Verständnistypen *mentaler Modelle* nicht nur die Vorstellungen der Quantenphysik beschreiben können, sondern auch in all den anderen didaktischen Gebieten in ähnlicher Form stets präsent sind. Daher habe ich in Kapitel 5 für einige Themen dieser Fächer Aussagen und Studienergebnisse zusammengetragen, die ich als vergleichbar mit meinen eigenen bewerte. Es ist zwar klar zu sagen, dass bei diesen Vergleichen mit meiner Forschung öfter die Problematik aufkommt, dass die hinzugezogenen Studien unter anderen Fragestellungen standen und in wenigen Fällen vor allem die Interpretationen von Aussagen befragter Personen von der jeweiligen Fragestellung beeinflusst waren. Trotzdem denke ich, dass das zusammengetragene Material äußerst aussagekräftig ist und die Annahme stark untermauert, dass die Verständnistypen nicht nur im Bereich der Quantenphysik zu finden sind. Zusätzlich lege ich auch dar, dass es nicht nur in der Naturwissenschaftsdidaktik, sondern auch in der Bildungspsychologie und Neurologie Erkenntnisse gibt, die diese These stützen.

Nach einer Zusammenfassung der zentralen Forschungsergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit in Kapitel 6 folgt in Kapitel 7 ein Ausblick im Rahmen der vorangegangenen Kapitel. Ich werde dort noch einmal deutlich machen, welche Teile des Lernens mit meinem in dieser Arbeit vorgestellten Theorierahmen beschreibbar sind. Auch möchte ich am Schluss aber auch noch auf einige Vermutungen aufmerksam machen, die mir durch meine Forschung kamen und im selben Zuge weitere Fragen aufwerfen.

Zusammenfassend hoffe ich, dass die folgenden Seiten dazu beitragen können, die Entwicklung des Verständnisses *mentaler Modelle* ein wenig besser zu verstehen und zu beschreiben. Auch hoffe ich, dass es die Arbeitsdefinition ermöglicht, die theoretische Diskussion *mentaler Modelle* ein wenig mehr zu fokussieren, da bis jetzt eine präzise Definition meines Wissens noch nicht zur Debatte steht. Und auch das erhoffe ich mir von dieser Arbeit: dass sie fruchtbare Debatten anregt und einen hoffentlich ertragreichen Grund für die weitere Erforschung *mentaler Modelle* und deren Entwicklung sowie den damit verbundenen aufgezeigten Lernschwierigkeiten bietet.

2 Mentale Modelle

Die Vorstellung, dass Lernende als „unbeschriebene Blätter“ in den Unterricht kommen und dann durch die Lehrkraft mit bestimmten Informationen versorgt werden, die die Schülerinnen und Schüler dann einfach aufnehmen können, hat sich seit längerer Zeit als unzureichende Beschreibung herausgestellt (PIAGET, 1951). Die in vielen Fällen durchgeführte Betrachtung des Lernprozesses aus konstruktivistischer Sicht macht klar, dass die Schüler schon Vorwissen, Vorstellungen und Erwartungen mit in den Unterricht bringen, welche förderlich oder hinderlich für den beabsichtigten Lernprozess sein können, und dass Lernende stets Verständnis im Zusammenhang mit bereits Erlerntem konstruieren (ebd.). In dieser Arbeit wird das zentrale Konstrukt für den Lernprozess als *mentales Modell* betitelt, doch dieselbe oder ähnliche Ideen haben auch zahlreiche andere Namen. Vorwissen und Vorstellungen von Lernenden werden im deutschen Sprachraum zum Beispiel oftmals mit „Schülervorstellungen“ benannt (SCHECKER, WILHELM, HOPF & DUIT, 2018). Manche Didaktiker sprechen aber auch von „Fehlvorstellungen“ (KAUS, SALINGA, BOROWSKI & HEINKE, 2012), andere von „Präkonzepten“ (GRUSCHE, 2016) oder dem „Vorverständnis“ (SCHECKER, 1985). Im englischsprachigen Raum gibt es ebenfalls verschiedene Begriffe für dieses Konstrukt, unter anderem „children’s science“ (GILBERT, OSBORNE & FENSHAM, 1982), „alternate framework“ (DRIVER & EASLEY 1978; WATTS, 1983A, 1983B) oder „alternate conception“ (GILBERT & SWIFT, 1985). All diese Betitelungen versuchen, grob dasselbe zu beschreiben, wobei sie häufig nicht die Gesamtheit des Phänomens erfassen: Beispielsweise impliziert der Begriff „Schülervorstellung“, dass einzig Schüler über die betreffenden Vorstellungen verfügen, der Begriff „Fehlvorstellungen“ impliziert, dass es Vorstellungen gibt, die immer falsch sind oder der Begriff „Präkonzept“ bzw. „Vorverständnis“ impliziert zum Teil, dass Konzepte nur vor einer Lernsituation wichtig sind. Aus diesen Gründen ist eine geeignetere, neutralere und umfassendere Beschreibung dieses Konzeptes sinnvoll, welche im Folgenden unter der Bezeichnung *mentales Modell* dargelegt wird.

2.1 Arbeitsdefinition des *mental*en Modells

Was spricht für die Betitelung durch das Wort „*mentales Modell*“? Zunächst einmal deckt es sich zu großen Teilen mit der Variante des mentalen Modells aus der kognitiven Psychologie (DUTKE, 1994), welche das Konstrukt theoretischer behandelt als die meisten eher exemplarischen didaktischen Betrachtungen. Auch deckt der Name „Modell“ die funktional modellierende Natur des Bewusstseins ab: So stellten zum Beispiel SIMONS und CHABRIS (1999) in ihrem nun berühmten Gorillaexperiment zur *inattentional blindness* und *change blindness* fest, dass das Bewusstsein allzeit nur die Aspekte der Realität modelliert, die funktional als am relevantesten angesehen werden und nicht ein 1:1 Abbild der „Außenwelt“ im Kopf darstellt – wie zuvor oft angenommen wurde (LEVIN, MOMEN, DRIVDAHL & SIMONS, 2000).

Was genau ist in dieser Arbeit als *mentales Modell* zu verstehen? Was sind seine wichtigsten Eigenschaften? Vor einer näheren Betrachtung sei festzuhalten, dass eine einheitliche,

scharfe Definition zurzeit nicht existiert¹ (siehe für verschiedene Definitionsansätze GRECA und MOREIRA, 2010). Den ersten Ansatz für die in dieser Arbeit aufgeführten Arbeitsdefinition liefern die Ergebnisse unserer Studie (siehe Kapitel 3). Um das Konstrukt *mentales Modell* greifbar zu machen, wird folgend daher eine Arbeitsdefinition verwendet, deren Grundidee aus den in Kapitel 3 erhaltenen Ergebnissen stammt und somit an dieser Stelle vorgegriffen ist, folgend aber auch anhand bildungspsychologischer Literatur begründet wird. Sie ist so reduziert wie möglich gewählt, legt aber gleichzeitig einen gemeinsamen Kern vieler lernpsychologischen Ideen und unserer empirischen Untersuchung dar:

Arbeitsdefinition: Mentale Modelle

Mentale Modelle sind individuelle Typen von mentalen modalen Mustern, die ein Funktionenpotential haben und auf äußeren Erfahrungen beruhen.

Zunächst möchte ich diese Arbeitsdefinition entpacken und auf die drei Kernaspekte aufmerksam machen, die sie umfasst:

- (i) *Mentale Modelle* besitzen eine strukturelle Komponente, die in der Arbeitsdefinition als „modales Muster“ betitelt ist. Es handelt sich dabei um die modalen Teile von Vorstellungen. Beim *mentalen Modell* eines Kuchens könnte dies zum Beispiel das Aussehen, der Geruch und der Geschmack oder die Konsistenz des Teigs sein. Dieser Teil des *mentalen Modelles* wird im Folgenden auch oft als seine „Gestalt“ betitelt. Die *Gestalt* eines *mentalen Modelles* muss nicht statisch sein, zum Beispiel kann die Vorstellung einer rollenden Kugel auch rein gestaltlich und ohne Bedeutung verstanden werden.
- (ii) *Mentale Modelle* haben ein Funktionenpotential. Dies ist der abstrakte, instrumentelle Teil, der dem Modell innewohnt. Das *mentale Modell* eines Kuchens könnte zum Beispiel als etwas aufgefasst werden, was Hunger vermindert oder die Zunge verbrennt. Das Funktionenpotential eines *mentalen Modelles* sind somit die Bedeutungen, die ihm in verschiedenen Situationen zugeschrieben werden können und welche Zwecke es haben kann. In dieser Arbeit wird zumeist für diesen Teil eines *mentalen Modelles* der Begriff „Funktionalität“ verwendet.
- (iii) *Mentale Modelle* sind subjektiv und basieren auf Erfahrungen. Sie sind damit individuell und können modifiziert werden, wenn neue Erfahrungen hinzukommen. In diesem Falle wächst zum Beispiel das Funktionenpotential, welches mit der *Gestalt* verbunden wird, oder die *Gestalt* wird verändert.

Mentale Modelle sind nach (iii) also nicht unveränderlich, sondern können sich je nach Situation in *Gestalt* und *Funktionalität* anpassen und weiterentwickeln (JOHNSON-LAIRD, 1983; GRECA & MOREIRA, 2000; siehe auch Kapitel 7). Es werden im Folgenden nun exemplarisch

¹ Dies war auch der Konsens einer kurzen Diskussion mit Prof. Dr. Steven Horst, der sich intensiv mit der Pluralität mentaler Modelle beschäftigt, vgl. HORST (2016).

einige Parallelitäten zwischen anderen prominenten Konstrukten und der in dieser Arbeit verwendeten Definition eines *mentalen Modells* aufgezeigt.

In der Literatur zur Kognition wird die Idee eines *mentalen Modells* oft genutzt, um kleine Bereiche von Wissen zu beschreiben (siehe zum Beispiel GRECA & MOREIRA, 2000). Die Benennung „mentales Modell“ wird meist JOHNSON-LAIRD (1983) zugeschrieben, doch das zugrundeliegende Konstrukt wurde bereits früher von CRAIK (1943) beschrieben. Der primäre Vorschlag von CRAIK (1943, S.61) war es, dass es ein „*small-scale model of external reality*“ gibt, welches Personen in den Köpfen haben. Obschon der Begriff „mentales Modell“ noch nicht fiel, werden CRAIKs Ideen als Grundstein für die spätere Nutzung dieser Benennung angesehen (HORST, 2016).

Die erste Komponente eines *mentalen Modells* – seine *Gestalt* (i) – wird in vielen Fällen hauptsächlich in visueller Modalität betrachtet. Dabei geschieht dies meist im Zusammenhang mit Bildern oder Symbolen. Sogar CRAIK (1943, S.57) betonte bereits die Eigenschaft des mentalen Modells, oft „*symbolic*“ zu sein. Wie bereits in der Arbeitsdefinition ausgeführt, bedeutet dies jedoch nicht, dass *Gestalten* immer visuell sind. Schon zum Beispiel in der *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (MAYER, 2001) wird eine Kodierung nicht nur mittels visueller, sondern auch auditiver *Gestalten* betont. In diesem Sinne wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die *Gestalten* von *mentalen Modellen* alle Sinnesmodalitäten einschließen können. In der neurologischen Literatur wird die *Gestalt* oft auch als „Reizmuster“ aufgeführt (siehe zum Beispiel GAZZANIGA, 2005).

Die zweite Komponente, die *Funktionalität* (ii), ist schwieriger zu greifen, da sie der *Gestalt* „unterliegt“ und damit teils nicht direkt zugänglich ist. Bei der Auseinandersetzung mit *Gestalten* – oder alltäglicher gesprochen mit Objekten – gibt es viele verschiedene Funktionen, denen eine einzelne *Gestalt* dienen kann und viele Bedeutungen, die ihr in unterschiedlichen Situationen zugeschrieben werden können. Zugrunde liegt bei der *Funktionalität* eine Idee, die prominent zuerst von GIBSON (1966, 1977, 1979) aufgeworfen wurde: Die relevanten Informationen sind nicht, wie Sachen aussehen, sondern ihr Potential, also Fragen wie: Was bedeutet etwas für die gegenwärtige Situation? Ist es ein Werkzeug, das hilft, einen Plan umzusetzen? Ist es ein Hindernis?

Die wahrgenommene *Gestalt* eines Apfels vor einer Person kann die Funktion „Sättigung“ besitzen, wenn die Person hungrig ist; sie kann aber ebenfalls die Funktion „Vermeidung“ besitzen, wenn die Person gesättigt ist. Damit werden *mentale Modelle* auch situational bewertet. Diese Idee haben auch unter anderem PETERSON (1999) und PANKSEPP (1998) weiterentwickelt. Um aber zu vermeiden, einem *mentalen Modell* eine bestimmte Wertung zuschreiben zu müssen, und es kontextunabhängiger zu machen, wurde der Begriff *Funktionalität* in Anlehnung an NORMAN (1983) gewählt, der diese Aspekte einschließt, in dem er alle möglichen mit dem Modell kodierten Funktionen zusammenfasst.

Die dritte Komponente eines *mentalen Modells* ist der individuelle Aspekt. Hierunter werden einige verschiedene Dinge gefasst: Am offensichtlichsten ist es vermutlich, dass unterschiedliche Personen unterschiedliche *mentale Modelle* im Kopf haben, selbst wenn es um denselben Gegenstand geht. Der Hauptgrund für diesen Umstand ist die konstruktivistische Natur von Lernprozessen – durch eigene Interessen, eigene Persönlichkeiten, eigene Erlebnisse und Erfahrungen wird alles Lernen individuell (siehe z.B.

PIAGET, 1951; AEBLI, 1968). Aber nicht nur interpersonelle Faktoren sind mit der Individualität gemeint; sondern auch *mentale Modelle* einer einzelnen Person zu verschiedenen Zeitpunkten. In der Tat ist eine oft gewählte Auffassung von *mentalen Modellen* in der Literatur eher eine als situationales Konstrukt und nicht eines generellen (GRECA & MOREIRA, 2000). Ein *mentales Modell* kann sich demnach verändern, ausgefeilt werden, abstrakter werden oder immer mehr Funktionen einschließen (Wachsen der Funktionalität).

Im Folgenden werden nun einige theoretische Sichtweisen dargelegt, in denen die Aspekte *Gestalt* (i), *Funktionalität* (ii) und *Individualität* (iii) ebenfalls einen Kern für Lernprozesse bilden – sei es unter dem Namen „mentales Modell“ oder auch anderen wie „Repräsentation“ oder „Vorstellung“. Obwohl diese drei Komponenten bisher nicht so explizit genannt wurden wie in dieser Arbeit, scheinen sie doch als allgemeine Eigenschaften *mentaler Modelle* angesehen zu werden (siehe JONES, ROSS, LYNAM, PEREZ & LEITCH, 2011).

Die meisten im Folgenden aufgeführten Theorien und Konstrukte entstammen der Bildungspsychologie. Eine der ersten Ideen, die ähnlich der eines *mentalen Modells* in dieser Arbeit war, ist Piagets „Repräsentation“ (Piaget, 1951). Er schlägt dabei vor, dass eine Repräsentation etwas ist, das „*beyond the present, extending to the field of adaption*“ geht und dass es hervorruft „*what lies outside the immediate perceptual and active field*“ (PIAGET, 1951, S. 273). Damit schreibt er der Repräsentation auch etwas zu, was nicht nur reine sensorische Muster sind. Einige Bemühungen sind unternommen worden, eine direkte Repräsentation von wahrgenommenen Objekten von solch einer zu unterscheiden, die eher abstrakt und rein gedanklich ist. So trifft zum Beispiel CAREY (2005) diese Unterscheidung mit der Benennung durch „perceptual representation“ für ersteren Fall und „conceptual representation“ (oder „mental representation“) für den letzteren Fall – und in gewissen Situationen ist diese Unterscheidung gewiss sinnvoll. In dieser Arbeit jedoch wird diese Unterscheidung nicht getroffen, da sie für die weiteren Betrachtungen irrelevant ist.

Daher ist an dieser Stelle eine allgemeinere Definition von PIAGET aufzuführen:

„[A] Representation is thus the union of a “signifier” that allows of recall, with a “signified” supplied by thought.“

(PIAGET, 1951, S. 273)

Der *signifier* ist dabei von Piaget eher als visueller Teil der Repräsentation aufgefasst, als etwas symbolisches, was zur Erinnerung dient, wohingegen das *signified* die unterliegende Bedeutung der Repräsentation ist. An jener Stelle ist aber noch nicht differenzierter angesprochen, was das *signified* genau ist – später betitelt er es als „Operation“. Dieser Idee stimmt auch sein Schüler AEBLI (1968) bei der Begründung seiner psychologischen Didaktik zu und nimmt sie als Grundlage für ein Verständnis von Denkprozessen:

„Die Operation ist das aktive Element des Denkens. Sie ist es, die wesentliche Fortschritte der Intelligenz sichert, im Gegensatz zum Bild, das die Rolle eines verhältnismäßig statischen Elements spielt, da es nur Augenblicksbilder der operatorischen Umgestaltung festhält. Das Bild ist somit ein Symbol der Operation, dessen Wahrnehmung oder Vorstellung dem Subjekt erlaubt, sich die gesamte Operation vorzustellen.“

(AEBLI, 1968, S. 54)

Diese Ideen sind nicht nur abbildbar auf CRAIKS ursprüngliche Ausführungen und die Arbeitsdefinition dieser Arbeit, sondern werden auch in neuerer Literatur verwendet (siehe zum Beispiel FIXIONE & LIETO, 2013). Zusätzlich wurde auch der individuelle Aspekt der Piaget'schen Repräsentation oft hervorgehoben (BURGE, 2009; PAVESE, 2019), womit für alle drei Aspekte *mentaler Modelle* analoge Ideen im Kontext der „Repräsentationen“ gegeben sind.

Auch der Begriff des *mentalen Modelles* selbst hat eine häufige Nutzung in der Literatur als zentrales Konstrukt gefunden, das den modellierenden Charakter des Geistes in den Vordergrund stellt. Daraus erwachsen ist schließlich die Theorie des *kognitiven Pluralismus* (HORST, 2016), welche *mentale Modelle* als fundamentale Bausteine der Kognition ansieht. Dieses Verständnis eines *mentalen Modelles* ist zusammenfassend aus der vorherigen Verwendung in der psychologischen Literatur erwachsen und wird daher stellvertretend für die Literatur zu diesem Begriff betrachtet. Es umfasst zwei Komponenten: Zum einen ist Teil eines *mentalen Modells* die Vorstellung einer beobachteten Struktur (*Gestalt* (i)) und zum anderen die Möglichkeit zur Veränderung im Geiste dadurch, dass verschiedene Handlungen aufgeprägt werden (*Funktionalität* (ii)). So kann das *mentale Modell* im Geiste gedreht oder verzerrt werden. Das *mentale Modell* ist dadurch auch immer nur eine individuelle (iii) Betrachtungsweise (HORST, 2016, S. 121). Der zweite Teil des *mentalen Modelles* ist auch bei HORST explizit im GIBSON'schen Sinne (GIBSON, 1977) zu verstehen: Möglichkeiten werden evaluiert und greifbar gemacht – aus Sicht der Arbeitsdefinition dieser Arbeit bezeichnet dies die *Funktionalität*. Damit ist auch diese Version sehr ähnlich zu der Arbeitsdefinition dieser Arbeit, da es die drei Aspekte ähnlich zu *Gestalt*, *Funktionalität* und *Individualität* umfasst.

Ein weiteres Konstrukt, was vergleichbar mit dem *mentalen Modell* nach der Definition in dieser Arbeit ist, stellt das „*image-schema*“ dar. AMIN, SMITH und WISER (2014) haben eine nützliche Übersicht über die Forschung zu diesem Thema gegeben, wobei sie ihre Darlegungen bei PIAGET beginnen und schließlich zu einer modernen Perspektive hinführen. Bei ihnen sind *mentale Modelle* anders zu verstehen als in der Arbeitsdefinition, da sie dort nur wirkliche Bilder und keine Symbole als *Gestalten* besitzen können. Dabei sind sie bei AMIN et al. als Untergruppe der *image-schemata* zu sehen, welcher der Arbeitsdefinition sehr viel näher sind: Sie enthalten eine individuelle visuelle Gestaltkomponente und eine dynamische, auf Handlung basierende Komponente (siehe auch z.B. KE, MONK & DUSCHL, 2005; SHERIN, 2006).

Ein letztes Konstrukt, welches Parallelen zu *mentalen Modellen* nach der Arbeitsdefinition aufweist, ist die Theorie von *Knowledge in Pieces* (DISSA, 2017). Die zentrale Idee ist hierbei das „p-prim“, welches eine Art *mentales Modell* einer Alltagssituation ist: man beobachtet etwas (wie es aussieht, wie es sich verhält) und baut daraus eine Wissensinsel - ein Stück Erfahrung. In diesem Sinne können p-prims als *mentale Modelle* nach der Arbeitsdefinition verstanden werden (wenn auch auf spezielle Art interpretiert, siehe Kapitel 7): Die Komponenten von *Gestalt* (i), *Funktionalität* (ii) und *Individualität* (iii) finden sich alle bei den p-prims wieder, da sie aus situationalen modalen Mustern bzw. Erfahrungen konstruiert werden und eine Handlung oder ein Verhalten kodieren, welches situational beobachtet oder erlebt wurde. Sie sind individuell und funktionieren mehr oder weniger gut in verschiedenen Kontexten (siehe auch dazu Kapitel 6).

Die Definition des *mentalen Modells* wurde aber nicht nur gewählt, weil sie in der Literatur als der gemeinsame Kern gängiger theoretischer Beschreibungen für *mentale Modelle* oder ähnlicher Konstrukte extrahiert werden kann, sondern auch, weil sie die beiden Dimensionen *Gestalt* (Reizmuster) und *Funktionalität* (abstrakte Wissenseinheit bzw. Menge an potentiellen Funktionen) adressiert. Diese beiden Dimensionen wurden empirisch als die beiden relevanten Komponenten bei der Bewertung der Realitätstreue *mentaler Modelle* mindestens in der Physik von uns erhoben (UBBEN & HEUSLER, 2019b, siehe dazu Kapitel 3). Es lassen sich allerdings auch viele Argumente dafür finden, dass diese Modellierung zu einer allgemeineren Beschreibung geeignet ist (siehe Kapitel 5).

Auch wissenschaftliche Modelle im Allgemeinen scheinen die beiden Faktoren *Gestalt* und *Funktionalität* zu besitzen, nicht aber zwingend die *Individualität*. Dies zeigte unter anderem die empirische Studie von PLUTA, CHINN und DUNCAN (2011), die bei einer Befragung von 324 Lernenden herausfanden, dass mindestens 60% einen visuellen Aspekt als essenzielles Kriterium für ein gutes Modell angaben, sowie mindestens 51% Erklärmächtigkeit. Dies sind ebenfalls Parallelen zu der in dieser Arbeit getroffenen Definition *mentaler Modelle*, wobei die Individualität bei gegebenen wissenschaftlichen Modellen allerdings erst einmal sehr gering ist.

Nun ist es nötig, zwei sehr ähnliche in dieser Arbeit verwendete Ideen zu differenzieren: *Mentale Modelle* bestehen in dieser Arbeit zunächst aus einem modalen Muster (*Gestalt*) und einer Bedeutung (*Funktionalität*). Wie genau die *mentalen Modelle* nun aber in Bezug auf die Realität (im naiv realistischen Sinne) interpretiert werden, ist teilweise noch offen. Eine tiefgehende Aussage zu diesem Bezug ist erst unter Betrachtung der (subjektiven) Interpretation des *mentalen Modells* durch den Modellierer zu treffen. Er oder sie kann immer die Frage stellen: „Ist mein *mentales Modell* realitätstreu?“. In unserer Studie zeigen wir, dass dies sich weiter differenzieren lässt in zwei Unterfragen. Die eine ist: „Ist mein *mentales Modell* gestaltstreu?“ Die andere Frage ist: „Ist mein *mentales Modell* funktionalitätstreu?“ So können beide Komponenten eines *mentalen Modells* unabhängig voneinander betrachtet werden. Wenn also später über die Verständnistypen, welche aus den empirischen Daten herausgearbeitet wurden, gesprochen wird, so geht es darum, inwieweit das *mentale Modell* als *gestaltstreu* bzw. *funktionalitätstreu* verstanden wird. Das „Verstehen“ ist in diesem Sinne wie „interpretieren“ oder „wahrnehmen als...“ gemeint. Man könnte also auch sagen: Die Verständnistypen geben an, in wieweit ein *mentales Modell* – bestehend aus einer *Gestalt* und einer *Funktionalität* – individuell als *gestaltstreu* und *funktionalitätstreu* interpretiert wird. Dies ist schematisch in **Abb. 1.** zu sehen.

Nachdem nun eine Arbeitsdefinition des *mentalen Modells* dargelegt ist, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Einschränkung der Arten *mentaler Modelle* gegeben, die fokussiert betrachtet werden: Die meiste Forschung ist in der Bildung und in der Forschung zu *mentalen Modellen* – oder „Schülvorstellungen“ - zu solchen betrieben worden, bei denen eine *Funktionalität* primär durch visuelle Reizmuster kodiert wird. Dabei handelt es sich zum Beispiel um Schülvorstellungen, die anhand von Bildern erhoben wurden. Auch auditive Kodierungen wurden teils erforscht, auch wenn dies in den prominentesten Fällen im Zusammenhang mit visuellen Kodierungen erfolgte (siehe die *Dual-Coding Theory* von PAIVIO, 1971 oder die erweiterte *Theory of Multimedia Learning* von MAYER, 2001). Die Untersuchung *mentaler Modelle*,

die durch z.B. haptische und olfaktorische Reizmuster kodiert sind, ist dagegen weniger häufig.

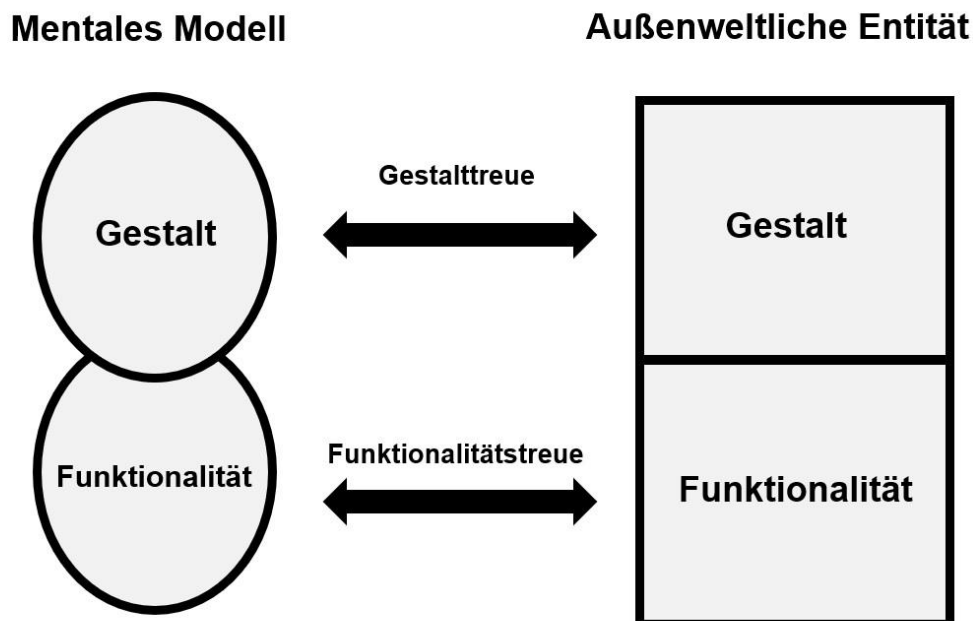


Abb. 1. Ein *mentales Modell* (links), welches aus einer *Gestalt* besteht, die *Funktionalität* kodiert, kann im Hinblick auf die Übereinstimmung mit realen Reizmustern (*Gestalttreue*) und auf die Übereinstimmung mit realen Funktionen/ Prozessen (*Funktionalitätstreue*) aus der Außenwelt (rechts) betrachtet/ interpretiert werden. Die Außenwelt ist dabei im naiv realistischen Sinne zu sehen.

In den meisten Teilen dieser Arbeit wird jedoch ebenfalls das Hauptaugenmerk auf solche *mentalen Modelle* gelenkt, welche visuell kodiert sind, da die Forschungslage zu „Schülervorstellungen“ im Kontext visuell kodierter *mentaler Modelle* die am weitesten fortgeschrittene ist. Einzig in der Modellkritik zu unseren quantenphysikalischen Modellen in Kapitel 4.2 werden teils haptische Kodierungen angesprochen. Nach einer ausführlichen Begriffsklärung durch die Arbeitsdefinition und eine Einordnung und einen Vergleich mit der bildungspsychologischen Literatur wird nun das Augenmerk zunächst auf die Beziehung von *mentalen Modellen* und Lehrmodellen in der Schule und danach auf solche *mentalen Modelle* gelegt, die für die Lernprozesse in der Quantenphysik maßgeblich sind.

2.2 *Mentale Modelle* und physikalische Modelle in der Schule

Was unterscheidet das Atommodellbild im Schulbuch oder im Video von den (mentalen) Modellen, die in der Physik benutzt wurden, um sich neuen Sachverhalten zu nähern? Sind nicht die *mentalen Modelle*, welche normalerweise von physikalischen Zusammenhängen gebildet werden, solche, wie sie in den Schulbüchern stehen? Wenn die späteren Erkenntnisse aus Kapitel 3 und Kapitel 5 betrachtet werden, so wird deutlich werden, dass *mentale Modelle* und Modelle in den Physikbüchern zwar zusammenhängen, allerdings nicht

identisch sein müssen. So wird zum Beispiel bei der Betrachtung der historischen Literatur ersichtlich werden, dass die erdachten Bilder der Atome eher die Versuche waren, beobachteten Phänomenen eine Erklärung bzw. einen Sinn zu geben und ihre *Funktionalität* immer besser zu verstehen und zu erkennen (siehe Kapitel 4.1). So ist vor allem Thomson zu nennen, der sich explizit diesem eher poetischen Ansatz verschrieb und dies auch von seinen Schülern verlangte. Die Bilder sind also einem eher pragmatisch orientierten Prozess erwachsen.

Der Kernpunkt der meisten „physikalischen Modelle“ ist in diesem Sinne also die Darstellung von Funktionen mittels Metaphern oder Analogien (*Gestalten*), die Lernenden als Anhaltspunkt oder Veranschaulichung gegeben werden (siehe auch AEBLI, 1968). Viele Lernende allerdings haben nicht dieses tiefe Verständnis von Modellen. Sie entwickeln es meist „andersherum“ – zunächst treffen sie auf die *Gestalt* der Modelle und müssen nicht nur erkennen, dass die *Gestalt* die *Funktionalität* eines Phänomens kodieren soll – nein, sie müssen anhand dieser dann auf die „richtige“ Funktion schließen, die dargestellt werden soll (ebd.). Gegeben sei zum Beispiel das Bohrsche Atommodell: Eine der Funktionen, die vermittelt werden soll, ist die Energiequantelung der Elektronen in der Atomhülle. Die meisten verbinden aber immer noch als Hauptfunktion das Kreisen des Elektrons um den Atomkern (BAYER, 1986); die „falsche“ Funktion wird aus der *Funktionalität* des Modells herausgelesen.

Wie aber entwickelt sich nun das Metaverständnis von den Modellen zum Beispiel im Schulbuch oder in einer Zeitschrift? Eine der bekanntesten und einflussreichsten Studien zum Modellverständnis haben GROSSLIGHT et al. (1991) durchgeführt. Sie untersuchten insgesamt 55 Schülerinnen und Schüler in Einzelinterviews, wobei davon 33 in eine 7. Klasse gingen und 22 in eine 11. Klasse. Außerdem befragten sie vier „Experten“. Zusammenfassend schrieben sie über ihre Ergebnisse:

„We found that students in both groups have conceptions of models that are basically consistent with a naive realist epistemology. Thus, they are more likely to think of models as physical copies of reality that embody different spatiotemporal perspectives than as constructed representations that may embody different theoretical perspectives.“

(GROSSLIGHT et. al, 1991, S. 1)

Die Studie von GROSSLIGHT et al. beleuchtete das erste Mal das generelle Verständnis wissenschaftlicher Modelle, wobei die Studie nicht nur in diesem Sinne vielseitige qualitative Facetten beleuchtete, sondern auch wichtige Aspekte zur Entwicklung des Modellverständnisses erhob. Zwar handelt es sich bei GROSSLIGHT et al.'s Studie um eine Querschnittstudie, weshalb der Entwicklungsweg einzelner Lernender nicht nachverfolgt wurde, aber grobe Tendenzen sind dennoch vorhanden. Es gelang ihnen, drei „levels“ des Modellverständnisses zu isolieren. Dabei sehen die Personen, die eher zu *level 1* gehören, Modelle als Abbilder der Realität und Personen, die eher zu *level 2* gehören, als veränderte Abbilder der Realität, die verschiedene Aspekte der Realität herausstellen sollen. Die Personen, die *level 3* erreichen, sehen die Modelle als Ideenträger, die zu einem bestimmten Zweck geschaffen wurden und die sich durch Tests an der Realität weiterentwickeln können. Eine tabellarische Auflistung der *level* (Stufen) ist in **Tab. 1.** zu sehen.

GROSSLIGHT et al. schafften es aber in ihrer Studie nicht nur, eine erste grobe Klassifizierung für die Verständnistiefe im Rahmen von wissenschaftlichen Modellen zu geben. Dadurch, dass sie Lernende der Klassenstufe 7 und der Klassenstufe 11 befragten, konnte auch in Ansätzen nachgewiesen werden, dass sich diese Modellstufen nacheinander entwickeln: So fanden GROSSLIGHT et al., dass die Lernenden der 7. Klasse sich hauptsächlich auf Stufe 1 befanden (67%), aber die Lernenden in der 11. Klasse eine Mischung aus Stufe 1 und 2 (36%) oder Stufe 2 (36%) erreicht hatten. Eine generelle Vertiefung des Modellverständnisses mit der Zeit scheint in diesem Rahmen plausibel, auch wenn aufgrund der geringen Stichprobenanzahl diese Ergebnisse nur Trends sind.

Auch in den heutigen Schulbüchern sind Modellbilder zu finden, wobei sie in diesem Fall zumeist allerdings im Hinblick auf den Modellcharakter unkommentiert (oder nur als „Modell“ betitelt) aufgeführt werden (z.B. FORJAN & SLISKO, 2014). Dadurch, dass oft nicht transparent gemacht wird, welchen Zweck die abgebildeten Modellbilder haben, wird vermutlich zusätzlich suggeriert, dass Modelle auch die *Gestalt* von Dingen wiedergeben und nicht nur die *Funktionalität* bzw. ein abstraktes Konzept. Nichtsdestotrotz ist es naheliegend, dass die *mentalen Modelle*, welche Lernende sich zum Beispiel vom Atom bilden, zumindest an bestehende Bilder angelehnt und nicht neu erdacht sind. Ob die Bilder richtig interpretiert werden – als Repräsentanten für *Funktionalität* - bleibt dabei aber fraglich.

Es ist in diesem Zusammenhang aber festzustellen, dass die *mentalen Modelle* vieler physikalischer Phänomene, welche Lernende produzieren, oft mit der Hilfe physikalischer Modelle aus z.B. Schulbüchern oder dem Fernsehen aufgebaut werden und daher zumindest ein theoretischer Zusammenhang zwischen *mentalen Modellen* in der Physik und physikalischen Modellen bei Lernenden existiert. Dieser theoretische Zusammenhang ist in der Tat auch empirisch von uns nachgewiesen worden, wie näher in Kapitel 3 erläutert wird. Zunächst wird aber die bisherige Beforschung *mentaler Modelle* in der Quantenphysik im Allgemeinen dargelegt.

Tab. 1. Die Stufen des Modellverständnisses nach GROSSLIGHT et al. (1991). Die Stufen (*level*) beschreiben qualitativ die Tiefe des Modellverständnisses (frei übersetzt).

Modellstufe	Eigenschaften
Stufe 1 (<i>level 1</i>)	Innerhalb dieser Stufe des Modellverständnisses werden Modelle als Spielzeuge oder einfache Kopien der Realität gesehen. Der Zweck eines Modells für Personen auf dieser Stufe ist es, eine Kopie von Objekten oder Handlungen zu sein. Eventuelle Diskrepanzen zwischen Modell und Realität können nicht explizit gegeben werden.
Stufe 2 (<i>level 2</i>)	Die zweite Stufe des Modellverständnisses unterscheidet sich insofern von der Stufe 1, dass dem Lernenden klar wird, dass das Modell zu einem bestimmten Zweck konstruiert wurde. Daher spielen die Gedanken und Ideen der Modellierer eine Rolle, da diese Aspekte des Modells bewusst so darstellen, dass sie einen Zweck erfüllen. Im Zuge dessen können Modelle veränderte Abbilder der Realität sein, bei denen das Augenmerk auf bestimmte Aspekte der Realität von den Modellierern gelegt wird (z.B. durch Hervorheben, Vereinfachen, Hinzufügen von Symbolen, Verwendung verschiedener Versionen). Trotzdem liegt der Fokus hier noch auf der Realität, die modelliert wird, aber nicht auf den Ideen, die dargestellt werden. Tests des Modells werden so interpretiert, dass das Modell und nicht die Idee dahinter getestet wird.
Stufe 3 (<i>level 3</i>)	Die letzte Stufe des Modellverständnisses ist schließlich charakterisiert durch drei Aspekte: <ul style="list-style-type: none"> (1) Modelle repräsentieren abstrakte Ideen und diese können durch das Modell getestet werden. Modelle stellen keine Kopien der [Gestalt der] Realität dar. (2) Der Modellierende erstellt das Modell zu einem bestimmten Zweck und wählt dabei aus verschiedenen Designs aus, um das zu finden, was die Idee des Modells wiedergibt. (3) Das Modell kann angepasst werden, um neue Ideen zu generieren, welche in neuen Modellen [oder angepassten Modellen] ausgedrückt werden. Dadurch geben Modelle Informationen durch einen konstruktiven Kreisprozess.

2.3 *Mentale Modelle* von Lernenden in der Quantenphysik

Die Physik beschreibt zentrale Funktionen, welche eingebettet in Phänomenen beobachtet werden können (GRECA & MOREIRA, 2000). Es ist also zumindest in der Physik, aber auch in anderen Naturwissenschaften (siehe die Beispiele zu Verständnistyp IV verschiedener *mentaler Modelle* der Chemie und Biologie in Kapitel 5) so, dass das Erkennen von Funktionen in verschiedenen Phänomenen und Transferieren von Funktionen ein wichtiger Punkt ist (ebd.). Dabei wird aufgrund ihrer Präzision als Beschreibung der Funktionen oft die „Metasprache“ der Mathematik gewählt. Auch wird es durch die Mathematik einfacher,

Funktionalitäten bzw. Konzepte in (hierarchischen) Netzwerken zusammenzufassen, die das Grundgerüst des jeweiligen Wissenschaftsverständnisses bilden (SAMAPURGAVAN & WIERS, 1997).

In diesem Sinne sind *mentale Modelle* die Grundbausteine eines wissenschaftlichen Verständnisses und es ist von Wichtigkeit, sie zu untersuchen, um die mit ihnen verbundenen kognitiven Hürden besser zu verstehen. Neue Einblicke hierzu liefern die Ergebnisse unserer empirischen Studie, welche im Fokus von Kapitel 3 stehen wird, nachdem in den folgenden Abschnitten ein Abriss des IST-Zustandes der Forschung zu quantenphysikalischen *mentalen Modellen* erfolgt. Nachdem das *mentale Modell* eingeführt ist, wird der Blick auf die gängigen Vorstellungen von Lernenden in der Quantenphysik fallen. Der Begriff des *mentalen Modells* wird in diesem Abschnitt verwendet; wenn die Autoren diesen nicht explizit in ihren Veröffentlichungen benutzen, wird der originale Begriff in Klammern ergänzend aufgeführt. Begriffe wie *Schülervorstellungen* oder *Präkonzepte* werden als *mentale Modelle* gesehen werden, da sie alle unter die in Kapitel 2 dargelegte Arbeitsdefinition des *mentalen Modells* fallen.

Das Lernen am Modell spielt im naturwissenschaftlichen Unterricht eine große Rolle und dient dazu, neue Vorstellungen aufzubauen (siehe z.B. SEEL, 2017), also die Bildung neuer *mentaler Modelle* zu erleichtern und die Ausschärfung bestehender zu fördern. In der Schule werden nach Angaben von Lehrerinnen und Lehrern am meisten die Modelle von Bohr, Thomson, Rutherford und Schrödinger-Born dazu verwendet, die Bildung *mentaler Modelle* von Atomen zu begünstigen, wobei hier nicht immer ganz klar ist, inwiefern die einzelnen Modelle im Unterricht getrennt werden (UBBEN & HEUSLER, 2019a; BÄUERLE & HARREIS, 1980). So ist es zum Beispiel häufig der Fall, dass die Bahnvorstellung Rutherford oder Bohr zugesprochen wird, tatsächlich ist sie aber schon bei THOMSON (1903) zu finden (siehe z.B. BÄUERLE & HARREIS, 1980). Die wichtigsten Modelle sind aber nach Lehrereinschätzung das Orbitalmodell nach Schrödinger und Born, das Bohrsche Atommodell und das Rutherfordsche Modell (UBBEN & HEUSLER, 2019a).

Bei einer Betrachtung von charakteristischen Vorstellungen, welche bei Lernenden als *mentale Modelle* für das Atom erhoben wurden, muss also immer im Hinterkopf gehalten werden, dass bei einigen der auftauchenden Problematiken auch Lehrer und Unterricht der Lernenden eine große Rolle spielen. So darf auch bei der Suche nach Ursachen für inadäquate Modellvorstellungen dies nicht unbeachtet gelassen werden.

Die Anführung der folgenden Untersuchungen dient zwei Zielen: Sie sind zum Einen dazu gedacht, ein breites und detailliertes Bild zu den bereits erhobenen Erkenntnissen über *mentale Modelle* in der Quantenphysik zu zeichnen und sie sind zum anderen dazu gedacht, die große Problematik des Festhaltens an klassischen Bildern bei Lernenden darzustellen. Dabei werden zur Beschreibung auch die Begriffe *Gestalt* und *Funktionalität* im Rahmen der Arbeitsdefinition verwendet, um einen Bezug zu dieser herzustellen.

Eine umfassende Metastudie liefern KRIJTENBURG-LEWERISSA, POL, BRINKMAN und VAN JOOLINGEN (2018). Auf Basis dieser Metastudie und einer genaueren Analyse der Arbeiten von MÜLLER (2003), LICHTFELDT (1992), BETGHE (1988a, 1988b), BAYER (1986, 1985), BORMANN (1986) und weiteren wird in diesem Abschnitt ein genauerer Stand der Forschung zu Arten von *mentalen Modellen* bei Lernenden in der Quantenphysik dargelegt.

Beginn der Forschung

Die Untersuchungen zu *mental*en Modellen (orig. in dieser Zeit meist „Schülvorstellungen“) in der Quantenphysik sind relativ jung – die frühesten publizierten Papiere zu diesem Thema finden sich Mitte der 70er Jahre (z.B. KNOTE, 1975). Ein Ergebnis von KNOTES Studie war, dass Lernende in der 9. Klasse zum größten Teil ein „Kern-Hülle Modell“ mit dem Begriff „Atom“ in Verbindung bringen. Sowohl von der Jahrgangsstufe als auch der Elaboriertheit eines solchen Modells her gesehen kann an dieser Stelle aber noch nicht von einem quantenmechanischen Modellbild gesprochen werden, da das Kern-Hülle-Modell ein klassisches Modell ist. Doch schon 1980 wird als häufigster Nachfolger für das Kern-Hülle-Modell das sogenannte „Planetenmodell“ von BÄUERLE und HARREIS (1980) angeführt, welche dies im Rahmen einer Volkshochschulstudie aus ihren empirischen Daten folgerten.

Diese Vorstellung des Atoms als Miniaturausgabe eines Planetensystems findet sich seither in den Befunden vieler darauffolgender Studien zu Vorstellungen zur Quantenphysik. Dabei ist bei der Betrachtung der Studien zu diesem *mental*en Modell allerdings festzuhalten, dass Bezeichnungen teils recht grob sind: Die Kernaussage des „Planetenmodells“ ist zunächst einmal nur ein Kreisen von kugelförmigen, festen Elektronen um ein Zentrum – den Nukleus. Ein Zusammenhang mit den Bohrschen Quantisierungsbedingungen kann nicht immer dieser Modellvorstellung zugeschrieben werden, so dass *verbotene Bereiche* oder *Quantensprünge* nicht zwingend dieser Vorstellung zugewiesen werden dürfen. So ist häufig nicht klar, ob das gezeichnete oder verbal beschriebene Modellbild der Probanden auf ihr eigenes mentales Bild in Bezug auf die Bewegung des Elektrons oder auch auf die Quantisierung der Bahn bezogen ist. Dies war schon bei BÄUERLE et al. (1980) eine Problematik, da sie das Planetenmodell als Bohrsches Modell auffassten – wobei eine Differenzierung hinsichtlich eines eventuell eher Rutherford'schen Modells nicht unternommen wurde. Im internationalen Raum gab es später ähnliche Ergebnisse: So untersuchten ABDO und TABER (2009) 18 schwedische Schülerinnen und Schüler im Alter von 16 Jahren auf ihre *mental*en Modelle (orig. „concepts“) hin. Die Probanden hatten dabei alle noch ein klassisches „Planetenmodell“, wobei die Hälfte von ihnen in diesem Zusammenhang Bohrsche Bahnsprünge anführte. Auch BAYER (1986, 1985) kommentierte diese sprachliche Unschärfe in seinen Untersuchungen von *mental*en Modellen (orig. „Vorverständnissen“): Seiner Erfahrung nach schätzte er das „Planetenmodell“ wie folgt ein:

"Damit ist nicht das Bohrsche Atommodell mit seinen Postulaten gemeint, sondern einfach die Aussage: Elektronen umkreisen den Atomkern."
(BAYER, 1986, S. 249)

Damit verbunden kam er außerdem zur Erkenntnis, dass Schülerinnen und Schüler häufig ein mechanistisch geprägtes Teilchenbild des Elektrons und ein Planetenmodell mit auf Bahnen kreisenden Elektronen vorziehen. Seine Untersuchungen führte er dabei mit Lernenden der 12. Jahrgangsstufe durch, wobei seine Arbeit rein qualitativ orientiert war und anhand von Interviews entstanden ist. Er diagnostizierte bei rund der Hälfte der Lernenden ein solches „Bahnenmodell“ und erfasste in diesem Zusammenhang auch ein mechanistisches Elektronenbild in Form kleiner Kugeln.

Dass der Teilchencharakter eine so prägnante Rolle besitzt und dem Wellenbild vorgezogen wird, legte im selben Jahr auch BORMANN (1986) in einer Studie dar. Er untersuchte, wie sich das *mentale Modell* (orig. „Vorverständnis“) des Elektrons als Kugel auf einer Bahn beim Hinzukommen einer neuen Beschreibung der Elektronen als Wellen ändert. Dabei stellte auch er fest, dass die Bahnvorstellung durch den Wellencharakter modifiziert (Probanden sprachen von „Streuung“ oder „sinusförmigen Bahnen“) und nicht aufgegeben wurde (siehe auch Kapitel 6 „Conceptual enhancement“). Zwar wurde BORMANNs Studie kurz nach der ersten Begegnung der Lernenden mit Beugungsphänomenen durchgeführt – eine langfristige Änderung ist also an dieser Stelle nicht dokumentiert – aber die Schwierigkeit dieser ersten Konfrontation und das Festhalten am Bahnbegriff sind ausführlich erhoben worden. Auch schon 1984 wurden ähnliche Erkenntnisse von GÖRITZ und WIESNER (1984) gewonnen: Sie publizierten ebenfalls den Fund, dass Schülerinnen und Schüler im Zuge der Entwicklung quantenmechanischer Vorstellungen dazu neigen, Wellen- und Teilchencharakter so zu vereinen, dass sie sich bewegende Elektronen als Kugeln sehen, die eine wellenförmige Bewegung vollführen. Andere spätere Studien gaben ebenfalls Hinweise darauf, dass sowohl Photonen als auch Elektronen als Teilchen gesehen werden, die auf Wellenbahnen fliegen und so eine erste Interpretation eines Welle-Teilchen-Dualismus gegeben wird (MASSHADI & WOOLNOUGH, 1999; OLSEN, 2002).

Ähnlich dieser Erkenntnisse für die quantenphysikalischen *mentalen Modelle* freier Elektronen entdeckte BAYER (1986) in seiner Studie, dass auch in der Atomhülle die Bahnvorstellung nahezu nie aufgegeben wird und immer als Ausgangspunkt für die quantenmechanischen *mentalen Atommodelle* (orig. „Vorstellungen“) der Schülerinnen und Schüler genutzt wird. Auch BETHGE (1988a, 1988b) bestätigte diese Erkenntnisse und fand in einer empirischen Untersuchung, bei der 13 Oberstufenkurse (N=142) mittels eines Fragebogens befragt wurden und zusätzlich von 25 Schülerinnen und Schülern Datenmaterial mittels Interviews erhoben wurde, dass die Bahn ein zentraler Kern der *mentalen Modelle* (orig. „Vorverständnisse“) der Befragten ist. Er vermutet, dass die Attraktivität des Bahnbegriffs daran liegt, dass er eine „Anfaß- und Vorzeigerealität“ (BETHGE, 1988a, S.250) mit sich bringt, was auch ENGELHARDT und WIESNER (1986) als Grund vermuteten.

Auch traf BETHGE detailliertere Aussagen über Lernende, die den Bahnbegriff als Bewegung ablehnen bzw. umdeuten. So berichtete er von Lernenden, die zwar den Bahnbegriff aufgaben, aber dadurch vor einem für sie unlösbar scheinenden logischen Konflikt standen: Ohne Bahn gab es in ihrer Vorstellung keine Bewegung, und ohne Bewegung machte es keinen Sinn, ein Elektron an verschiedenen Orten bei zwei verschiedenen Messungen anzutreffen. Die anderen Lernenden hielten sich eher an der *Gestalt* der Bahn fest und behielten die geometrische Form bei, wobei die „Bahn“ nun zu einem „Kanal“ wurde, in dem die Elektronen irgendwo herumflogen. Es konnte also von einer Gruppe gesprochen werden, die sowohl Aussehen und Funktion des Bahnbegriffs bei der Weiterentwicklung mentaler Atommodelle aufgab, und von einer Gruppe, die nur die *Funktionalität* (Bahnbewegung) aufgab aber das Aussehen beibehielt („geometrische Form“, BETHGE, 1988a, S. 251, vgl. auch Kapitel 7).

Studien in den 90er Jahren

Die nächste große Studie führte LICHTFELDT (1992) durch. Er befasste sich mit den *mentalen Modellen* (orig. „concepts“) von Quantenphysik vor und während des Quantenphysikunterrichts in der Oberstufe. Er stellte dabei ebenfalls an einer Kontrollgruppe die tiefe Verankerung des Bahnbegriffs vor und nach dem Quantenphysikunterricht der Oberstufe fest. In einer Interventionsstudie gelang es LICHTFELDT, die Vorstellung der Kreisbahn zu vermindern und anstelle dessen eine Vorstellung, die er unter „Lokalisation“ fasste, zu stärken. Dabei wird allerdings nicht deutlich, ob die befragten Schülerinnen und Schüler ein *mentales Modell* besaßen, bei dem sich das Elektron nicht auf einem Weg bewegte, da die Aussagen sich nicht eindeutig einer Ablehnung einer ontischen Bahn zuordnen lassen. Die Möglichkeit, dass nur der Beobachter die Trajektorie nicht kennen kann, sie aber trotzdem im „ungemessenen“ Zustand vorhanden ist, wurde dabei nicht weiter untersucht. Leider wurden diese beiden Aussagen beide als „Bahnvorstellung ablehnend“ klassifiziert, sodass hier keine genaue Aussage über die Art der Ablehnung getätigt werden kann.

Im Jahr 1996 publizierten HARRISON und TREAGUST (1996) eine Studie, die mittels Interviews Studentinnen und Studenten der Chemie zu verschiedenen Modellbildern befragte. Dabei stellten sie heraus, dass nicht nur ein Bohrsches Modell als Abbild der Realität gesehen werden kann, sondern auch das Orbitalmodell: Einige Probanden beschrieben die Elektronenwolke als eine Substanz, in der Elektronen sich bewegten. Sie gaben an, dass man diese Substanz sogar „sehen“ könne, wenn die technischen Mittel da wären. Auch grenzten sie die Substanz klar von den Elektronen selbst ab. Zusätzlich bestätigten sich viele der bereits zuvor erhobenen Erkenntnisse: Lernende ziehen oft (mentale) Modelle mit konkreten, festen *Gestalten* vor und glauben, dass diese auch in solcher Form „real“ existierten. Auch kritisierten HARRISON et al., dass kein Metawissen über Modelle angesprochen und aufgebaut wurde. Dies ist mitunter die erste Kritik an Modellbildung im Unterricht aus der Richtung *Nature of Science* ; dabei forderten sie eine curriculare Einbindung von Modellierungskompetenz.

Eine sehr detaillierte qualitative Studie über die Veränderung der *mentalen Modelle* zur Atomhülle wurde von PETRI und NIEDDERER (1998) durchgeführt (siehe auch PETRI, 1996). Diese Untersuchung ist vermutlich die bis heute detaillierteste Studie zur Entwicklung eines quantenmechanischen mentalen Modells aus einem Planetenmodell. PETRI et al. begleiteten dabei einen Schüler namens „Carl“, während dieser eine Unterrichtsreihe zur Quantenphysik in der Oberstufe (Klasse 13) durchlief. Dabei war es ihr Ziel, Carls „*learning pathway*“ zu dokumentieren. Einen *learning pathway* beschrieben sie dabei als „*stroboscopic description of learning processes*“ (ebd., S. 1076), also mehrere Momentaufnahmen des Lernstandes und die Untersuchung der Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen diesen. Dafür sammelten sie Schriftstücke, Videos und Interviews verschiedener Länge, die sie mit dem Probanden Carl durchführten. Dabei startete Carl mit einem *mentalen Modell* (orig. „conception“), das dem Bohrschen Atommodell sehr ähnlich war und in dem Elektronen auf einer diskreten Bahn um den Atomkern kreisten. Nach fünf Wochen und der Behandlung der Themen „Kollaps der Wellenfunktion“ und „Heisenbergsche Unschärferelation“ schien Carl sein *mentales Modell* zu modifizieren und sprach von und zeichnete nun „verschmierte“ Bahnen, die er durch ein subjektives Unwissen verursacht sah. Er sprach zu jenem Zeitpunkt auch direkt die Bahn an und sagte, dass er sich nicht davon „loslösen könne“, auch wenn er nicht

wisse, woher er die Vorstellung überhaupt habe (PETRI & NIEDDERER, 1998, S. 1081). Zum Ende der Unterrichtsreihe hatte sich Carls Verständnis erneut gewandelt: Er sprach nun von einem „Zustandselektron“, einer Welle, die überall um den Atomkern herum besteht und bei Messung zu einem Teilchen kollabiert. Am Ende der Unterrichtsreihe jedoch zeigte sich, dass er noch immer das Bohrsche Modell als das stärkste ansah und es oft als erstes Modell heranzog, obwohl er auch reflektierend angab, dass das Modell nicht das wissenschaftlich genauere sei und dem Orbitalmodell mehr Vorteile zugesprochen werden können: Das Bohrsche Atommodell hatte nach Carls Angaben einen geringen „Status“. PETRI et al. hielten am Ende ihrer Untersuchungen fest, dass in Carls Fall am Ende der Unterrichtszeit zwei verschiedene Modelle koexistierten – das Bohrsche Atommodell, welches bildlich anschaulicher sei und das Orbitalmodell, welches besser funktioniere.

Neben der Arbeit von PETRI et al. wurde 1998 auch noch eine Studie im englischsprachigen Raum von JOHNSTON, CRAWFORD und FLETCHER (1998) publiziert. Sie untersuchten eine Gruppe Studenten in ihrem dritten Semester vor und nach einer Quantenmechanik-Vorlesung. Dabei erhoben Sie mittels offener Fragen auf Fragebögen einige Vorstellungen zu quantenmechanischen Konzepten wie Eigenfunktionen oder der Bedeutung des Potentialtopfes, wobei sowohl im Pre- als auch im Posttest Fragen gestellt wurden, die die *mentalen Modelle* (orig. „concepts“) im Zusammenhang mit den Konzepten *Wellen* und *Teilchen* erheben sollten. Sie fanden heraus, dass die Studenten im Rahmen ihrer Fragen auf drei unterschiedlichen Stufen eine Beschreibung für die Konzepte „Welle“ und „Teilchen“ nannten, wobei sich die Stufen nur durch eine Verfeinerung der Konzepte unterschieden. Auch schlossen sie aus ihren Daten, dass die Kenntnisse von quantenphysikalischen Phänomenen stark fragmentiert waren, da oft nur einzelne isolierte Fakten genannt wurden (siehe dazu auch Kapitel 6 oder DISessa, 2017). Auch stellten JOHNSTON et al. (1998) fest, dass zu Beginn des Semesters die Konzepte *Teilchen* und *Welle* isoliert betrachtet und nur als einzelne Entitäten beschrieben wurden – wobei die Aussagen hier kategorisiert wurden mittels „Teilchen bestehen aus Zeug“ bzw. „einfache Welleneigenschaften (Wellenlänge, Bewegungsgeschwindigkeit, Frequenz)“ (JOHNSTON et al., 1998). Am Ende des Semesters hatten sich diese Konzepte in den meisten Fällen dahingehend verändert, dass *Welle* und *Teilchen* nicht mehr isoliert betrachtet, sondern dahingehend erweitert wurden, wie sie im Zusammenhang mit Dingen außerhalb ihrer selbst betrachtet wurden. Dieser Beginn der Entwicklung eines Netzes an *mentalen Modellen* – welches sich am Ende des Semesters noch in einer unausgereiften Form zeigte – wurde von den Autoren mit der Entwicklung des konzeptuellen Verständnisses bei jungen Schulkindern verglichen. Auch merkten sie an, dass sie im Gegensatz zu Schulkindern allerdings keine großen Fortschritte in der weiteren Entwicklung der Modellvernetzung erwarteten, da die Ausbildung der getesteten „guten Studenten“ (JOHNSTON et al., 1998, S. 442) zum Zeitpunkt des Posttests nahezu abgeschlossen war. Als Grund für die schwierige Ausbildung eines Gesamtkonzeptverständnisses führten JOHNSTON et al. die häufige Aussage der Studenten an, dass alles Mathematik sei und daher schwierig ein Zusammenhang zu anderen bereits vorhandenen Konzepten hergestellt werden könne. In diesem Sinne empfahlen die Autoren, *mentale Modelle* anzuleiten, die eher von stark *funktionaler* (orig. „relationaler“) Natur sind.

Ende der 90er gelang auch international die Forschung zu *mentalen Modellen* (orig. „concepts“) in der Quantenphysik mehr in den Fokus der Physikdidaktik. Die mitunter erste multivariate Analyse im Zusammenhang mit *mentalen Modellen* (orig. „understanding“) der Quantenphysik

hat zum Beispiel IRESON (1999) durchgeführt. Er gab eine Liste von 40 Aussagen an 225 Zweitsemesterstudenten der Physik. Nach Analyse der Cluster konnte IRESON drei Gruppierungen identifizieren, die er „Quantendenken“, „Zwischendenken“ und „mechanistisches Denken“ nannte, wobei die Kategorien nicht immer zutreffend zu sein scheinen (so wird ein Elektron, das sich auf einer Welle um den Kern bewegt von ihm als „Quantendenken“ bezeichnet). Auch zeigte sich, dass bei der Mehrzahl der Studenten ein duales Denken zu beobachten ist, was sich augenscheinlich mit der Aussage eines einzelnen definiten Atommodells zu widersprechen scheint. Eine mögliche Auflösung dieser Problematik wird durch die Ergebnisse von Kapitel 3 gegeben.

Neuere Entwicklungen und Erkenntnisse

Unter Betrachtung der ihnen zur Verfügung stehenden Forschungsergebnisse kamen unter anderem MÜLLER und WIESNER (2002) zu dem Schluss, dass die Fehlkonzepte zum Teil durch die „traditionelle Art“ der Vermittlung von Quantenphysik zustande kommen und entwickelten und untersuchten daher eine Alternative zu diesen traditionellen Unterrichtsgängen: das Münchener Unterrichtskonzept (siehe auch MÜLLER, 2003). Das Unterrichtskonzept fokussierte sich dabei auf die Unterschiede zwischen klassischer Physik und Quantenphysik, sowie darauf, sprachliche Barrieren wie zum Beispiel doppeldeutige Wörter zu minimieren. Im Zuge dessen arbeiteten KÜBLBECK und MÜLLER (2002, S.25) auch vier zentrale Wesenszüge heraus, die sie als „Schlagworte“ der Quantenphysik verstanden. Damit wurde das Augenmerk auch auf einen eher qualitativen Unterrichtsansatz gelegt.

Der große Anteil an Mathematik, den die Quantenphysik aus Sicht vieler Lernender mit sich bringt (siehe z.B. JOHNSTON et al., 1998), wurde auch von KALKANIS, HADZIDAKI und STAVROU (2003) als eines der Probleme beim Erlernen der Quantenmechanik gesehen, weshalb sie ebenfalls einen qualitativen Zugang zur Quantenphysik ermöglichen wollten. Nach ihrer Unterrichtseinheit stellten sie fest, dass der überwiegende Teil (>90%, 98 Lernende) der Gruppenteilnehmer, welche an ihrem qualitativen Zugang teilgenommen hatten, quantenphysikalisch als von ihnen korrekt bewertete Zeichnungen von Atomen produzierten, wohingegen dies in der Testgruppe ohne Intervention nicht der Fall war (>70% Planetenmodell, 102 Lernende). Auch stellten sie bei der Gruppe, die mittels des qualitativen Zugangs gelernt hatte, ein erhöhtes Wissenschaftsbewusstsein fest. Ihre Interventionseinheit machte dabei hauptsächlich Gebrauch von wissenschaftshistorischen bzw. philosophischen Ansätzen sowie Visualisierungen von Orbitalen.

Im selben Jahr wählten auch GRECA und FREIRE (2003) einen ähnlichen Ansatz, in dem sie die Wissenschaftsgeschichte benutzten, um eine kohärente Interpretation der Quantenphysik bei Universitätsstudenten zu begünstigen. Auch sie stellten fest, dass im damaligen Regelstudium die Quantenphysik an die klassische Physik „angebaut“ wird und kein von der klassischen Mechanik losgelöstes Konzeptwissen entsteht.

TABER (2004) untersuchte die Problematik der quantenmechanischen Atommodelle aus dem Blickwinkel der Chemie. Er versuchte, die Problematiken beim Lernen von quantenmechanischen Phänomenen und Konzepten unter vier Kategorien zu fassen: unzureichendes Hintergrundwissen, fragmentiertes Konzeptwissen, ontologische Schwierigkeiten (z.B. Spin als eine Rotation im wahrsten Sinne des Wortes) und

pädagogische Lernschwierigkeiten. Dabei ist anzumerken, dass die Definitionen von TABER nicht immer scharf und eindeutig anzuwenden sind. Er stellte aber ebenfalls Problematiken fest wie fragmentiertes Konzeptwissen, falsches Vernetzen von Fachbegriffen und das Festhalten an mechanistischem Denken. Er deckte vor allem die bei seinen Probanden weit verbreitete Tendenz auf, die Quantenphänomene als herunterskalierte Phänomene der Lebenswelt zu sehen und führt damit weiter die Tendenz von Lernenden an, Quantenphänomene mit Phänomenen der Alltagswelt zu beschreiben. Ein bezeichnendes Beispiel hierfür ist laut TABER der Elektronspin: Das Elektron wird als rotierende Kugel beschrieben und der Spin nicht als intrinsische funktionale Eigenschaft eines Teilchens erkannt. Auch führte TABER ein sprachliches Problem an: im Englischen ähneln sich die Begriffe für *Orbital* und *Orbit* – ähnlich wie im Deutschen – sodass Lernende glauben, der „Orbit“ wird nur anders benannt.

Doch nicht nur TABER begann, *mentale Modelle* (orig. „ideas“) neben denen zur *Atomhülle* zu untersuchen – bereits angeführt wurde in diesem Rahmen der Spin. Andere *mentale Modelle* (orig. „concepts“) wurden ebenfalls untersucht: Die mitunter erste Studie zum Lernendenverständnis des Tunneleffekts haben WITTMAN, MORGAN und BAO (2005) durchgeführt. Dabei stellten sie fest, dass viele Lernende die Vorstellung hatten, dass an der Tunnelbarriere Energie verloren geht und nicht nur die Wellenfunktion und damit zusammenhängend die Aufenthaltswahrscheinlichkeit kleiner wird. Es fand also eine häufige Verwechslung der Konzepte „Wellenfunktion“ und „Energie“ statt.

Einen neuen Ansatz zur Vermittlung brachten auch KE, MONK und DUSCHL (2005), welche mittels sensomotorischer Reize eine Hilfe bei der Entwicklung mentaler Modelle in der Quantenphysik schaffen wollten. Sie kritisierten, dass mathematische Transformationen und Werkzeuge die Quantenmechanik zwar handhabbar machen, jedoch damit einhergehend bei weitem kein Konzeptverständnis garantiert ist. In einer Studie nutzten sie einen Fragebogen zur Erhebung von mentalen Modellen und identifizierten Teilnehmer, die „alternative Konzepte“ besaßen. Diese Personen wurden dann in Interviews genauer zu ihren Antworten befragt und darum gebeten, Begriffsnetze aus Stichwortkarten zu legen. Von den 104 Befragten wurden 11 zu den Interviews und der Erstellung der Begriffsnetze geladen. Sie ordnen die Antworten nach drei Modellstufen: dem frühen quantenmechanischen Modell (z.B. Planetenbahnen), einem Modell beim Übergang auf die Wellenmechanik (z.B. wellenhafte Planetenbahnen) und der probabilistischen Wellenmechanik (z.B. Wahrscheinlichkeitswelle). Dabei wurden die Antworten nach ihren Feststellungen im Zusammenhang mit fortschreitender Modellstufe zusehends inkohärenter. KE ET AL. stellten aber auch fest, dass die Probanden nicht eindeutig einer Kategorie zugeordnet werden konnten – es fanden sich sogar Teilnehmer, die Aspekte der ersten und letzten Stufe vereinigten. KE ET AL. versuchten, die starke klassische Verankerung der *mentalen Modelle* mittels einer Verknüpfung zu klassisch bekannten Handlungen zu erklären – so soll zum Beispiel das Kreisen der Elektronen den Lernenden vertraut dadurch sein, dass man eine Steinschleuder kreisen lässt. Sie empfahlen, auch Wellenphänomene erlebbar zu machen, um die „Teilchenerfahrungen“ zu kontrastieren und eine Basis für *mentale Modelle* der probabilistischen Wellenmechanik zu bieten. Auch vermuteten sie, dass dadurch der Spieltrieb – in Berufung auf PIAGET – einfacher genutzt wird und motivationssteigernd wirken kann. Zwar könnte eine Ergänzung durch sensomotorische Erfahrungen hilfreich sein (siehe Kapitel 2.4 und 6) und es ist mittlerweile bekannt, dass der Spieltrieb ein

gesondertes Motivationssystem ist (PANKSEPP, 1998), allerdings wurden diese eventuell sehr gewinnbringenden Ideen in KE et al.s Artikel nur angerissen.

Eine Untersuchung zu mentalen Modellen im Zusammenhang mit Licht in der Quantenphysik führte HUBBER (2006) als Längsstudie durch: Er begleitete 6 Schülerinnen und Schüler über drei Jahre in der Oberstufe (Klasse 10-12) und dokumentierte die Vorstellungen, die sie zu Licht hatten. Dabei fingen mindestens vier mit der Vorstellung an, dass Licht aus Strahlen bestünde (dabei ist der Strahl hier als reales Objekt gemeint und nicht als abstraktes Hilfsmittel). Sie hatten ebenfalls die Vorstellung, dass Bilder als ganzheitliche Elemente durch Strahlen übertragen werden und nicht z.B. Farbpunkte, aus denen die Bilder bestehen, in je eigenen Strahlen übertragen werden. Zu Beginn des 12. Schuljahres wandelte sich dieses Verständnis und vier der Schülerinnen und Schüler sahen das Strahlenbild des Lichts als abstrakte Repräsentation von Licht an. Dann - langsam - wurden diese mentalen Modelle weiter ausgeschärft, indem der Wellencharakter mehr oder weniger als Ausführung der Strahlvorstellung in das Modell integriert wurde. Nur in einem der sechs Fälle wurde ein Partikelmodell für Licht gewählt, um zu erklären, dass ein Lichtstrahl in alle Richtungen gestreut werden kann. Im Abschluss an die Einheit stand primär die Vorstellung, dass Licht aus Wellen oder Teilchen besteht. Dabei hielten die Lernenden Hybridvorstellungen aus Welle und Teilchen, bis auf eine Schülerin, die zwei separate Modelle unterschied. Auch sahen nun alle Probanden ihre Modellvorstellungen als abstrakte Modelle und nicht mehr als Realitätsabbilder an (siehe auch Kapitel 5.1.2).

Die Schwierigkeit der Sprache als Instrument für das Fassbarmachen und Interpretieren der Quantenphysik untersuchten unter anderem BROOKES und ETKINA (2007). Sie wählten den Ansatz, eine sprachlich kodierte Gruppe von *mentalen Modellen* in der Physik als konzeptuelle Metaphern (orig. „conceptual metaphors“) zu verstehen, die in manchen Fällen fälschlich als wortwörtlich verstanden werden können. Damit beleuchteten sie *mentale Modelle*, die in Sprache repräsentiert sind – wobei sie keine Aussagen darüber trafen, wie diese von Bildern abhängen und dies nicht weiter untersuchten. Dabei stellten sie unter anderem bei der Befragung von Physikprofessoren fest, dass diese die Sprache nur als Werkzeug verstanden, um die Physik handhabbar zu machen, und dass Sprache daher Grenzen hat, was zufriedenstellende Erklärungen angeht. BROOKES et al. betrachteten als Beispiel dieser Problematik die Quantenmechanik und analysierten die sprachlichen Ausdrücke im Zusammenhang mit dem Potentialtopf und der Bohmschen Mechanik, wobei sie im Rahmen ihrer Forschung bestätigten, dass Metaphern Lernende in der Quantenphysik dazu verleiten, diese wörtlich zu nehmen. Dies weist eine Parallelität zu dem bereits angeführten Problem auf, dass Modelle als genaue Abbilder der Realität verstanden werden.

Als MCKAGAN, PERKINS und WIEMAN (2008a) Untersuchungen zu *mentalen Modellen* (orig. „conceptual systems mapped onto patterns“) in Bezug auf den Tunneleffekt durchführten, verwiesen sie bei der Einordnung ihrer Ergebnisse ebenfalls auf die von BROOKES et al. (2007) angesprochene Problematik, dass metaphorische Sprache oft wörtlich interpretiert wird und führten dabei Beispiele des „Potentialtopfes“ oder der „Potentialbarriere“ an. Nach einer Intervention berichteten sie, dass diese Problematik subtiler geworden, aber immer noch vorhanden war und die *mentalen Modelle* sich somit als schwer veränderlich erwiesen. Ebenfalls stellten sie fest, dass Lernende ihrer Universitätskurse dazu tendierten, eher eine fachlich richtige Antwort zu geben, wenn sie diese auch erklären mussten. Dies ist ähnlich

wie bei der Studie von PETRI et al. (1998) die bei ihrem Schüler Carl bemerkten, dass er eher an das Bohrsche Modell dachte, wenn er oberflächlich zum Atom gefragt wurde, aber bei wissenschaftlichen Erklärungen das funktionalere Orbitalmodell vorzog. Als nützliche Hilfe beim Konstruieren von *mentalen Modellen*, die sie als adäquat bewerteten, führten MCKAGAN et al. dabei vor allem Diskussionen auf expliziter Ebene und im Zusammenhang mit Metawissen an. In einer anderen Studie im selben Jahr befassten sich MCKAGAN, PERKINS und WIEMAN (2008b) mit der Notwendigkeit, die Modellkompetenz zu fördern, um Lernende dazu zu bewegen, das *Orbitalmodell* (orig. „Schrödingermodell“) zu benutzen. Dabei fokussierten sie sich darauf, verschiedene Modelle in einen Gesamtrahmen einzuordnen und Querverbindungen zwischen den Modellen – auch zwischen dem Bohrschen und dem Orbitalmodell – zu betonen und zu vermitteln. Sie beriefen sich auf die komplexe aber gut dokumentierte Geschichte der Bildung von Atommodellen (siehe Kapitel 4.1) und unterbreiteten den Vorschlag, diese als Lerngegenstand für die Ausbildung von Modellkompetenz zu nutzen. Auch befassten sie sich mit der Frage, ob das Bohrsche Modell unterrichtet werden sollte, oder nicht, da ihm die meisten Probleme beim Formen „adäquater“ [mentaler] Modelle zugesprochen werden. MCKAGAN et al. argumentierten für das Unterrichten des Bohrschen Modells und wollten zeigen, dass sich ein quantenmechanisches (mentales) Modell trotz des Bohrschen Modells entwickelt. Dazu verwendeten sie eine Lerneinheit, die sich an den historischen Modellen orientierte und diese reflektierte und verglich. Die Einheit wurde in vier aufeinanderfolgenden Semestern durchgeführt, wobei in den ersten zwei das Bohrsche und das Orbitalmodell nicht in Beziehung gesetzt wurden, in den letzten beiden allerdings schon. MCKAGAN et al. erreichten es damit, dass nahezu alle der Lernenden die Funktion des Atoms mittels des Orbitalmodells beschrieben, allerdings fanden sich immer noch implizite Ansätze von Bohrs Modell, die in das Orbital eingemischt wurden (z.B. Elektronen kreisen in den Orbitalen). Dabei schien ein Hauptfaktor zu sein, dass neben den Fragen nach der Funktion der Atomhülle auch verlangt wurde, dass Studenten gleichzeitig die Distanz des Elektrons vom Kern beschreiben sollten – was für Lernende implizieren kann, dass eine Distanz existiert und daher eine Antwort im Hinblick auf die *Gestalt* suggeriert wird.

Eine Studie zum Einsatz von Atommodellen seitens der Lehrkräfte führten wir 2018 durch (UBBEN & HEUSLER, 2019a) durch. Dabei stellten wir fest, dass die nach Lehrerangaben ($N=225$) am meisten verwendeten Modelle in der Schule das Rutherford'sche Atommodell, das Bohrsche Modell und das Orbitalmodell waren, wobei die wichtigsten nach Lehrerangaben nur das Bohrsche und/oder das Orbitalmodell seien. Auch gaben zwar 80% der Lehrkräfte an, eine Modellierung von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten mittels des Orbitalmodells zu vollziehen, aber auch rund 43% gaben an, dass sie eine Modellierung mittels eines Planetensystems verwendeten. Dies bedeutet, dass mindestens 23% der Lehrkräfte ein quantenmechanisches und ein (semi-)klassisches Modell im Unterricht verwendeten. Die Effekte dieser Verwendung können aus der Studie nicht herausgelesen werden, aber es ist anzunehmen, dass er einen Einfluss auf die Bildung mentaler Hybridmodelle oder paralleler *mentaler Modelle* hat.

Es ist anzumerken, dass die Forschung zu *mentalen Modellen* in den letzten Jahren langsam zum Stagnieren zu kommen scheint. So ist es den meisten Studien der letzten zehn Jahre eher gelungen, die bisherigen Befunde zu stützen und reproduzieren, als komplett neue Erkenntnisse zu erlangen.

Zusammenfassend ist vor allem anzumerken, dass Lernende dazu tendieren, an *mentalen Modellen* festzuhalten, die sie als *gestalttreu* und *funktionalitätstreu* ansehen. Diese Art, *mentale Modelle* zu interpretieren, werde ich im Folgenden auch als *Replikativvorstellung* bzw. *dualer Verständnistyp* bezeichnen. Auch ist häufiger eine Modifikation der *Gestalt* durch das Hinzufügen neuer Funktionen zur *Funktionalität* beobachtet worden: So ist durch Hinzufügen einer „Wellenbewegung“ als Funktion zur Funktionalität des Bohrschen Modells dokumentiert, die sich in einer Sinusbahn zeigt.

3 Empirische Untersuchung zur Tiefenstruktur mentaler Modelle am Beispiel der Quantenphysik

Wie die Auseinandersetzung mit der Literatur zu *mentalen Modellen* in der Quantenphysik gezeigt hat, gibt es einige charakteristische Schwierigkeiten, die sich bei Lernenden manifestieren. Mitunter die größte Hürde ist, dass die *mentalen Modelle* in der Quantenphysik in den meisten Fällen aus klassischen Modellen schwerlich hervorgehen, wodurch in der Literatur der Dreischritt

mechanistisches Denken → Zwischendenken → Quantendenken

immer wieder auftaucht (hier angeführte Benennung nach IRESON, 1999; ähnliche auch bei z.B. KE et al., 2005). Die am meisten untersuchten *mentalen Modelle* im Zusammenhang mit der Quantenphysik sind die Modelle der Atomhülle (siehe auch Kapitel 2.3). Daher wurde dieses Themenfeld gewählt, um genauer zu untersuchen, warum sich klassische Vorstellungen in der Quantenphysik prominent halten und wie sich diese Atomvorstellungen und ihre Entwicklung charakterisieren lassen. Das größte Hindernis stellt dabei für Lernende der Übergang vom halbklassischen Bohrschen Atommodell zum abstrakten, stochastischen Orbitalmodell dar, weswegen der Forschungsschwerpunkt in diesem Kapitel auf diesen beiden Modellvorstellungen liegt.

Die bisherige Forschung in der Didaktik der Quantenphysik hat zwar große Fortschritte bei der Erhebung von quantenmechanischen Modellvorstellungen gemacht (siehe Kapitel 2.3), geht aber nicht weit darüber hinaus: Im Zuge einer Erweiterung der bisherigen Erhebungen werden darum im Folgenden nicht nur die individuellen *mentalen Modelle* selbst untersucht, sondern auch mit dem allgemeinen Modellverständnis in Verbindung gebracht. Dadurch lassen sich zusätzliche Daten über ein verwandtes grundlegendes Problem erheben: So zeigen die Untersuchungen von GROSSLIGHT et al. (1991) und TREAGUST, CHITTLEBOROUGH und MAMIALA (2002), dass auch allgemein im Zusammenhang mit der Beurteilung der Realitätstreue am Aussehen von Modellen festgehalten wird: Der Anteil der Lernenden, die Modelle als skalierte Replikationen der Realität sehen, liegt in den betreffenden Studien bei etwa 70% bzw. 62% Prozent. Es stellt sich dabei die Frage, ob es die Replikatorvorstellung ist, die die Lernenden daran hindert, klassische, anschauliche Modellvorstellungen aufzugeben. Um dies herauszufinden, müssen beide Problemfelder verglichen werden, was im Zuge dieser Arbeit mittels einer Analyse ihrer Korrelation erfolgt:

Forschungsfrage 1 (FF1):

Existiert ein Zusammenhang zwischen dem generellen Modellverständnis in Physik (in Form einer Replikatorvorstellung) und klassisch geprägten *mentalen Modellen* zur Atomhülle?

Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage wird folgend die Konzeption eines Testinstruments vorgestellt, das es erlaubt, eine Verbindung von allgemeinem physikalischen Modellverständnis und den *mental*en Modellen in der Quantenphysik zu untersuchen. Es wird ein Zusammenhang angenommen, wenn sich zeigt, dass diese beide Bereiche zu Teilen mindestens mittelstark korrelieren (Bewertung nach HEMPHILL, 2003).

3.1 Konzeption des Testinstruments

Allgemeine Kriterien

Das gewählte Verfahren für eine Klärung der Forschungsfrage 1 ist die Erhebung mittels geschlossener Items im Zuge eines Onlinefragebogens. Damit die Korrelationen weniger anfällig gegen Störungen sind und somit die Aussagekraft der Ergebnisse gestärkt wird, ist eine hohe Quantität an Antworten das desiderable Ziel. Die angestrebte Stichprobenanzahl ist daher $N > 1000$, was im Vergleich zu ähnlicher quantitativer Forschungen eine große Zahl ist: Vergleichbare Studiendesigns wurden bereits von z.B. IRESON (2000) mit insgesamt 342 Studierenden oder von TREAGUST et al. (2002) mit insgesamt 228 Studierenden durchgeführt.

Um die hohe Anzahl zu erreichen, wird die Datenerhebung im Rahmen einer Onlineumfrage durchgeführt, welche als Zugangsvoraussetzung zur Lehrseite „Quantenspiegelungen“² geschaltet ist. Das bedeutet, dass in einem gewissen Zeitraum jeder, der die Website und das damit verbundene Lehrmaterial besuchen will, die Umfrage bewältigen muss. Dies heißt zum einen, dass die Umfrage potenziell viele Teilnehmer erreichen kann. Zum anderen bedeutet es allerdings auch, dass sie nicht zu umfangreich sein darf, so dass die Teilnehmer nicht abbrechen, bevor sie alle Fragen beantwortet haben. Dies hat zweierlei Konsequenzen für das Testdesign: Zum einen bieten sich geschlossene Items eher an als offene, da dies die Beantwortungszeit reduziert. Zum anderen können im Vorfeld nicht zu viele Informationen über die Teilnehmenden erhoben werden, um ebenfalls die Wahrscheinlichkeit des Abbrechens der Umfrage zu minimieren. Darum wurden nur Informationen über die Berufsgruppen der Teilnehmenden erhoben, deren Auswahl im Folgenden begründet wird.

Berufsgruppenklassifizierung

Die Erhebung der Berufsgruppen der Teilnehmenden gibt grobe Hinweise auf den Bildungsstand der Probanden im Bereich der Quantenphysik und bietet daher bei der Einordnung erhobener Daten einen Interpretationsrahmen. Im Zuge dessen wurden sieben Gruppen erstellt, denen sich die Teilnehmenden zu Beginn der Umfrage zuordnen konnten: Die erste Gruppe, die vermutlich das geringste Maß an Bildung und Erfahrung mit Physik und Chemie hat, ist die Gruppe *Schülerinnen und Schüler*. Die Personen in dieser Gruppe haben zum Großteil einzig den Schulunterricht im Zusammenhang mit der Quantenphysik erfahren – wenn überhaupt. Ähnlich ist es mit der Gruppe *Sonstige*, deren Mitglieder nach der Schule vermutlich zum Großteil nicht mit der Quantenphysik konfrontiert wurden. Die

² www.quantenspiegelungen.de

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

Studierenden sind in *Student/innen in Physik oder Chemie* und *Student/innen anderer Fächer* aufgeteilt. Damit ist der nächsthöhere Bildungsgrad allgemein sowie speziell in Physik oder Chemie abgedeckt. Schließlich gibt es noch die Gruppe *Lehrer/innen in Physik oder Chemie* und *Hochschullehrer/in*, um Personen am Ende ihres Bildungsweges in Physik und Chemie zu erfassen, die sich intensiv mit der Thematik auseinandergesetzt haben. Zusätzlich wurde noch die Kategorie *Technischer Beruf* erstellt, die Personen erfasst, die eventuell ein Studium in Physik oder Chemie absolviert haben und/oder sich im Zuge ihres Berufes mit physikalischen Modellen beschäftigt haben.

Wahl der Items und Schritte zur Validierung

Die Items sind zu großen Teilen nach MÜLLER (2003) und TREAGUST et al. (2002) adaptiert, wobei vorher die Items zum allgemeinen physikalischen Modellverständnis aus dem Englischen übersetzt wurden (vgl. TREAGUST et al. 2002). Die Items zur Erhebung *mentaler Modelle* in der Quantenphysik basieren in großen Teilen auf dem Abschnitt 7.1 von MÜLLER (2003, S. 149ff). Es wurden die Items gewählt, die entweder Aussagen zu einem Planetenmodell oder Aussagen zum Orbitalmodell enthalten, wobei bei ersterem das Hauptaugenmerk auf der Bahnvorstellung lag. Eine Übersicht der endgültigen Items ist in **Tab. 2.** zu finden. Die Items zum Modellverständnis der Physik im Allgemeinen sind dem *Students' Understanding of Models in Science* (SUMS) Instrument der Studie von TREAGUST et al. (2002) entnommen, wobei sich auf die Unterkategorie „Modelle als Replikate der Realität“ (*Models as exact replicas*) begrenzt wird. Die originalen Items sowie die Version der Items, wie sie nach dem Validierungsprozess erschienen sind, sind ebenfalls in **Tab. 2.** abzulesen.

Die beiden Fragen zum Magnetismus wurden mit in den Fragebogen integriert, um auch Tendenzen zu *mental*en Modellen anderer physikalischer Fachgebiete zu erheben.

Um eine möglichst hohe Verständlichkeit der Items zu gewährleisten, wurde ein Validierungsprozess mit drei Zyklen durchgeführt (siehe **Abb. 2.**). Die explorative Faktoranalyse, welche in Kapitel 3.2.2 zur genaueren Untersuchung der Daten angewandt wird, benötigt streng genommen keine stark validierten Aussagen, da sie nur darauf ausgelegt ist, Aussagen mathematisch zu clustern. Trotzdem erhöht eine hohe Verständlichkeit die Wahrscheinlichkeit, dass mehr Items beantwortet werden und die Interpretation der Cluster später einfacher ist. Der Validierungsprozess fokussierte sich also rein auf die Verständlichkeit der Items. Auch anzuführen ist der Anteil der Antworten für „Weiß nicht“, welcher im Rahmen der für die Faktoranalyse verwerteten Items nur bei F10 und F7 über 10% liegt (10% und 14%).

Tab. 2. Finale Items des Instrumentes und die Items, welche zu ihrer Konstruktion hinzugezogen wurden. Dabei wurden die Originalitems während der Validierungsschritte angepasst.

	Name des Items	Inhalt des Items	Inhalt des Originalitems
Atomhülle	F1	“Ein Atom hat eine ähnliche Struktur wie das Sonnensystem.”	“Ein Atom hat eine ähnliche Struktur wie das Sonnensystem (Planeten, die die Sonne umkreisen).” (MÜLLER, 2003)
	F2	“Elektronen in der Atomhülle sind Ladungswolken, die den Kern umgeben.”	“Elektronen im Atom sind verschmierte Ladungswolken, die den Kern umgeben.” (MÜLLER, 2003)
	F3	“Elektronen in der Atomhülle bewegen sich auf bestimmten Bahnen mit hoher Geschwindigkeit um den Kern.”	“Die Elektronen bewegen sich auf bestimmten Bahnen mit hoher Geschwindigkeit um den Kern.” (MÜLLER, 2003)
	F4	“Ein Elektron in der Atomhülle hat eine Wellenlänge, die vergleichbar ist mit der Größe des Atoms.”	-
	F5	“Elektronen in der Atomhülle bewegen sich mit hoher Geschwindigkeit auf wirren, zufälligen Bahnen.”	“Die Elektronen bewegen sich auf bestimmten Bahnen mit hoher Geschwindigkeit um den Kern.” (MÜLLER, 2003)
	F6	“Ein Elektron in der Atomhülle befindet sich zu jedem Zeitpunkt an genau einem Punkt.”	“Man kann den Elektronen im Atom im Allgemeinen keine Bahn zuordnen.” (MÜLLER, 2003)
	F7	“Mögliche Aufenthaltsorte eines Elektrons in der Atomhülle werden durch sein Orbital beschrieben.”	-
	F8	“Die Bewegung eines Elektrons in der Atomhülle lässt sich niemals genau bestimmen.”	“Man kann den Elektronen im Atom im Allgemeinen keine Bahn zuordnen.” (MÜLLER, 2003)
Magnetismus	F9	“Fast alle Stoffe reagieren auf einen Magneten.”	-
	F10	“Ein magnetischer Stoff besteht neben Atomen und Molekülen zusätzlich aus winzigen Magneten (Elementarmagneten).”	-
Physikalische Modelle	F11	“Physikalische Modelle zeigen etwas Reales in anschaulicher Größe.”	“A model needs to be close to the real thing by being very exact in every way except for size.” (ER/13, Treagust et al., 2002)
	F12	“Ein physikalisches Modell sollte eine exakte Nachahmung sein.”	“A model should be an exact replica.” (ER/9, Treagust et al., 2002)
	F13	“Bei jedem Teil eines physikalischen Modells sollte ersichtlich sein, was er darstellt.”	“Everything about a model should be able to tell what it represents.” (ER/12, Treagust et al., 2002)
	F14	“Ein physikalisches Modell muss dem Realen mit Ausnahme der Größe möglichst nahe sein.”	“A model needs to be close to the real thing by being very exact in every way except for size.” (ER/13, Treagust et al., 2002)
	F15	“Ein physikalisches Modell beschreibt, was das Reale macht.”	“A model shows what the real thing does and what it looks like.” (ER/15, Treagust et al., 2002)

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

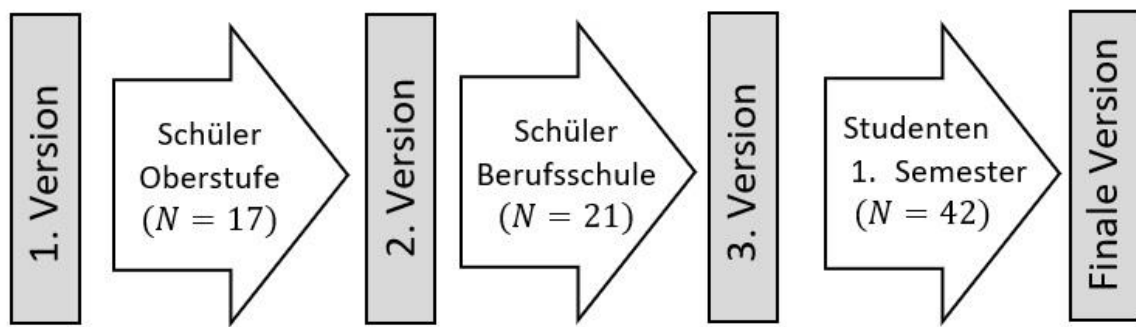


Abb. 2. Die Schritte des Validierungsprozesses mit Angabe der Personengruppen, die den jeweiligen Prozessschritt durchgeführt haben. Nach jedem Schritt wurden die Items mittels der Hinweise sprachlich angepasst, bis nach dem letzten Schritt keine Verbesserungsvorschläge im Rahmen des Validierungsmaßstabs mehr gegeben wurden.

In einem ersten Schritt wurden 17 Schülerinnen und Schüler einer Oberstufenklasse zu den Aufgabenstellungen befragt, in einem zweiten Schritt 21 Schülerinnen und Schüler einer Berufsschulklasse und in einem letzten Schritt 42 Studentinnen und Studenten in den ersten beiden Studiensemestern verschiedener Fächer. Die Gründe für die Wahl dieser Reihenfolge waren rein pragmatischer Natur. Die Teilnehmenden hatten in jedem Zyklus die Aufgabe, schwierig verständliche oder unbekannte Formulierungen anzustreichen und mit Verbesserungsvorschlägen zu kommentieren. Dann wurden Items geändert, wenn zwei oder mehr Personen angeben, dass das Item unverständlich sei und ähnliche Gründe für das Unverständnis nannten. Nach den Änderungen wurden die Fragebögen dann an die nächste Gruppe verteilt, wobei diese wiederum Unverständliches oder Unbekanntes markierte und kommentierte. Nach diesen Schritten der Fragebogenerstellung wurde das Instrument online geschaltet und als Zugang zur Website *quantenspiegelungen.de* genutzt. Eine detaillierte Darlegung der Änderungen kann in Anhang B nachgelesen werden.

Skala

Die Antwortskala, welche für die Items gewählt wurde, ist eine vierstufige Likert-Skala mit den Optionen „1-stimme überhaupt nicht zu“, „2-stimme nicht zu“, „3-stimme zu“, „4-stimme vollkommen zu“. Die Wahl der Skala orientiert sich vom Wortlaut her zum einen an der Skala, die TREAGUST et al. (2002) für ihre Faktoranalyse nutzten. Die Zahlen sind zum anderen als Repräsentanten der Auswahlmöglichkeiten gewählt, um eine nahezu metrische Skala annehmen zu können. Auch wurde eine zusätzliche Option hinzugefügt, die mit „Weiß nicht“ betitelt ist - diese befindet sich allerdings immer außen am Rand, um sich von den Einschätzungen selbst abzugrenzen. Die Teilnehmer wurden vor der Umfrage darauf hingewiesen, diese Option zu nutzen, wenn sie die jeweilige Frage nicht verstehen oder sich der Antwort nicht sicher sind. Zumindest teilweise zeichnete sich die Nutzung dieser Option auch schon während des Validierungsprozesses ab: Schüler und Studenten gaben bei Fragen, die sie unverständlich fanden, „Weiß nicht“ bei der anschließenden Beantwortung an.

3.2 Auswertung der Durchführung

Die Teilnehmerzahl an der Umfrage lag im Zeitraum vom 27. Juli 2017 bis zum 30. März 2018 bei $N=3869$, wobei $N=3108$ von diesen die Umfrage komplett durchführten (ca. 80%). Dabei ist die Verteilung der Teilnehmer auf die Berufsgruppen in **Tab. 3.** dargestellt.

Da alle Teilnehmenden die Umfrage beantworteten, um einen Zugang zu Lernmaterial und Visualisierungen der Quantenphysik zu erhalten, kann angenommen werden, dass Interesse an Quantenphysik vorhanden war. Andere Aussagen über eventuell relevante Aspekte - wie Vorwissen oder Motivation - konnten im Zuge der notwendig geringen Anzahl der Umfrageitems nicht erhoben werden. So sind die einzigen Informationen über die Teilnehmenden ihre Berufsgruppe und ihr grundlegendes Interesse an Quantenphysik.

Die größte Gruppe an Personen, die an der Umfrage teilnahmen, ist die Gruppe sonstiger Berufe, welche mit 999 Teilnehmern im Datenmaterial vertreten ist. Dabei handelt es sich unter anderem nach eigenen Angaben um Rentner, Buchhändler, Lektoren, und viele andere. Die zweitgrößte Gruppe an Teilnehmenden hat einen technischen Beruf (974 Personen). Auch Lehrer/innen der Fächer Physik und Chemie sind mit 394 Personen in großer Zahl vertreten. Student/innen der Physik oder Chemie bzw. sonstiger Fächer und Schüler/innen nahmen mit ungefähr gleicher Anzahl an der Studie teil (je ca. 200). Die Hochschullehrer/innen sind dagegen nur mit 41 Personen vertreten.

Tab. 3. Verteilung der Teilnehmenden an der Onlineumfrage. Die Wahl der Kategorien wurde hauptsächlich an den Professionsgruppen in Physik und Chemie orientiert, wobei auch technische Berufe unabhängig davon als eigene Kategorie gewählt wurden, da hier praktische Physik vermehrte Anwendung findet.

Beruf	Anzahl der Teilnehmer
Hochschullehrer/in	41 (1,32%)
Lehrer/innen in Physik oder Chemie	394 (12,68%)
Student/innen in Physik oder Chemie	220 (7,08%)
Student/innen anderer Fächer	252 (8,11%)
Schülerinnen und Schüler	228 (7,34%)
Technischer Beruf	974 (31,34%)
Sonstige	999 (32,14%)
Gesamt	3108

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

3.2.1 Erster Schritt der Datenanalyse

Zunächst wird das Instrument und das damit erhobene Datenmaterial dazu genutzt werden, um Forschungsfrage 1 zu beantworten: Um zu untersuchen, in wieweit die einzelnen Items miteinander korrelieren, wird daher für die Items F1-F15 Pearsons Korrelationskoeffizient bestimmt. Zur Durchführung der Korrelationsrichtung wird die Software *Statistical Package for Social Scientists 25* (SPSS 25, 2017) verwendet. Dabei werden für die Beantwortung von Forschungsfrage 1 in Anlehnung an MÜLLER (2003) und TREAGUST et al. (2002) die Korrelationen der Items F1, F3, F6 als Repräsentanten für ein klassisches Verständnis mit denen der Items F11, F12 und F14 als Repräsentanten für eine Replikatvorstellung betrachtet.

Bei der Bewertung der Korrelationsstärke wird sich an der Meta-Studie von HEMPHILL (2003) orientiert. Nach dieser sind Korrelationen von $r < .20$ als schwache Korrelationen, $.20 \leq r < .35$ als mittlere Korrelationen und $r > .35$ als starke Korrelationen zu bewerten. Zusätzlich werden in dieser Arbeit alle Korrelationen von $r < .10$ als vernachlässigbar klein angesehen. Dabei weisen die Items F1, F3 und F6 genau wie die Items F11, F12 und F14 je untereinander eine mittelstarke bis starke Korrelation auf (vgl. **Tab. 4.**), was konsistent damit ist, dass sie je eine klassische Atomvorstellung bzw. eine Replikatvorstellung testen. Um die Forschungsfrage FF1 positiv beantworten zu können, müssen zwischen den Itemgruppen F1, F3, F6 und F11, F12, F14 nicht vernachlässigbar kleine Korrelationen auftreten. Bei der Betrachtung der Korrelationen in **Tab. 4.** (schwarz umrahmte Kästchen) zeigt sich, dass dies in der Tat der Fall ist und damit die Forschungsfrage im Rahmen der Erhebung als positiv bewertet werden kann:

Ergebnis 1:

Es existiert eine signifikante, schwach bis mittelstarke Korrelation zwischen dem generellen Modellverständnis in Physik in Form einer Replikatvorstellung und klassisch geprägten *mentalen Modellen* zur Atomhülle.

Doch bei Betrachtung der Korrelationstabelle (**Tab. 4.**) ist auch zu sehen, dass nicht nur schwache und mittlere Korrelationen zwischen den Items F1, F3, F6, F11, F12 und F14 festzustellen sind. Auch andere Items korrelieren mehrfach untereinander. Zusätzlich ist anzumerken, dass F10 zwar schwach mit anderen Items korreliert, aber bis auf eine all diese schwachen Korrelationen mit den gerade genannten Items auftreten. Eine ausführlichere Untersuchung der Datensätze auf Tiefenstrukturen wird daher der nächste Schritt bei der Analyse der Daten sein, um festzustellen, ob es tiefere Zusammenhänge zwischen den allgemeinen Items zum Modellverständnis und den Items zu *mentalen Modellen* in der Quantenphysik gibt:

Forschungsfrage 2 (FF2):

Gibt es tiefere Zusammenhänge zwischen dem allgemeinen physikalischen Modellverständnis und den Vorstellungen zur Atomhülle (und dem Magnetismus)?

Tab. 4. Korrelationen der einzelnen Items miteinander (N=3108). Alle Korrelationen nach Pearson mit $r < .10$ wurden unterdrückt, die Korrelationen mit $.10 \leq r < .20$ sind gelb markiert, die mit $.20 \leq r < .35$ orange und die mit $r > .35$ grau. Die für FF1 wichtigen Korrelationen und die zugehörigen Items wurden schwarz eingerahmt.

		Modellvorstellungen Atomhülle								Modellverständnis Physik						
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
Modellvorstellungen Atomhülle	F1	1.00	0.13	0.48			0.21		-0.13		0.12	0.20	0.16		0.14	
	F2	0.13	1.00		0.14			0.20	0.12							0.10
	F3	0.48		1.00		-0.11	0.24		-0.16	-0.14	0.16	0.23	0.21		0.18	
	F4		0.14		1.00			0.17	0.10	0.17						
	F5			-0.11		1.00	0.18				0.10					
	F6	0.21		0.24		0.18	1.00	-0.11	-0.24		0.12	0.14	0.14		0.12	
	F7		0.20		0.17		-0.11	1.00	0.26					0.20		0.15
	F8	0.13	0.12	-0.16	0.10		-0.24	0.26	1.00				-0.11	0.12		
		F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15								
				-0.14	0.17				1.00							
		0.12		0.16		0.10	0.12			1.00	0.17	0.16		0.15		
Modellverständnis Physik	F11	0.20		0.23			0.14			0.17	1.00	0.27	0.16	0.27	0.17	
	F12	0.16		0.21			0.14		-0.11	0.16	0.27	1.00	0.11	0.37		
	F13							0.20	0.12		0.16	0.11	1.00	0.25	0.19	
	F14	0.14		0.18			0.12				0.15	0.27	0.37	0.25	1.00	0.13
	F15		0.10					0.15				0.17		0.19	0.13	1.00

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wird untersucht, ob die Items dieser beiden Gebiete auf unterschiedliche Faktoren oder ob sie auf denselben Faktor laden. Zur Durchführung einer Faktoranalyse und der damit verbundenen Dimensionsreduktion sowie der Anwendung anderer Kriterien zur Datenauswertung wurde ebenfalls die Software *Statistical Package for Social Scientists 25* (SPSS 25, 2017) verwendet.

Um die Erfüllung der Voraussetzungen der Analyse nach Hauptkomponenten und der damit verbundenen Dimensionsreduktion zu bestimmen, müssen mehrere Betrachtungen vollzogen werden, um die Güte des Datensatzes für die Eignung einer Faktoranalyse zu bestimmen (BÜHNER, 2011). Diese sind im Folgenden näher dargelegt. Während der Analyse werden alle Werte nach dem Verfahren des paarweisen Ausschlusses verrechnet, was

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

bedeutet, dass bei einer Antwort von „Weiß nicht“ nicht der gesamte Datensatz dieser Person, sondern nur die betroffene Frage aus der Analyse ausgeschlossen wird.

Zuerst wird als Eignungskriterium die inverse Korrelationsmatrix betrachtet: In dem Falle des hier angeführten Datensatzes beträgt die Anzahl der Werte über .1 auf der Nebendiagonalen ca. 21%. Liegen generell die Werte auf der Nebendiagonalen zu weniger als 25% unter .1 (vgl. DZIUBAN & SHIRKEY, 1974), ist der Datensatz in Hinblick auf die inverse Korrelationsmatrix als geeignet anzusehen. Wird mit demselben Kriterium die Anti-Image-Korrelation betrachtet, so findet man dieses ebenfalls erfüllt: Hier liegen nur ca. 10% über einem Wert von .1 (vgl. ebd.).

Andere notwendige Maßnahmen, um die Eignung des Datensatzes zu überprüfen, stellen das Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium (KMO-Kriterium) und der Bartlett-Test auf Sphärizität dar. Diese beiden Tests liefern jeweils die Werte .69 (KMO) und .00 (Bartlett). Das KMO-Maß zeigt also eine Eignung der Ergebnisse, da es größer als ein Minimum von .5 (CLEFF, 2015; HARTAS, 2010; FIELD, 2013), bzw. von .6 (MÖHRING & SCHLÜTZ, 2013; TABACHNICK & FIDELL, 2004) ist. Auch beträgt die Prüfgröße χ^2 des Bartlett-Tests 3102.78. Diese ist mit 0.000 hoch signifikant (<.050) und verwirft damit die Nullhypothese, dass alle Korrelationen der Korrelationsmatrix gleich 0 sind. Die Eignung ist unter Einbezug all dieser Faktoren also gegeben und die explorative Faktoranalyse darf folglich durchgeführt werden.

Eine explorative Faktoranalyse berechnet Cluster aus zusammenhängenden Items und versucht diese mathematisch zusammenzufassen. Daher ist es notwendig, schwach korrelierende Items aus der Analyse auszuschließen. Solche können an Pearsons Korrelationskoeffizienten r abgelesen werden. Dazu wird die Korrelationsmatrix (**Tab. 4.**) untersucht. Bei der Bewertung der Korrelationsstärke wird sich wie zuvor an der Meta-Studie von HEMPHILL (2003) und deren Empfehlungen orientiert. Dabei kann festgestellt werden, dass F4, F5 und F9 nur vier oder weniger Korrelationen über .1 besitzen und auch diese Korrelationen nur schwach sind. Eine inhaltliche Betrachtung dieser Items ergibt, dass sie hauptsächlich deklaratives Fachwissen abfragen (Wellenlänge vom Elektron und magnetische Stoffe, F4 und F9) bzw. vermutlich zu spezielle *mentale Modelle* ansprechen (wirre Bahn im Orbital, F5). Daher werden die Items F4, F5 und F9 bei der weiteren Analyse des Datensatzes mittels Hauptachsenfaktorzerlegung nicht mit einbezogen. Die Items F10 und F15 hingegen werden in der weiteren Untersuchung berücksichtigt, da sie mit mehr als sechs anderen Items schwach korrelieren (F10) bzw. mit fünf anderen schwach korrelieren und davon mit einem nahezu mittelstark (F13 mit F15). Auch zu betrachten ist die sehr starke Korrelation zwischen den Items F1 und F3 bzw. F12 und F14. Diese Korrelationen würden eine explorative Faktoranalyse stark beeinflussen, so dass diese Itempaare jeweils als eigene Faktoren modelliert würden (siehe z.B. BÜHNER, 2011, S.340). Dies liegt daran, dass die Aussagen dieser Items nahezu identisch sind: F1 und F3 adressieren beide die bestimmten Planetenbahnen und F12 und F14 testeten beide explizit, inwieweit Modelle als tatsächliche Abbilder der Realität gesehen werden. Es wird im Zuge dessen das Item F1 für die Modellierung der unterliegenden Struktur ausgeschlossen, da dieses auch als auf die Struktur „Kern-Hülle“ abzielend verstanden werden kann. Auch das Item F12 wird ausgeschlossen, da F14 eine weniger spezielle Version von F12 darstellt. In der Auswertung mittels eventuell

extrahierter Faktoren muss dies allerdings im Hinterkopf behalten werden, und daher werden unter anderem auch F1 und F12 am Ende mit den extrahierten Faktoren korreliert, um zu gewährleisten, dass sie sich auch in diesem Sinne ähnlich wie F3 und F14 verhalten. Dieses ähnliche Verhalten wird später bestätigt (siehe Kapitel 3.2.4).

3.2.2 Explorative Faktoranalyse

Bei der explorativen Modellierung einer Tiefenstruktur ist die Anzahl der zu extrahierenden Faktoren zunächst unbestimmt und erst durch die explorative Faktoranalyse kann die Anzahl an Dimensionen abgeschätzt werden, die den Datensatz mathematisch am besten zusammenfasst. Nach Varimax-Rotation, nach Equimax-Rotation und Oblimin-Rotation ist die Anzahl an sinnvollen Faktoren gleich und die Ladungen sind vernachlässigbar unterschiedlich, daher wird im weiteren Verlauf nur mit der Varimax-Rotation weiter verfahren und hierzu Methodik und Vorgehen exemplarisch erläutert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Faktoranalyse mittels gängiger Kriterien (BÜHNER, 2011) untersucht, um die sinnvollste Anzahl an Faktoren zu ermitteln:

- Gesamtvarianz: Nach URDAN (2010) sollten Faktoren je eine Gesamtvarianz von mehr als 10% erklären. Wird dieses Kriterium angewendet, so findet man, dass nur zwei extrahierte Faktoren mehr als 10% zur Gesamtvarianz beitragen. Dies weist also auf **zwei Hauptfaktoren** hin.
- Eigenwerte: Die Anzahl der Eigenwerte, welche größer als 1.00 sind, gibt ebenfalls einen Hinweis auf die sinnvollste Anzahl unterliegender Faktoren. Im hier analysierten Datensatz gibt es zwei Eigenwerte, die größer als 1.00 – und nahezu gleich groß – sind. Dies weist darauf hin, dass **zwei Hauptfaktoren** für die Beschreibung der Datenstruktur am besten geeignet sind (vgl. BÜHNER, 2011; BORTZ, 1999). Auch ist dies ein Kriterium, welches eher die Anzahl der Faktoren überschätzt als unterschätzt (ZWICK & VELICER, 1986; GORSUCH, 1983).
- Screeplotknick: Ein drittes Kriterium, das zur Abschätzung der Zahl sinnvoller Faktoren hinzugezogen werden muss, ist die Frage, nach wie vielen Komponenten der Screeplot bricht (vgl. BORTZ, 1999; TABACHNICK & FIDELL, 2004, S.673). In diesem Fall bricht er nach zwei Komponenten ab, es scheinen also **zwei Hauptfaktoren** die beste Beschreibung zu sein (siehe **Abb. 3.**).
- Inhaltlich: Die sinnvolle Anzahl an Komponenten ist nicht nur anhand mathematischer Maßstäbe zu bewerten, auch inhaltlich muss sie plausibel sein. Da die Analyse an dieser Stelle allerdings rein explorativ ist, kann noch nicht sinnvoll über inhaltliche Plausibilität gesprochen werden. Während der Diskussion wird aber dargelegt werden, dass zwei Hauptfaktoren inhaltlich auch plausibel angenommen werden können.

Anhand dieser Kriterien, die alle auf eine adäquate Modellierung mittels zwei Konstrukten hinweisen, wurde entschieden, eine Faktoranalyse durchzuführen, die zwei Faktoren voraussetzt.

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

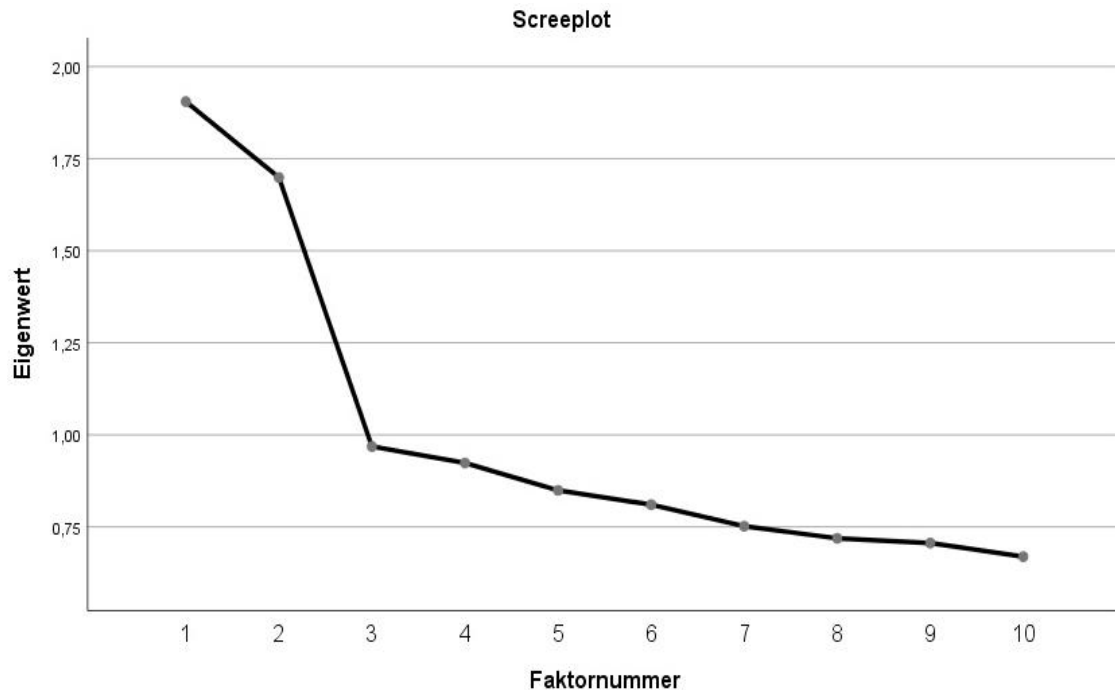


Abb. 3. Eine Analyse des Screepplots gibt starke Hinweise auf zwei unterliegende Faktoren in der Datenstruktur. Zum einen ist zu sehen, dass nur zwei Eigenwerte einen Wert von mehr als 1.00 besitzen, zum anderen bricht der Screepplot bei einem dritten Faktor stark. Auch dargestellt ist die nahezu gleichgroße Aufklärungsmächtigkeit der beiden ersten Faktoren: beide haben ähnlich hohe Eigenwerte.

3.2.3 Faktoranalyse mittels zweier Faktoren

Gegeben, dass die sinnvollste Modellierung mittels zweier Hauptfaktoren geschieht, wird diese Anzahl während der Modellberechnung verwendet. Mittels dieser Modellierung können die beiden Faktoren 36% der Gesamtvarianz erklären. Es werden zwei Cluster aus den Daten extrahiert. Diese setzen sich aus den Items F3, F11, F6, F14 und F10 sowie F7, F13, F15 und F2 zusammen. Diese beiden sind in Anhang A mit ihren Ladungen abzulesen.

Mittels dieser Ladungen werden Skalen erstellt, die dazu genutzt werden können, die Ausprägung der beiden Merkmale, welche durch Faktor I und Faktor II beschrieben werden, zu quantifizieren. Dazu werden für jeden Teilnehmenden die Ladungen α_i (Faktor I) bzw. β_j (Faktor II) der einzelnen Items mit der angegebenen Punktzahl X_i bzw. Y_j multipliziert, die die jeweilige Person dem Item zugesprochen hat (*1-stimme überhaupt nicht zu* bis *4-stimme vollkommen zu*). Dieser Wert muss jeweils noch genullt werden – dazu wird genutzt, dass der theoretische Mittelwert einer Antwort bei 2.5 Punkten liegt. Der endgültige Werte für die Skalen s_1 und s_2 berechnet sich also durch die Formel

$$s_1 = \sum_i \alpha_i X_i - 2.5 \sum_i \alpha_i \quad \text{bzw.} \quad s_2' = \sum_j \beta_j Y_j - 2.5 \sum_j \beta_j.$$

Mittels dieser Skalen können Aussagen über eine quantifizierte Ausprägung der Faktoren I und II getroffen werden. Auch wurde an dieser Stelle eine Normierung der Skalen

durchgeführt, sodass beide die Standardabweichung 1 haben. Es gibt allerdings auch eine Problematik, die im Zusammenhang mit dieser Rechnung auftaucht: Die Option „Weiß nicht“ ist in dieser Erhebung nicht quantifizierbar, ohne schwierig begründbare zusätzliche Annahmen zu treffen. Es ließen sich theoretisch gewiss Argumente finden, nach denen der Antwortmöglichkeit „Weiß nicht“ der Wert 2.5 zugesprochen werden könnte, da sie weder eine zustimmende noch eine ablehnende Einstellung zu der jeweiligen Aussage zeigt. Dieses Vorgehen wurde allerdings bewusst verworfen und deshalb wurde die Option „Weiß nicht“ auch nicht in der Mitte zwischen den anderen Optionen aufgeführt und nicht mit einer Zahl versehen. Im Zuge dessen wird für die Analysen, die mittels der quantitativen Skalenwerte durchgeführt werden, nur diejenigen Datensätze verwendet, bei denen in keinem Fall die Option „Weiß nicht“ in den Items F3, F11, F6, F14 und F10 sowie F7, F13, F15 und F2 angegeben wurde. Dieser Schritt reduziert die Daten in diesem letzten Betrachtungsschritt auf ($N=1741$) für die Angabe der Verteilungen. Dies ist aber immer noch eine ausreichend große Stichprobe, um ein Gesamtbild der quantitativen Ausprägungsstärken von Faktor I und Faktor II zu bekommen.

3.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Zunächst werden die errechneten Faktoren mit allen Items korreliert (F1-F15), um eine Benennung der Struktur durchzuführen, die sie beschreiben. Eine Gesamtübersicht der Items sortiert nach Korrelation mit den Faktoren I und II, welche als Modell errechnet wurden, ist in **Tab. 5.** und **Tab. 6.** dargestellt. Dabei ist abzulesen, dass das Modellverständnis physikalischer Modelle im Allgemeinen und die *mentalen Modelle* der Quantenphysik (und zu gewissen Teilen des Magnetismus) keine unabhängigen Konstrukte sind, da Items beider Gruppen in den beiden Clustern zu finden sind. Eine genauere Analyse der Items, welche durch diese beiden Faktoren beschrieben werden, ist nötig, um eine inhaltliche Beschreibung dieser mathematischen Konstrukte zu erhalten. Es ist anzumerken, dass diese Cluster in vorigen Studien bspw. von TREAGUST et al. (2002) und IRESON (2000) nicht gefunden wurden. Hierzu lässt sich ein plausibler Grund aufführen: Die gemeinsame Analyse von allgemeinem Verständnis physikalischer Modelle und dem speziellen Verständnis von *mentalen Modellen* in der Quantenphysik in jenen Untersuchungen ist nicht geschehen, da sie sich je auf einen der Aspekte beschränkten (so z.B. auch MÜLLER, 2003).

Im Folgenden wird die Benennung der beiden Faktoren als *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* dargelegt und diskutiert. Diese Faktoren sind nicht nur mittels der mathematischen Berechnungen die zutreffendste Beschreibung, sondern mit ihnen lassen sich auch inhaltlich zwei Aspekte *mentaler Modelle* (*Gestalt* und *Funktionalität*) jeweils unabhängig voneinander beschreiben. Aus der inhaltlichen Analyse dieser Faktoren folgte auch die erste Idee einer Definition *mentaler Modelle*, die sich mit ähnlichen Beschreibungen aus der Literatur deckt (siehe Kapitel 2.1). Bei den folgenden Betrachtungen werden alle Items mit den errechneten Faktoren korreliert und anhand dieser Korrelationen die inhaltliche Beschreibung und Benennung hergeleitet.

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

Faktor I: Gestalttreue

Der erste modellierte Faktor der Analyse besteht aus den Items F3, F11, F14, F6, F10, F1 und F12, wobei auch F8 aufgrund der hohen negativen Korrelation aufgeführt ist (siehe dazu **Tab. 5.**). Beispiele für Aussagen dieser Kategorie sind:

F3 - "Elektronen in der Atomhülle bewegen sich auf bestimmten Bahnen mit hoher Geschwindigkeit um den Kern."

F6 – „Ein Elektron in der Atomhülle befindet sich zu jedem Zeitpunkt an genau einem Punkt.“

Aus allen Aussagen dieser Items wurde versucht, eine Benennung des Faktors zu finden, die die Gemeinsamkeit der Items zusammenfasst und auch mitberücksichtigt, welche Aussagen das Konstrukt nicht beschreibt. Die Gemeinsamkeit der Items ist im Folgenden benannt als *Gestalttreue (GT)*. Die *Gestalttreue* beschreibt, inwieweit die Gestalt der mentalen Modelle in der Atomphysik und im Magnetismus als realitätsgetreu empfunden wird (F3, F6, F10, F1) bzw. inwieweit physikalische Modelle als gestaltgetreue Abbilder der Realität gesehen werden (F11, F14, 12). Damit ist auch die negative Korrelation mit Item F8 (*Die Bewegung eines Elektrons in der Atomhülle lässt sich niemals genau bestimmen*) erklärbar, da dieses Item eine Aussage trifft, die im Widerspruch dazu steht, dass ein (mentales) Modell in der Physik die genaue *Gestalt* von etwas wiedergibt. Auch die Korrelation von Items F11 und F14 ist erklärbar: Der Wortlaut „etwas Reales“ kann so aufgefasst werden, dass die *Gestalt* von etwas Realem gemeint ist. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass eine Person in der Validierungsphase den Wortlaut „etwas Reales“ als zu grob anmerkte, aufgrund der einzelnen Anmerkung aber keine Veränderungen am Wortlaut mehr vorgenommen wurden.

Sollte eine ähnliche Erhebung erneut durchgeführt werden, ist zu empfehlen, dass diese Formulierung verändert wird. Auch reißt die Doppeldeutigkeit des Items eine zentrale Frage an: Ist „Real“, wie Dinge aussehen oder wie sie sich verhalten? Dies weist auf eine Problematik der Modellinterpretation hin, welche sich auch in vielen Studien zeigt (siehe Kapitel 2.3): Inwieweit wird ein (mentales) Modell als realitätstreu verstanden - in Bezug auf *Funktionalität* oder *Gestalt*?

Tab. 5. Korrelationen der Items mit Faktor I, die größer als .35 sind, zusammen mit den Aussagen der Items, um eine Interpretation und Benennung der unterliegenden Struktur zu ermöglichen. Grau hinterlegt sind Items, die mit beiden Faktoren korrelieren.

Name des Items	Inhalt des Items	Korrelation mit Faktor I
F3	“Elektronen in der Atomhülle bewegen sich auf bestimmten Bahnen mit hoher Geschwindigkeit um den Kern.”	.62
F6	“Ein Elektron in der Atomhülle befindet sich zu jedem Zeitpunkt an genau einem Punkt.”	.54
F10	“Ein magnetischer Stoff besteht neben Atomen und Molekülen zusätzlich aus winzigen Magneten (Elementarmagneten).”	.40
F12	“Ein physikalisches Modell sollte eine exakte Nachahmung sein.”	.39
F1	“Ein Atom hat eine ähnliche Struktur wie das Sonnensystem.”	.39
F11	“Physikalische Modelle zeigen etwas Reales in anschaulicher Größe.”	.60
F14	“Ein physikalisches Modell muss dem Realen mit Ausnahme der Größe möglichst nahe sein.”	.56
F8	“Die Bewegung eines Elektrons in der Atomhülle lässt sich niemals genau bestimmen.”	-.46

Faktor II: Funktionalitätstreue

Der zweite Faktor besteht aus den Items F7, F13, F8, F15, F2, F14 und F11 (siehe **Tab. 6.**), wobei die Items F11 und F14 nicht trennscharf genug sind, um Faktor I und II auseinander zu halten.

Beispiele für Aussagen dieser Kategorie sind:

F7 - “Mögliche Aufenthaltsorte eines Elektrons in der Atomhülle werden durch sein Orbital beschrieben.”

F13 - “Bei jedem Teil eines physikalischen Modells sollte ersichtlich sein, was er darstellt.”

Auch aus den Aussagen dieser Items wurde versucht, eine Benennung des Faktors zu finden, die die Gemeinsamkeit der Items zusammenfasst und auch mitberücksichtigt, welche Aussagen das Konstrukt nicht beschreibt. Die Gemeinsamkeit der Items ist im Folgenden benannt als *Funktionalitätstreue (FT)*. Die *Funktionalitätstreue* beschreibt, inwieweit die *Funktionalität* der *mentalen Modelle* in der Atomphysik und im Magnetismus als realitätstreu empfunden wird bzw. physikalische Modelle als *funktionalitätstreue* Abbilder der Realität gesehen werden. Die Items beschreiben einen abstrakten Zusammenhang, den das (mentale) Modell kodiert. Auch die Korrelationen von Items F11 und F14 mit dem Konstrukt sind erklärbar: Der Wortlaut „etwas Reales“ kann so aufgefasst werden, dass die *Funktionalität* oder das Verhalten von etwas Realem gemeint ist.

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

Der Name „Funktionalitätstreue“ wurde in Anlehnung an die Arbeitsdefinition für *mentale Modelle* gewählt. Die Dimension der Funktionalität drückt aus, inwieweit die Funktionalität des Modells als realitätstreu angesehen wird. Eine hohe Ausprägung dieses Charakterzugs bedeutet also, dass eine individuell interpretierte Funktion – oder ein Satz von Funktionen – als realitätstreu angesehen werden. Welche Funktion oder welche Funktionen mit dem *mental*en Modell verbunden sind, hängt aber von den jeweiligen Lernenden ab.

Tab. 6. Korrelationen der Items mit Faktor II, die größer als .35 sind, zusammen mit den Aussagen der Items, um eine Interpretation und Benennung der unterliegenden Struktur zu ermöglichen. Grau hinterlegt sind Items, die mit beiden Faktoren korrelieren.

Name des Items	Inhalt des Items	Korrelation mit Faktor II
F7	“Mögliche Aufenthaltsorte eines Elektrons in der Atomhülle werden durch sein Orbital beschrieben.”	.66
F13	“Bei jedem Teil eines physikalischen Modells sollte ersichtlich sein, was er darstellt.”	.60
F15	“Ein physikalisches Modell beschreibt, was das Reale macht.”	.45
F2	“Elektronen in der Atomhülle sind Ladungswolken, die den Kern umgeben.”	.42
F8	“Die Bewegung eines Elektrons in der Atomhülle lässt sich niemals genau bestimmen.”	.56
F14	“Ein physikalisches Modell muss dem Realen mit Ausnahme der Größe möglichst nahe sein.”	.38
F11	“Physikalische Modelle zeigen etwas Reales in anschaulicher Größe.”	.36

Faktoren I und II im Zusammenhang

Die beiden Faktoren *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* können mit ihren Korrelationen in Anhang A abgelesen werden, die stärksten Korrelationen sind in **Abb. 4.** dargestellt. Sie modellieren die Interpretation eigener *mentaler Modelle* via deren empfundener Realitätstreue. Der Begriff „Verständnis“ wird dabei in dieser Arbeit synonym mit „verstanden als...“, „interpretiert als...“ bzw. „wahrgenommen/empfunden als...“ aufgefasst. Folgend wird er daher zum Beispiel so verwendet: ein Verständnis eines *mental*en Modells als hochgradig *gestalt*treu bedeutet, dass das *mentale Modell* als *gestalt*treu empfunden bzw. verstanden wird.

Dabei ist zu erkennen, dass über die Items F8, F11 und F14 jeweils beide Faktoren – wenn auch unterschiedlich stark) beschrieben werden können. Es stellt sich daher im Allgemeinen die Frage, inwieweit die Faktoren unabhängig voneinander sind:

Forschungsfrage 3 (FF3):

Sind die Faktoren *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* unabhängig voneinander?

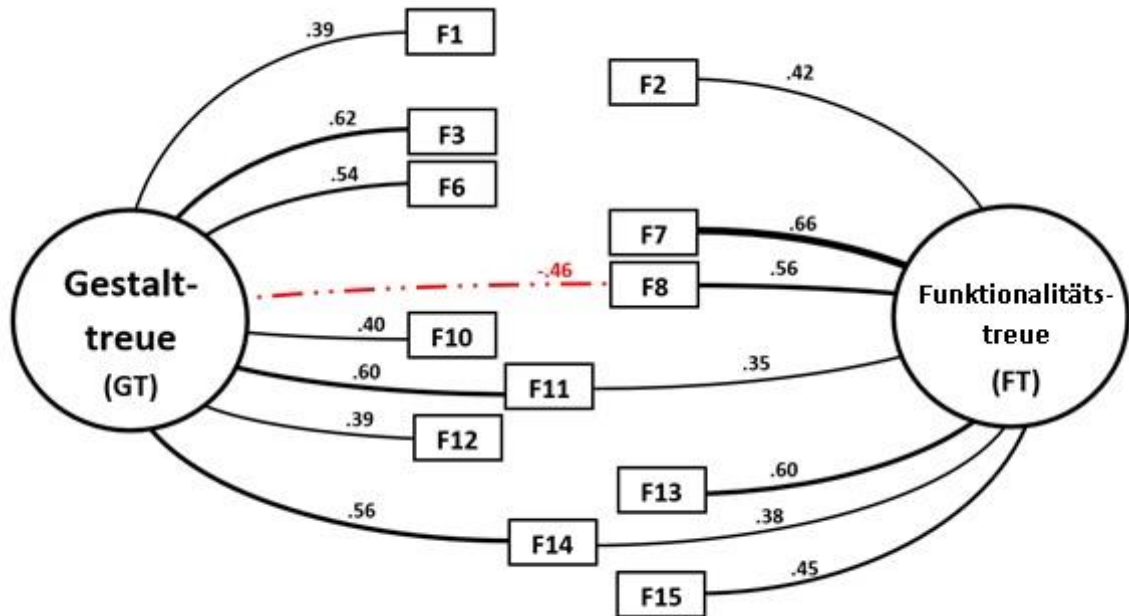


Abb. 4. Die beiden Faktoren *Gestalttreue* (GT) und *Funktionalitätstreue* (FT) mit den Items, die stark mit diesen Faktoren korrelieren (Bewertung der Korrelationsstärke nach HEMPHILL (2003)). Die beiden Faktoren selbst korrelieren mit .06 in vernachlässigbarem Maße.

Zur Beantwortung dieser Frage werden die Skalenwerte der Faktoren untereinander korreliert, wobei sich zeigt, dass beide in keiner nennenswerten Abhängigkeit zueinanderstehen, wenn die beiden Konstrukte mittels bivariater Korrelationsanalyse unter Bezug auf HEMPHILL (2003) untersucht werden ($r = .06$). Damit beschreiben die beiden Konstrukte unabhängige Aspekte *mentaler Modelle*.

Ergebnis 3:

Die beiden Faktoren *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* korrelieren nur vernachlässigbar stark und nicht signifikant miteinander ($r = .06$).

Weil die Eigenwerte beide um 1.8 liegen, erklären sie einen ähnlichen Anteil der Varianz und sind damit nicht nur unabhängig, sondern von der Gewichtung auch ungefähr gleich: Durch das Zusammenspiel von *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* ergeben sich daher theoretisch vier „Verständnistypen“ – oder auch Interpretationstypen - von *mental Modellen* (siehe als Visualisierung **Abb. 5.**). Im Folgenden werden diese Typen näher erläutert. Es ist dabei

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

festzuhalten, dass die Aussagen über die Verständnistypen *mentaler Modelle* in dieser Studie nur in der Quantenphysik und teils im Magnetismus und im Modellverständnis der Physik empirisch als passende Modellierungen herausgearbeitet wurden. Im Zuge von möglichen Verallgemeinerungen sind sie daher zunächst eher hypothetisch und andere, gezieltere empirische Studien müssen in anderen Fachgebieten durchgeführt und betrachtet werden, um zu sehen ob vergleichbare Eigenschaften bei *mentalen Modellen* anderer Disziplinen (z.B. Biologie und Chemie) gefunden werden. Ein ausführlicher Vergleich mit der didaktischen Literatur ist in Kapitel 5 unternommen worden, um zu sehen, ob die Charakteristiken der beiden Faktoren und die daraus erwachsenden typisch zu sehenden Verständnistypen überhaupt auch in anderen Studien und Fachgebieten als mögliche beschreibende Modelle fungieren können.

Des Weiteren ist anzumerken, dass Aspekte beider Faktoren von *mentalen Modellen* nach der in dieser Arbeit erarbeiteten Definition aufgenommen sind, da sie immer aus einer *Gestalt* und einer dadurch kodierten funktionalen Einheit (*Funktionalität*, siehe Kapitel 2.1) bestehen. Welcher dieser beiden Aspekte aber hauptsächlich im Fokus steht, ist bei den verschiedenen Typen unterschiedlich ausgeprägt.

3.3 Die vier Typen der Wahrnehmung mentaler Modelle

Die folgenden vier Typen stellen in der Theorie die Extrema der Ausprägungen der Dimensionen dar und werden in Kapitel 5 an konkreten Beispielen erläutert. Alle Typen wurden auch in den erhobenen Daten gefunden, allerdings gab es weit weniger Probanden, die eine ausgeprägt niedrige *Funktionalitätstreue* aufwiesen als solche mit einer hohen *Funktionalitätstreue*. Zusammenfassend können die Typen in **Abb. 5.** abgelesen werden.

Eine ausführlichere Beschreibung geschieht folgend, wobei diese so allgemein wie möglich gehalten wird. Ein Bezug auf *mentale Modelle* der Quantenphysik erfolgt aber währenddessen bereits, um Parallelen deutlich zu machen und schon einige Beispiele vorzustellen. Zusammengefasst können die Typen auch mit Beispielen in **Tab. 7.** abgelesen werden.

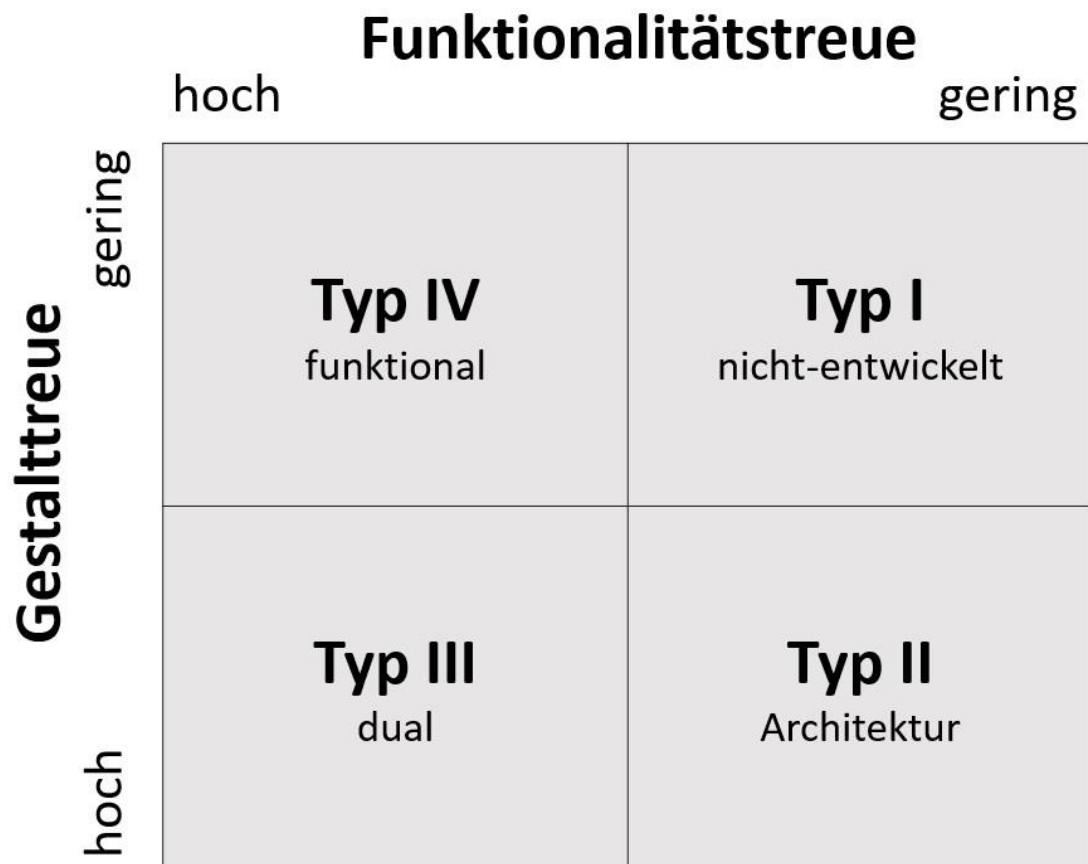


Abb. 5. Die beiden Skalen zur *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* als Faktoren für das Verständnis *mentaler Modelle* gegeneinander aufgetragen. Es entstehen vier Bereiche, die jeweils als Typisierung für einzelne Verständnisse stehen. Dabei gibt es den nicht-entwickelten Typ (niedrige GT und niedrige FT), den Architektur-Typ (hohe GT und niedrige FT), den dualen Typ (hohe GT und hohe FT) sowie den funktionalen Typ (niedrige GT und hohe FT).

a) *Der nicht-entwickelte Typ (Verständnistyp I)*

Der nichtentwickelte Verständnistyp von *mentalen Modellen* beschreibt, dass eine Person ein *mentales Modell* weder als *gestalttreu* noch als *funktionalitätstreu* wahrnimmt. Dieser Typ ist sehr wenig im Datenmaterial zu finden und es lässt sich vermuten, dass er zu Beginn einer Lernphase auftritt, wenn den Lernenden noch nicht klar ist, worum es genau geht. Ein rein deklaratives Wissen ohne tieferes Verständnis ist ein gutes Beispiel für diesen Typ, oder auch die Verwendung mathematischer Beschreibungen von Phänomenen, welche nicht durchdrungen werden.

Es ist anzumerken, dass die gemessenen Konstrukte teils unterbewusst sind und dieser Verständnistyp daher nicht unbedingt bedeutet, dass Modelle bewusst als nicht *gestalt-* oder *funktionalitätstreu* wahrgenommen werden, sondern dass noch keine tiefere Auseinandersetzung mit dem Thema erfolgt ist. Es ist zu vermuten, dass dieser Typ am häufigsten bei sehr jungen Menschen langfristig auftritt, die gerade der Welt einen Sinn geben und noch nicht kognitiv in der Lage sind, fortgeschrittenere *mentale Modelle* zu bilden - oder für sehr kurze Zeiten, wenn Lernende gerade einem

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

komplett neuen Themengebiet begegnen. Eine Aufführung einiger stützender Befunde dieser These aus Studien mit jungen Menschen sowie Neulernern ist in Kapitel 5 und 7 dargestellt. Bei *mental*en Modellen der Quantenphysik könnte sich dieser Verständnistyp darin zeigen, dass *mentale Modelle* weder so interpretiert werden, dass sie „wirkliche“ Bilder der Quantenebene zeigen, noch wie sich Dinge dort verhalten. Eventuell gibt es sogar nur von der Realität losgelöste mathematische Rechenweisen, die beherrscht werden.

b) *Der Architektur-Typ (Verständnistyp II)*

Der Architektur-Typ beschreibt, wenn eine Person ein *mentales Modell* primär als *gestalttreues* Abbild und nicht oder wenig als *funktionalitätstreues* Abbild versteht. Dabei wird das Modell als *gestalttreues* Replikat der Realität wahrgenommen. Somit verstehen diese Personen die betroffenen *mental*en Modelle primär als skalierte, reale *Gestalten*. Dabei ist der abstrakte, funktionale Teil der *mental*en Modelle nicht der im Fokus stehende. Es ist sehr gut möglich, dass der Architektur-Typ mitunter der erste ausgeprägte Verständnistyp von *mental*en Modellen ist, der sich entwickelt, da er aus realweltlichen Phänomenen erwächst (oder diese als Analogien nimmt). Es geht dabei aber beim Lernenden vermutlich eher darum, ein Problem fassbar zu machen, indem die *Gestalt* als naheliegender Anhaltspunkt für die weitere Konzeptbildung fungiert (siehe für weitere Ausführungen zu diesen an dieser Stelle hypothetischen Ideen Kapitel 7). Der Name wurde in Anlehnung an Modelle gewählt, die von Architekten verwendet werden, um z.B. eine Annäherung eines geplanten Bauwerks in Form eines herunterskalierten Replikats zu erschaffen und dies als Veranschaulichung zu nutzen, wobei dabei visuelle Aspekte die primäre Rolle spielen. Dieser Verständnistyp ist im erhobenen Datenmaterial in vergleichsweise geringer Zahl zu finden, was auch für die These spricht, dass er bei interessierten Jugendlichen und Erwachsenen nicht lange stabil während des Lernprozesses vorkommt. Im Zusammenhang mit *mental*en Modellen der Quantenphysik könnte sich dieser Typ darin zeigen, dass man ein Bild von einem Atom im Kopf hat, was nur aus geometrischen Formen besteht (z.B. statisches Kern-Hülle-Bild), aber sich keine Gedanken darum macht, ob dies auch stark eine *Funktionalität* darstellt. So würde man nur vermuten, dass man z.B. durch ein Mikroskop betrachtet ein Atom von solch einer *Gestalt* sehen würde.

c) *Der duale Typ (Verständnistyp III)*

Der duale Verständnistyp bezeichnet, dass ein *mentales Modell* als Repräsentant sowohl für *Gestalt* als auch *Funktionalität* verstanden wird. Hierbei scheinen Hybridmodelle zu entstehen, die sowohl die *Gestalt* als auch die *Funktionalität* eines Sachverhaltes kodieren. Dabei müssen die beiden Faktoren nicht miteinander kohärent sein, was zum Beispiel im Rahmen der Atomphysik zu viel untersuchten mentalen Hybridmodellen führt (siehe Kapitel 2.1 und Kapitel 4.1). Eventuell ist dieser Typ eine Weiterentwicklung des Architekturtyps, bei dem die *Funktionalität* des Sachverhaltes langsam auch als wichtiger Aspekt des Modells verstanden wird oder die statische Natur des Modells durch dynamische Aspekte ergänzt wird (z.B. vom starren Rosinenkuchenmodell zum dynamischen Rutherford'schen Modell im

Schulbuchkontext, siehe für eine detailliertere Diskussion zu dieser an dieser Stelle hypothetischen Idee Kapitel 7 und AEBLI, 1968, S.26f). Dieser Verständnistyp ist im erhobenen Datenmaterial häufig zu finden. Ein anderer Name für diese Interpretation ist auch *Replikatvorstellung*, also dass das *mentale Modell* einen skalierten Teil der Realität beschreibt – sowohl in *Gestalt* und *Funktionalität*. Zum Beispiel könnte die Vorstellung eines „Planetensystematoms“ so verstanden werden, dass unter dem Mikroskop ein solches dynamisches kleines Planetensystem mit springenden Elektronen gesehen werden könnte.

d) *Der funktionale Typ (Verständnistyp IV)*

Den funktionale Verständnistyp zeichnet aus, dass dabei ein *mentales Modell* nur als Repräsentant für *Funktionalität* verstanden wird und der Gestaltaspekt nur als „Träger“ gesehen wird: In diesem Rahmen wird das *mentale Modell* als Kodierung für ein abstraktes Wissen verstanden und die *Gestalten* der *mentalen Modelle* werden eher als Ankerpunkte oder Stützpfeiler und nicht als Realitätsreplikate empfunden. Vermutlich stellt dieser Typ das am weitesten entwickelte Verständnis eines *mentalen Modells* dar und als die akzeptablen Modelle werden oft diejenigen angesehen, welche die *Funktionalität* eines Sachverhaltes am besten darstellen. Dies zeigt sich vor allem daran, dass dieser Typ am häufigsten bei „Experten“ – also (Hochschul)lehrenden - der primäre Typ ist (siehe dazu auch Kapitel 5). So ist im Zuge dessen hier auch die mathematische Beschreibung als *mentales Modell* zu nennen, welches in der Beschreibung z.B. der Quantenphysik das primäre ist (siehe Kapitel 4.1).

Dieser Verständnistyp ist im erhobenen Datenmaterial häufig zu finden, was die These stützt, dass er einer der Typen ist, die eher bei Fachinteressierten im Jugendalter (und älter) auftreten. Ein Beispiel eines solchen *mentalen Modells* ist zum Beispiel das Orbitalmodell als reiner Platzhalter für das Prinzip der Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines in der Atomhülle gebundenen Elektrons zu nennen.

Es ist anzumerken, dass diese Verständnistypen nur eine Aussage über die generelle Art des Verständnisses einzelner *mentaler Modelle* geben können. Verschiedene *mentale Modelle* als das beforschte könnten anders wahrgenommen werden. So ist es z.B. möglich, dass physikalische Modelle generell eher rein funktional gesehen werden, aber trotzdem die Anschaulichkeit z.B. des Planetenmodells im Spezialfall noch überwiegt (siehe auch z.B. BAYER, 1986).

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

Tab. 7. Die vier modellierten Verständnistypen mit ihren Eigenschaften in allgemeiner Form zusammengefasst.

Modelltyp	Eigenschaften	Beispiel
Typ I	Es existiert keine Interpretation des <i>mentalen Modells</i> , das über deklaratives Wissen herausgeht. Das <i>mentale Modell</i> hat damit keine „Bedeutung“, es wird weder als Abbild eines realen Phänomens in Gestalt noch in Funktionalität verstanden.	„Ich kann mit Operatoren Probleme der Quantenphysik berechnen, habe aber keine Ahnung, was das bedeutet.“
Typ II	Innerhalb dieser Stufe des Modellverständnisses wird das <i>mentale Modell</i> primär als einfache gestaltliche Kopie der Realität gesehen. Dabei ist der Hauptfaktor, der mit dem Modell verbunden wird, ein hoher Grad an Gestalttreue.	„Ein Atom besteht aus einer Kugel, um die herum andere Kugeln angeordnet sind.“
Typ III	Dieser Typ des Modellverständnisses unterscheidet sich insofern von dem vorherigen Typen, als dass dem Lernenden klar ist, dass das <i>mentale Modell</i> auch eine Funktion trägt, die ebenfalls im modellierten realen Phänomen selbst gefunden werden kann.	„Ein Atom besteht aus einer großen Kugel, um die andere kleine Kugeln auf bestimmten Bahnen kreisen. Wenn eine kleine Kugel die Bahn wechseln will, muss sie überspringen.“
Typ IV	Der letzte Typ des Verständnisses eines <i>mentalen Modells</i> ist primär die Sicht, dass das Modell abstrakte Ideen (Funktionalität) repräsentiert. Die Gestalttreue ist dabei kein wichtiger Teil des <i>mentalen Modells</i> mehr. Dadurch ist solch ein <i>mentales Modell</i> eines, welches die Funktionalität eines Phänomens beschreibt.	„Orbitale beschreiben die Bereiche, in denen man Elektronen messen kann. Wirkliche „Kolben“ gibt es im Atom aber natürlich nicht, das ist nur eine Anschauung.“

Auch können zwar Probanden der Umfrage auf den beiden Skalen quantitativ eingeordnet werden, aber auch bei diesen Skalen muss berücksichtigt werden, dass eventuell Domäneeffekte einen Einfluss ausüben, da neben *mentalen Modellen* zur Atomhülle auch zu geringen Anteilen welche zum Magnetismus einbezogen wurden (F10).

3.3.1 Analyse der Probanden anhand der Typen

Wenn nun jedem Probanden, welcher alle Items mit einer Punktzahl zwischen 1 und 4 beantwortet hat (also sich nicht enthielt oder nicht „Weiß nicht“ wählte), die beiden Skalenwerte von *Gestalttreue mentaler Modelle* und *Funktionalitätstreue mentaler Modelle* zugeordnet werden, lassen sie sich quantitativ grob den Verständnistypen zuordnen (siehe **Abb. 6**). Es fällt zunächst sofort auf, dass der duale Typ und der funktionale Typ sehr viel häufiger vertreten ist als der Architektur-Typ und der nicht-entwickelte Typ. Der eher funktionale Typ ist dabei der am häufigsten auftretende. Dazu können einige Erkläransätze aufgeführt werden: Viele Fragen sind im Gebiet der Quantenphysik eingeordnet. Da alle Teilnehmenden an der Studie Zugang zu Lehrmaterial für Quantenphysik erhalten wollten,

ist anzunehmen, dass sie ein gewisses Interesse an der Quantenphysik mitbringen – und damit auch in vielen Fällen Vorwissen. Daher ist nicht unwahrscheinlich, dass viele schon Vorerfahrungen mit der Quantenphysik hatten und daher auch schon *mentale Modelle* in der Quantenphysik vorhanden waren. Zusätzlich sind alle Fragen im Rahmen des Schulstoffes einer gymnasialen Oberstufenklasse, sodass ein gewisses Grundwissen in diesem Fachgebiet vermutet werden kann, vor allem wenn auch die Information betrachtet wird, dass nur 1251 (999+252) der 3018 Teilnehmer „sonstigen Beruf“ oder „Schüler/in“ als Beruf angegeben haben. Auch sind nahezu alle Teilnehmer der Umfrage volljährig (nur bei den Schülerinnen und Schülern ist dies nicht sicher), was eine fortgeschrittene geistige Entwicklung impliziert.

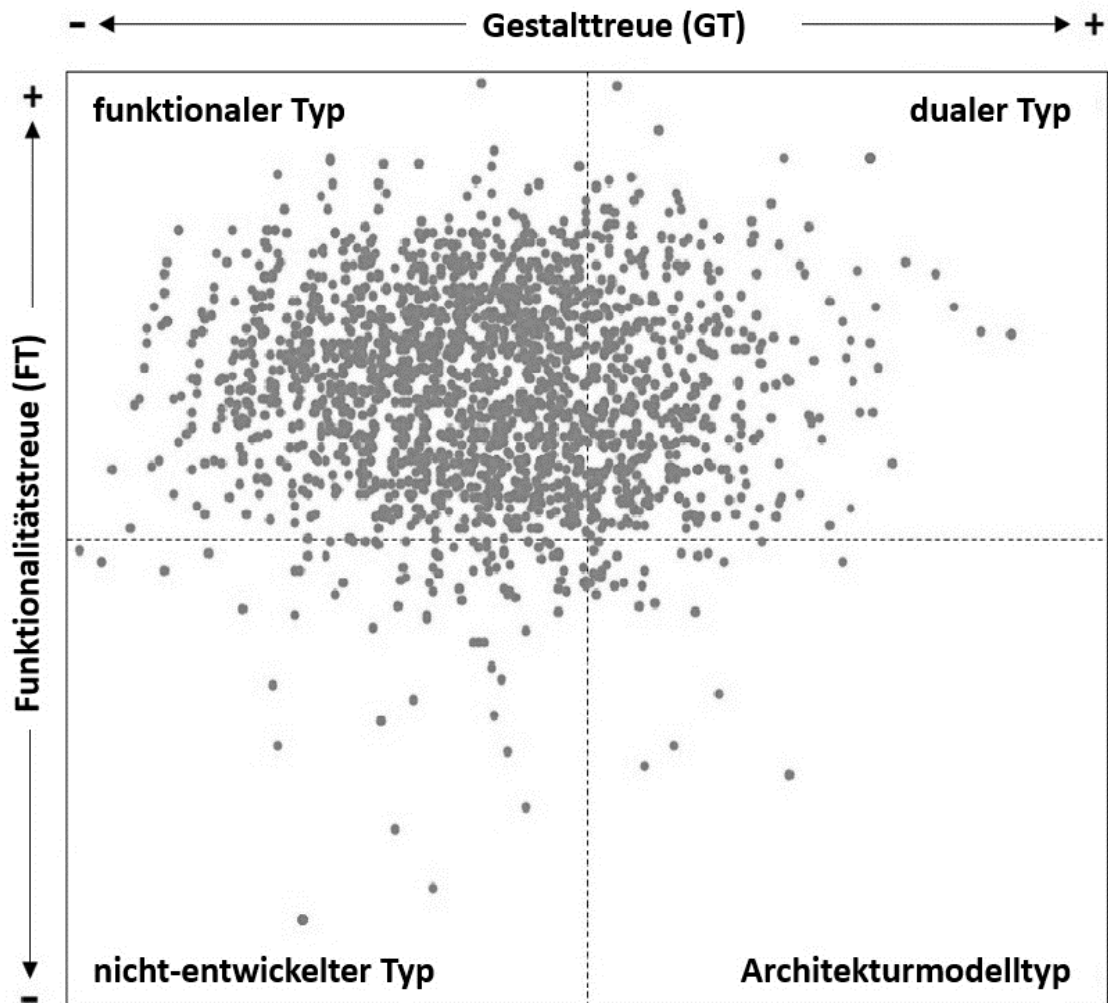


Abb. 6. Verteilung der Teilnehmenden an der Onlineumfrage zu Modellvorstellungen auf den Quadranten der vier Typen mentaler Modelle. Es ist zu sehen, dass verhältnismäßig wenige Probanden die unteren beiden Quadranten belegen und die oberen beiden Quadranten ähnlich besetzt sind. Auch ist der am meisten gefundene Typ der funktionale Typ.

Nachdem nun die allgemeine Verteilung der Probanden auf den Skalen zur *Funktionalitätstreue* und *Gestalttreue* dargelegt wurde, wird die Verteilung der einzelnen Berufsgruppen auf den Skalen untersucht. Dabei stehen zwei Berufsgruppen besonders heraus, welche

3 EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG ZUR TIEFENSTRUKTUR MENTALER MODELLE AM BEISPIEL DER QUANTENPHYSIK

hauptsächlich *mentale Modelle* des funktionalen Typs enthalten. Diese beiden Gruppen sind die Hochschullehrerinnen und -lehrer sowie die Gruppe der Lehrerinnen und Lehrer der Fächer Physik oder Chemie. Diese beiden sind in **Abb. 7.** dargestellt. Es wird sofort klar, dass in der Gruppe der Hochschullehrerinnen und Hochschullehrer nur eine einzige Person knapp außerhalb des oberen linken Quadranten liegt. Zwar ist die Anzahl dieser Personen nicht sonderlich groß ($N=41$), allerdings kann trotzdem ein starker Trend zum funktionalen Typen gezeigt werden. Bei den Lehrerinnen und Lehrern von Physik oder Chemie sieht es ähnlich aus: Zwar ist es in der Tat so, dass mehr Personen außerhalb des oberen linken Quadranten liegen, aber trotzdem ist auch hier ein starker Trend zum funktionalen Typen abzulesen. In ausnahmslos allen anderen Berufsgruppen ist die Verteilung auf die beiden oberen Quadranten im Groben gleichmäßig, wie im Vergleich der einzelnen Gruppen abgelesen werden kann (siehe dazu Anhang C). Der Unterschied zwischen den Lehrenden zu allen anderen ist dabei nach einer Bewertung mittels der Effektstärke durch Cohen's d als mittel bis stark zu sehen ($|d| = .75$)

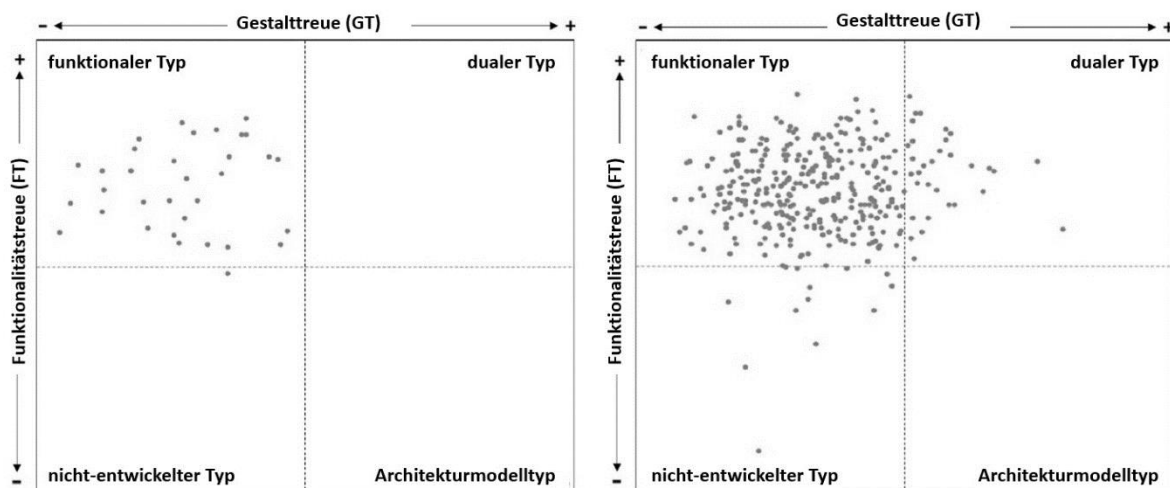


Abb. 7. Verteilung der Teilnehmenden im Bereich der Hochschullehrer/-innen (links) und Lehrer und Lehrerinnen (rechts) an der Onlineumfrage zu Modellvorstellungen auf den Quadranten der vier Typen *mentaler Modelle*. Es ist zu sehen, dass nahezu alle Teilnehmenden im oberen linken Quadranten aufzufinden sind.

Die empirischen Daten weisen darauf hin, dass eine zweidimensionale Modellierung *mentaler Modelle* mittels *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* passend ist. Die Ergebnisse der Erhebung bilden eine sehr große Stichprobe von Personen verschiedenster Professionen ab. Erhoben wurden allerdings keine weiteren Merkmale außer besagter Profession sowie ein grundlegendes Interesse an Quantenphysik, was in weiteren Untersuchungen verbessert werden könnte. So böte es sich zum Beispiel an, einen Intelligenztest hinzuzuziehen, der die Typen mit den kognitiven Fähigkeiten der Probanden abgleichen könnte. Zusätzlich sei angemerkt, dass die Formulierungen der Items zwar für eine Interpretation geeignet waren, jedoch bei eventueller Wiederholung noch besser auf die Konstrukte *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* abgestimmt werden könnten.

Um zu prüfen, ob diese Modellierung auch mit Funden anderer physikalischer Themengebiete und anderer naturwissenschaftlicher Fächer vergleichbar ist, werden in Kapitel 5 daher mit den Archetypen vergleichbare Befunde aus der Literatur zu Schülervorstellungen in der Physik, Biologie und Chemie zusammengetragen. Dabei werden auch den Verständnistypen I und II ähnliche Vorstellungen aufgeführt und mittels diverser Hinweise die Tendenz aufgezeigt, dass sie eher zu Beginn des Lernprozesses entstehen, was eine Erklärung für die geringe Anzahl dieser Typen im Datenmaterial ist. Zunächst aber wird eine tiefere historische Perspektive auf das Modellverständnis der Atome im Hinblick auf *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* erfolgen (Kapitel 4.1), da in diesem Gebiet die Typen auch empirisch gezeigt sind. Zusätzlich werden einige eigene konkrete Modelle in Hinblick auf *Gestalt-* und *Funktionalitätstreue* vorgestellt und diskutiert werden (Kapitel 4.2).

4 Atommole unter Betrachtung von Gestalt- und Funktionalitätstreue

Das „Atom“ ist etwas, was schon seit Jahrhunderten Gegenstand von Philosophie und Forschung ist. Unter Berücksichtigung der beiden empirisch erhobenen Faktoren *Gestaltstreue* und *Funktionalitätstreue* wird daher folgend eine Zusammenfassung der wichtigsten Ideen der historischen Entwicklung zur rein mathematischen Beschreibung der Atomhülle gegeben. Dabei ist vor allem interessant, wie sich die beiden Aspekte in den Gedankengängen exemplarisch ausgesuchter Wissenschaftler darstellen. Anschließend werden haptische Modelle vorgestellt, welche eine Hilfe dafür bieten, *mentale Modelle* von quantenphysikalischen Beschreibungen durch Darbietung neuer *Gestalten* zu entwickeln und an diesen Beispielen wird exemplarisch erläutert, welche Problematiken sich aus Sicht der empirischen Ergebnisse durch physikalische Atommole in der Lehre ergeben können.

4.1 Historische Perspektive auf das Verständnis von Atommole

Die heute gängige Beschreibung der Atomhülle mittels Lösungen der Schrödingergleichung erwächst aus einer langen Geschichte der Überlegungen und (Gedanken-)Experimente. Die in dieser Arbeit angeführten Naturwissenschaftler und -philosophen wurden exemplarisch aufgrund der Bekanntheit der von ihnen erdachten Modelle in Anlehnung an eine unserer Studien (UBBEN & HEUSLER, 2019A) ausgewählt, wo sie als die am häufigsten in der Schule verwendeten Atommole während einer Umfrage herausgestellt wurden. Für den Fall des Orbitalmodells wird Heisenberg den anderen Forschern, die mit der Entstehung der Quantenphysik in Verbindung gebracht werden, vorgezogen - wie Erwin Schrödinger oder Wolfgang Pauli. Der Grund hierfür ist pragmatischer Natur: Von HEISENBERG (1969/2015) ist in diesem Gebiet die mitunter ausführlichste Dokumentation über die Entwicklung des Orbitalmodells verfasst und sein Werk *Der Teil und das Ganze* dokumentiert zahlreiche Gespräche, die auch ein Bild der anderen angesprochenen Forscher geben. Zwar ist jenes Werk aus HEISENBERGs Blickwinkel geschrieben und enthält daher eine subjektive Perspektive, aber durch die ausführliche Beschreibung seiner Gedankengänge im Hinblick auf *Gestaltstreue* und *Funktionalitätstreue* lässt sich ein relativ tiefer Einblick gewinnen.

Auch im Rahmen der Schule ist die Untersuchung dieser Beschreibungen im Hinblick auf die beiden Aspekte von Vorteil: Will man sich mit den Vorstellungen zum inneren Aufbau der Materie auseinandersetzen, so ist ein oft gewählter Zugang die historische Aufarbeitung von Atommole. Wählt man diesen Weg, so ist es theoretisch für Lernende möglich, die Denkschritte und Veränderungen an den gängigen Atomvorstellungen nachzuvollziehen und an den Gedankengängen der Wissenschaftler und Philosophen jener Zeiten zu lernen, wie sie argumentieren und wieso sie ihre Bilder (*Gestalten*) so wählten, wie sie es taten – und wie sie diese interpretierten/verstanden. Dieser Aspekt der Forschungsgeschichte kann daher nicht nur die Fortschritte bei der Ergründung der innersten Struktur der Materie vermitteln, sondern auch im Sinne der *Nature of Science* zeigen, dass auch Erkenntnisse in den

Naturwissenschaften nicht immer feststehen, sondern sich durch neue Erkenntnisse und Beobachtungen stetig weiterentwickeln und nicht sofort eine passende Lösung gefunden wird.

Aber auch die Art und Weise, wie die Modellvorstellungen entwickelt und wie sie von den jeweiligen Erdenkern selbst bewertet wurden, ist von Belang, vor allem da es Lernenden schwerfällt, sich von den Bildern zu lösen (siehe auch Kapitel 2.3) – also einen Verständnistyp IV zu erlangen. So wird in der folgenden historisch orientierten Rückschau das gestalthafte Denken im Zusammenhang mit den Atomen über die Jahrtausende beleuchtet, wobei ein Augenmerk nicht nur auf die bildhafte bzw. mathematische Darstellung, sondern auch das Modellverständnis im Sinne von *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* gelegt wird.

4.1.1 Erste *mentale Modelle* zum Atom

Die Frage nach der Struktur der Materie wurde schon vor mehr als zweitausend Jahren aufgeworfen, wobei sie in solch früher Zeit noch rein (natur-)philosophischer Natur war. Die prominentesten Ideen im Zusammenhang mit dem sogenannten „Atomismus“ - der Idee, dass alles aus unteilbaren Teilchen besteht - kommen aus dem alten Griechenland und werden oft im Zusammenhang mit dem Denken von Leukipp und seinem Schüler Demokrit aus dem 5. Jahrhundert v. Chr. aufgeführt (TAYLOR, 1999), jedoch gab es auch in Indien ähnliche Ideen, welche zum Beispiel im 8. Jahrhundert v. Chr. vom hinduistischen Gelehrten Aruni festgehalten wurden (MCEVILLEY, 2002). Diese frühen Ideen wurden immer wieder diskutiert und weiterentwickelt, jedoch blieb mangels der Möglichkeit experimenteller Untersuchungen für viele Jahrhunderte das Thema der Struktur der Materie ein rein naturphilosophisches Unterfangen. Dies führte dazu, dass auch die Vorstellungen von Atomen, welche sich die Gelehrten machten, sich sehr an Analogien festhielten. So beschrieb zum Beispiel Demokrit die Form der Atome als konvex, konkav oder sogar haken- und augenförmig (TAYLOR, 1999). Die *Gestalt* der Atome war für Demokrit das, was sie voneinander unterschied und aus den *Gestalten* leitete er auch Eigenschaften wie „süß“ oder „sauer“ ab. Die Idee der *Gestalt* als etwas, das Eigenschaften und Funktionen bestimmt, findet sich auch bei PLATO (2016) in „Timaios“: Er vermutete, wie einige andere, dass alles der materiellen Welt aus Feuer-, Wasser-, Erd- und Luftteilchen besteht, wobei er dies spezifizierte: Er wies jedem dieser Elemente einen platonischen Körper zu: Das Feuer war seiner Ansicht nach ein Tetraeder, Erde ein Würfel, Wasser ein Ikosaeder und Luft ein Oktaeder (siehe **Abb. 8.**), wobei deren Oberflächen alle aus Dreiecken mit Innenwinkeln von 60°, 30° und 90° bzw. 45°, 45° und 90° bestanden, in die sie zerlegt werden können.

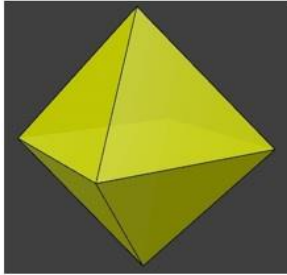
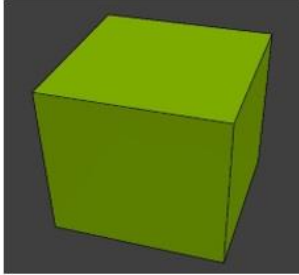
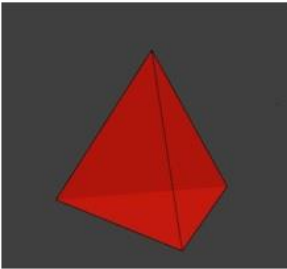
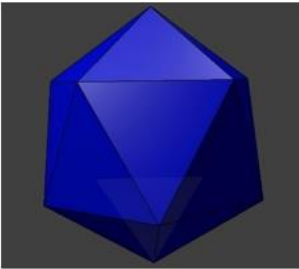
<p>Oktaeder (Luft) 48 Grunddreiecke</p> 	<p>Würfel (Erde) 24 Grunddreiecke</p> 
<p>Tetraeder (Feuer) 24 Grunddreiecke</p> 	<p>Ikosaeder (Wasser) 120 Grunddreiecke</p> 

Abb. 8. Die mathematischen Körper, aus denen nach PLATOs Darstellung alle Materie besteht. Aufgeführt ist der Tetraeder für Feuer (rot), der Würfel für die Erde (grün), der Ikosaeder für das Wasser (blau) und der Oktaeder für die Luft (gelb), zusammen mit der Anzahl an Dreiecken, die sie konstituieren.

Aus diesen Dreiecken und ihren Zusammensetzungen folgten dann die Eigenschaften der Materie (PLATO, 2016). Die Begründung dieser Wahl trifft er dabei mit zweierlei Kernargumenten: Zum einen meint er, dass seine erdachte Zuordnung der Körper zu den Elementen die Wahrscheinlichste ist, da sie die schönste ist, und zum anderen führt er alle anderen Eindrücke und Substanzen, die er kennt, auf die aus heutiger Sicht physikalischen und haptischen Erfahrungen zurück, welche die Körper in makroskopischer Ausführung besitzen würden (ebd.). In diesen *Gestalten* scheint PLATO die Eigenschaften und Funktionen der Welt und des Erlebbareren am logischsten und schönsten gebündelt zu sehen. Die Frage danach, wie genau PLATO selbst diese Körper verstand, ist nicht klar zu beantworten. Im Dialog des Timaios wird die Idee der vier Körper als kleinste Konstituenten der Materie als wahrscheinlich dargestellt (ebd.). Auch argumentiert Timaios in jenem Dialog dann mit der *Gestalt* und den Eigenschaften der Körper, beispielsweise soll der Feuertetraeder sinnvoll sein, da die Form scharfe Kanten hat, was als Hinweis darauf gedeutet werden kann, dass Timaios wirklich davon ausging, dass alles aus den Grunddreiecken bestünde, die man auch sehen könnte, wenn man die Mittel hätte. Es ist aber an dieser Stelle nicht zu vergessen, dass es sich um einen gedachten Dialog handelt und PLATO nur seinen Charakter sprechen lässt, nicht aber zwingend alles wörtlich nimmt, was dieser denkt. Auch HEISENBERG hielt später

den Dialog und Timaios' Behauptungen für willkürlich und spekulativ und konnte sich nicht erklären, wie ein „*Philosoph, der so kritisch und scharf denken konnte, doch in derartige Spekulationen verfallen war*“ (HEISENBERG, 1969/2015, S. 17). Den Aspekt, den HEISENBERG aber hier als wichtig anführt, ist die Idee, Mathematik (bzw. mathematische Formen) als Beschreibung für Atome zu verwenden:

„Ein Verständnis des fast unentwirrbaren und unübersehbaren Gewebes der Naturerscheinungen war doch wohl nur möglich, wenn man mathematische Formen in ihm entdecken konnte.“

(HEISENBERG, 1969/2015, S.17)

Für HEISENBERG war somit die Idee der funktionalen mathematischen Beschreibung für die Struktur der Natur die wertvollste Erkenntnis aus der Lektüre von PLATOS, die er in seiner Jugend aus dem Dokument mitgenommen hatte. Auch sehr viel später in seinem Leben, als er über Elementarteilchen und Symmetrien im Rahmen des Versuches eine einheitliche Feldtheorie zu entwickeln, nachdachte, kommt er wieder auf PLATO zu sprechen und präzisiert seine Gedanken. Er vergleicht PLATOS Körper mit „Urbildern“ und „Ideen“ (HEISENBERG, 1969/2015, S.281) und bezeichnet sie als hoch „abstrakt“ (HEISENBERG, 1969/2015, S. 286). Seine zentrale Frage zu dieser Problematik kann im Rahmen der Beschreibung mittels *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* relativ gut zusammengefasst werden: „Inwiefern sah Plato die Atome als realitätstreu? Waren sie für ihn gestalttreu und/oder funktionalitätstreu?“. Die Antwort auf diese Frage kann aber an dieser Stelle unglücklicherweise nur noch gemutmaßt werden.

4.1.2 Thomsons Atomverständnis

Ein tieferer Einblick in die Struktur der Atome wurde stark von Sir Joseph John Thomson vorangetrieben, und dieser Erkenntnisprozess ist unter anderem dokumentiert von HEILBRONN (2003), der im Zusammenhang mit Earnest Rutherfords Lebensweg auch eine historische Recherche über Thomson durchführte und zusammenfasste: In den 1890ern untersuchte Thomson Kathodenstrahlung auf Hinweise ihrer Bestandteile. Dabei gab es zu jener Zeit zwei Vermutungen: Einige Physiker postulierten, dass Kathodenstrahlung aus Licht bestünde, andere waren der Meinung, dass es sich um geladene „Korpuskel“ handelte - ein Begriff, den Thomson aufgrund seiner Experimente einführte. Als es Thomson gelang, Kathodenstrahlen nicht nur mit Magnetfeldern, sondern auch mit elektrischen Feldern umzuleiten, erwies sich die Modellierung der Kathodenstrahlen als Strahlen geladener Teilchen als die zutreffendere. Nachdem Thomson die Ablenkung gelungen war, modifizierte er seinen Versuch so, dass die elektrische und magnetische Kraft sich genau aufhoben und folgerte danach unter der Annahme, dass Kathodenstrahlen aus kleinen Bällen der Masse m und Ladung e bestanden, das Masse-Ladungsverhältnis eines Korpuskels. Der Vergleich des Masse-Ladungsverhältnisses für Kathodenstrahlen mit dem Verhältnis des Wasserstoffions - des damals leichtesten bekannten Elements - ergab einen Größenordnungsunterschied von 10^3 . Dies erstaunte die damaligen Fachleute, da aus diesem Vergleich folgte, dass entweder die Ladung des Kathodenteilchens sehr viel größer war - oder dass es eine sehr viel geringere Masse als ein Wasserstoffion hatte. Thomson war überzeugt von Letzterem und postulierte neben der Ladungsgleichheit der Kathodenteilchen

und Wasserstoffionen auch, dass es sich um die kleinste mögliche Ladung der Natur handelte. Dies bedeutete, dass die Masse der Korpuskeln mit der von Wasserstoffionen verglichen um den Faktor 1000 kleiner war. Doch Thomson ging weiter: Er postulierte, dass alle Atome nur aus Korpuskeln bestünden. Dies führte zu weiteren Versuchen im Zusammenhang mit dieser Hypothese, bis schlussendlich LORENTZ im Jahr 1897 für die atomare Emission von Licht und der Beeinflussung von Spektrallinien den Erklärungsansatz wählte, dass diese durch die schnelle Bewegung von "Korpuskeln" (Elektronen) im Atom herrührte (LORENTZ, 1897).

Von großem Belang für die Betrachtung der Entwicklung von *mental*en Modellen zum Atomaufbau ist dabei Thomsons Idee, dass innerhalb eines Atoms die Korpuskeln auf Ringen um das Atomzentrum kreisten, wobei die Anzahl und Besetzung der Ringe Auskunft über die chemischen Eigenschaften zuließ (THOMSON, 1903). Dieses Bild des Atoms, welches dem chemischen Schalenmodell sehr nahe ist, löste scharfe Debatten unter den europäischen Physikern aus (vgl. HEILBRONN, 2003, S. 30-31), wobei die Erstellung von scheinbar ad hoc-Bildern und Modellen der Hauptkritikpunkt an Thomsons Überlegungen war. Unter anderem beurteilten die Curies Thomsons Bilder als "kindisch, willkürlich und britisch" (vgl. HEILBRONN, 2003, S. 31) und der Chemiker Wilhelm Ostwald kritisierte explizite Bilder oder physikalische Modelle mittels einer Bibelstelle, in dem er sagte:

"Thou shalt not take unto thee any graven image or any likeness of anything."

(HEILBRONN, 2003, S. 31)

Auf der anderen Seite des Streites standen zum größten Teil britische Physiker, die sich für das Modell aussprachen. So merkte zum Beispiel Lord Kelvin an, dass er ohne eine Visualisierung in Form eines Bildes oder mechanischen Modells nicht logisch über ein Phänomen nachdenken könne. Auch zum Beispiel George Francis Fitzgerald war davon überzeugt, dass Briten aufgrund ihrer Disposition zur Poetik mit ihren Modellen auf dem richtigen Weg seien:

"A Briton wants emotion in his science, something to raise enthusiasm, something with human interest."

(HEILBRONN, 2003, S. 31).

Als essenziell für die Ursache des Erfolges von Thomsons Modell wird von HEILBRONN (2003) die Einsicht genannt, dass die Modelle nicht buchstäblich in der Natur existierten – eine niedrige *Gestalttreue*. Thomson seinerseits bestand immer darauf, dass seine Schüler eine Art des Bildes benutzten, auch wenn er ihnen freistellte, welche dies war – so lange es funktionierte – also im Rahmen des zu Erklärenden eine hohe *Funktionalitätstreue* besaß. Die Problematik in der Wissenschaftscommunity zu Thomsons Zeit kann wohl mit der Frage: „Sieht Thomson seine Modelle als gestalttreu an?“ auf den Punkt gebracht werden. Die gestalttreue Interpretation von (mental)en Modellen scheint somit schon zu Thomsons Zeit große Probleme ausgelöst zu haben.

Das Thomsonsche Modellbild hatte allerdings unter anderem die Schwäche, dass er annahm, dass die negativ geladenen Korpuskeln – die Elektronen – sich einfach in Gebieten positiver Ladungen sammelten. Dies führte zu einem Bild von einer positiv geladenen Sphäre, in deren Inneren Elektronen herumschwirren (siehe **Abb. 9.**), welches eine ad hoc Annahme war.

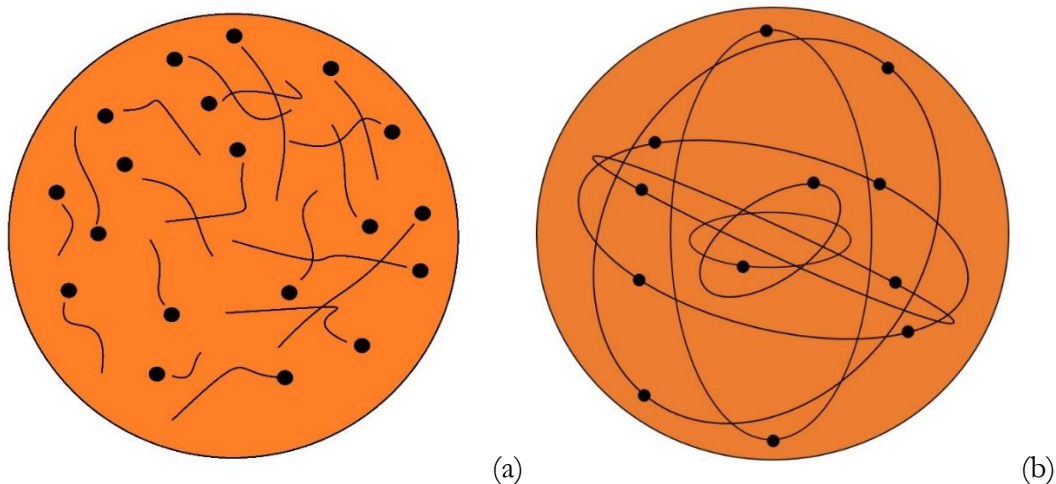


Abb. 9. Thomsons bekannteste Ansätze, das Atom zu beschreiben. Zunächst vermutete er, dass tausende Korpuskeln (Elektronen, schwarz) in einer masselosen positiv geladenen Hülle (orange) herumschwirrten (a), später schärfte er dieses Modell jedoch dahingehend aus, dass er annahm, die Elektronen würden auf unzähligen Ringen um den Mittelpunkt des Atoms rotieren, wobei die Anzahl der Elektronen auf den Ringen Aufschluss über die chemischen Eigenschaften geben sollten (b). Reproduziert nach THOMSON (1903).

Vereinfachend ist das so gezeichnete Bild als das „Rosinenkuchenmodell“ bekannt, obwohl dabei der dynamische Charakter nicht vergessen werden sollte. Kritiker der masselosen Ladungssphäre, in der die Elektronen kreisten, war unter anderem Hantaro Nagaoka (NAGAOKA, 1904), welcher davon überzeugt war, dass positive Ladungen undurchdringlich seien. Daher schlug er eine große positive Kugel im Atominneren vor, welche sehr viel größer als die Elektronen war – das Saturnmodell (siehe **Abb. 10.**).

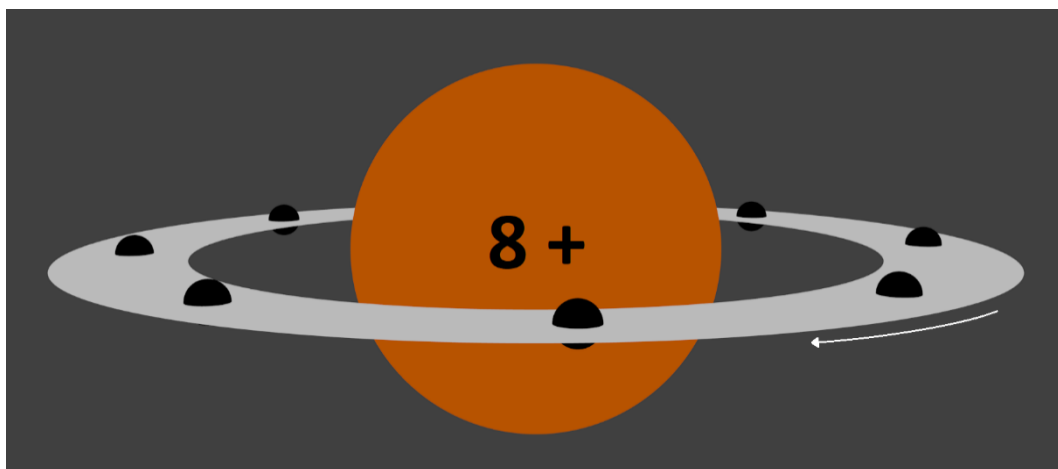


Abb. 10. Die Elektronen (schwarz) befinden sich auf einem Ring, welcher um einen riesigen positiv geladenen Ball (orange) rotiert. Reproduziert nach NAGAOKA (1904).

Auch durch Experimente mit Metallfolien und Alphapartikeln wurden Thomsons Überlegungen in Zweifel gestellt (HEILBRONN, 2003). Hatte er vorher angenommen, dass das Verhältnis zwischen der Atommasse A und die Anzahl der Elektronen n in einem Bereich von 1000 lag, so musste er doch schon 1906 feststellen, dass das Verhältnis eher $n/A = 2$ war. Dies brachte Probleme für sein Modell, was tausende Elektronen schon im leichten Wasserstoffatom voraussagte: Zum einen musste die Masse des Atoms hauptsächlich im positiven Teil des Atoms liegen – was bedeutete, dass er nicht masselos war, wie im Rosinenkuchenmodell angenommen – zum anderen stimmte die Abschätzung der Anzahl der Elektronen pro Atommasse nicht. Auch traf Thomson bei kleinen Kernen mit der Vorstellung von ringförmigen Elektronenbahnen auf Probleme, da diese durch Aussenden von Strahlung bei Bewegung langsamer werden und in das Zentrum fallen müssten.

4.1.3 Rutherfords Atomverständnis

Den vollständigen Umschwung von gedanklichen Konstrukten, welche zur Erklärung herangezogen wurden, zu empirisch nachweisbaren „wirklichen“ Entitäten, welche gut funktionierende Erklärungen über Phänomene liefern konnten, brachte Einsteins Arbeit zur Brownschen Bewegung, welche er durch das Modell der Atomstöße erklären konnte (EINSTEIN, 1905). Damit waren die sonst nur in der Vorstellung existierenden Atome auch indirekt im Experiment beobachtbar.

Ein Schüler von Thomson versuchte, Thomsons Problem in seinem Labor auf die Spur zu kommen, in dem er ebenfalls auf eine Goldfolie schoss – Ernest Rutherford, welcher so im Jahr 1910 den Atomkern zur Lösung des Problems konzeptualisierte (siehe **Abb. 11.**). Die Tatsache, dass einige wenige Alphakerne von der Goldfolie zurückgeworfen wurden, bezeichnete Rutherford damals als das „unglaublichste Ereignis, das [er] je bezeugen durfte“ (vgl. ANDRADE, 1964, S.111).

Um den Prozess jedoch genau zu verstehen, versuchte Rutherford sich nach Thomsons Philosophie ein Bild zu machen (vgl. HEILBRONN, 2003, S.68). Zunächst ging er davon aus, dass Alphateilchen so groß seien wie Atome - man könnte sich das Experiment dann so vorstellen, als würde man mit Raketen auf eine Bank schießen, um einen Safe zu finden (ebd.). Nach vielen Rechnungen kam er auf die Idee, Alphateilchen nicht als groß wie ein Atom, sondern als Punkt anzunähern. Dies bedeutete, dass ein Heliumatom ohne seine Elektronen plötzlich zu einem Punkt wurde. Dies führte dazu, dass Rutherford die Abschätzung seines Lehrers von 1906 noch modifizierte und das Verhältnis n/A als $1/2$ feststellte, was die damit zusammenhängenden Phänomene besser beschrieb. Infolgedessen postulierte er auch später das neutrale Teilchen, das „Neutron“, wie er es nannte (RUTHERFORD, 1920), welches aber erst 1932 von einem seiner Schüler nachgewiesen wurde (CHADWICK, 1932). Diese Erkenntnisse sind dabei ebenfalls anhand wenig *gestalttreuer* aber *funktionalitätstreuer* Bilder gewonnen worden und damit analog zu Thomsons Gedankengängen.



Abb. 11. Rutherfords Zeichnung zu einem Atomkern aus dem Jahre 1910. Der Nukleus ist mit $+ne$ beschrieben.

Problematisch in Rutherfords Bild war jedoch, dass er zwar die Kollisionen und die geringe Größe von Atomkernen erklären konnte, nicht aber andere Phänomene wie Emissionsspektren. So schien es zwingend für Rutherford, weiter an dem Bild von Thomson festzuhalten, dass die Elektronen auf Ringen um das Atomzentrum – welches er nun als Nukleus identifiziert hatte – kreisten wie Ringe um den Saturn. Dies führte allerdings wieder zu der Problematik der Bremsstrahlung und zusätzlich zur Problematik der theoretischen Abstoßung der Elektronen der Atomhülle untereinander. Ein Vorteil von Rutherfords Darstellung im Gegensatz zu Thomson war allerdings, dass er Phänomene der Atomhülle (Ionisationsprozesse) und Phänomene des radioaktiven Zerfalls (Atomkern) trennen konnte. Es wurde somit durch Rutherford ein *funktionalitätstreueres* Modell entwickelt, das er durch Modifikation der *Gestalt* von Thomsons Modell erarbeitete. Aufgrund der Nutzung von Thomsons Philosophie der Metaphern kann aber vermutet werden, dass Rutherford seine Bilder ebenfalls nicht als *gestalttreu* auffasste.

4.1.4 Bohrs Atomverständnis

Das Problem der Instabilität von Rutherfords Atommodell faszinierte und bestärkte einen anderen Forscher, der um das Jahr 1912 ebenfalls in Rutherfords Labor zu Gast war, sich mit dem experimentellen Teil der Physik der Radioaktivität zu befassen: Niels Bohr. Er benutzte Plancks Idee der Energiequantelung und postulierte, dass die Elektronen nur auf bestimmten Bahnen kreisen konnten und dass auf diesen Bahnen keine Energie durch elektromagnetische Strahlung ausgesendet würde (BOHR, 1913a; BOHR, 1913b und BOHR, 1913c). Auf kritische Anregungen von unter anderem Rutherford schärfte Bohr seine Idee weiter aus und kam schließlich dazu, die Elektronensprünge beim Übergang von einem Orbit auf einen anderen unbeschrieben zu lassen, da es in seinem Modellbild schien, dass gebundene Elektronen nicht den gewohnten mechanistischen Gesetzen der Physik gehorchten (siehe **Abb. 12.**).

Dies führte zu einem großen Umbruch in den Modellbildern der Physiker zum Atom, da diese neue Ansicht, die unter anderem von Einstein als „one of the greatest discoveries“ titulierte wurde - wie Hevesy in einem Brief an Rutherford berichtete (siehe EVE, 1939) - den

4 ATOMMODELLE UNTER BETRACHTUNG VON GESTALT- UND FUNKTIONALITÄTSTREUE

intuitiven mechanischen Bildern von Thomson und Rutherford den Rücken zuwandte. Damit löste erstmalig ein Modellbild die bisherige Beschreibung des Atoms ab, welches nicht auf rein intuitive mechanische Analogien zurückzuführen war und stattdessen andere Funktionen zugrunde legte. Für Bohr selbst, der auch teils eine Analogie der Planetenbahnen übernahm, war diese aber immer nur eine poetische Analogie, die ähnlich der Thomsonschen Lehre von Modellbildern eine abstrakte *Funktionalität* trug und darstellte und nicht die reale *Gestalt* des Atoms: Er vergleicht seine Bilder nach HEISENBERGs Angaben mit „*Dichtung*“ (HEISENBERG, 1969/ 2015, S.54). Dabei beschreibt zum Beispiel auch der Historiker Ernst Peter Fischer die Genialität und Besonderheit von Bohrs Gedanken als deutbar im Sinne einer Zusammenführung der beiden großen Traditionen von Aufklärung und Romantik (FISCHER, 2012, S. 20ff).

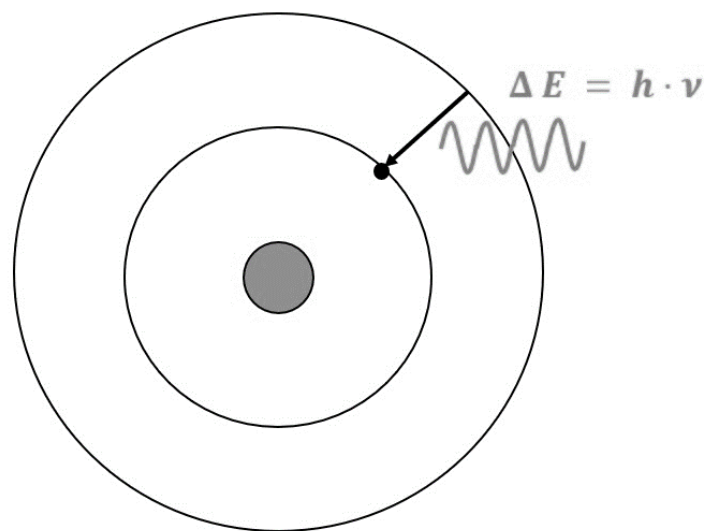


Abb. 12. Der „Quantensprung“, wie Bohr ihn postulierte: Elektronen (schwarzer Punkt) in der Atomhülle können sich nur auf diskreten Bahnen um den Atomkern (orange) bewegen. Wollen sie von einer auf eine andere Bahn springen, so müssen sie eine gequantelte Energie in Form von Licht aufnehmen oder ausstrahlen. Reproduziert nach BOHR (1913A-C).

Nach den Erinnerungen von HEISENBERG an die Zeit, in der er unter anderem mit Wolfgang Pauli an einem Seminar von Sommerfeld teilnahm, bei dem es um Bohrs Überlegungen zur Struktur des Atoms ging, wäre die Loslösung von den sonst aus dem makroskopischen bekannten Phänomenen wie der Elektronenbremsstrahlung und der „Zahlenmystik“ der Elektronensprünge (HEISENBERG, 1969/2015, S. 47) schnell von der wissenschaftlichen Community verworfen worden, wenn sie nicht einen großen Vorteil gegenüber mechanistischen Modellbildern gehabt hätten: Die Art, mit der sie die Funktionen/Prozesse innerhalb und zwischen Atomen beschrieben, war den alten Bildern überlegen und es konnten sehr viel mehr experimentelle Resultate erklärt werden (ebd.). Und schon in dieser Zeit spricht HEISENBERG davon, dass die Quantelung der Atomhülle ihn an die Quantelung bei schwingenden Saiten erinnerte (ebd.). Auch erinnert HEISENBERG sich an viele

Diskussionen mit Wolfgang Pauli darüber, ob es die Elektronenbahn „wirklich gibt“. Die beiden stimmten zwar darüber überein, dass es Kondensstreifen in Nebelkammern gäbe, die sichtbar seien, aber auch dass die Bahn im Atom keine adäquate Beschreibung mehr war (HEISENBERG, 1969/2015, S.48f und S.94ff). Dies machten sie vor allem an dem Sprung (im Sinne einer Unstetigkeit in der Energie, nicht der bildlichen Bewegung) von einer Bahn auf die andere abhängig, über den eine räumliche Aussage keinen Sinn ergibt.

Auch kommt die bereits zu Thomsons Zeiten bestehende Kritik wieder auf, dass die Bahn eigentlich gar nicht real existieren dürfe. Doch im Gegensatz zu dem Streit zwischen z.B. Wilhelm Ostwald und George Francis Fitzgerald zu Thomsons Zeit, bei dem die Fronten klar waren, räumt HEISENBERG trotz der Überzeugung, dass es Elektronenbahnen nicht wirklich gibt, ein, dass Bohrs „*unhaltbare Annahmen*“ doch einen „*entscheidenden Teil der Wahrheit*“ (HEISENBERG, 1969/2015, S. 49f) enthalten. Dabei vergleicht er Bohr mit einem Maler, der mit „*untrüglichem Instinkt*“ Bilder kreiert (ebd.). Diese Beschreibung ist ähnlicher der, die Fitzgerald wählte, als er die Denkweise britischer Physiker als „*emotional*“ beschrieb. Auch scheint sich hier die Thomsonsche Schule des Bilddenkens, mit der Bohr bei seinem einjährigen Besuch in Rutherfords Labor konfrontiert war (HEILBRONN, 2003), mit Bohrs Art der Beschreibung von Atomen zu decken. Hinweise auf diesen Umstand lassen sich auch an weiteren Stellen von HEISENBERGs Erinnerungen finden: Als er sich an die ersten Vorträge von Bohr erinnert, zu denen er seinen Lehrer Sommerfeld begleitete, beschreibt er Überraschung: Der Inhalt von Bohrs Theorie war ihm zwar geläufig, aber Bohrs Ausführungen machten ihm klar, dass er nicht durch „*Berechnungen und Beweise, sondern durch Erfühlen und Erraten*“ seine Erkenntnisse gewonnen hatte (HEISENBERG, 1969/2015, S.51). Beim ersten persönlichen Gespräch mit Bohr während eines Spaziergangs wird diese Denkweise auch von Bohr selbst noch einmal beschrieben, wie HEISENBERG sich zurückerinnert:

„Der Ausgangspunkt war ja nicht der Gedanke, dass das Atom ein Planetensystem im Kleinen sei und dass man hier die Gesetze der Astronomie anwenden könnte. So wörtlich habe ich das alles nie genommen. [...] In der bisherigen Physik oder in jeder anderen Naturwissenschaft konnte man, wenn man ein neues Phänomen erklären wollte, unter Benutzung der vorhandenen Begriffe und Methoden versuchen, das neue Phänomen auf die schon bekannten Erscheinungen oder Gesetze zurückzuführen. In der Atomphysik wissen wir aber ja schon, dass die bisherigen Begriffe sicher nicht ausreichen. Wegen der Stabilität der Materie kann die Newtonsche Physik im Inneren des Atoms nicht richtig sein, sie kann bestenfalls gelegentlich einen Anhaltspunkt geben. Und daher wird es auch keine anschauliche Beschreibung der Struktur des Atoms geben können, da eine solche – eben weil sie anschaulich sein sollte – sich der Begriffe der klassischen Physik bedienen müsste, die aber das Geschehen nicht mehr ergreifen.“

(HEISENBERG, 1969/2015, S. 53)

Auch vergleicht er die Überlegungen zur Quantenphysik mit der Reise eines Seefahrers, der in unbekannte Länder mit unbekanntem Sprachen vordringt. Als HEISENBERG genauer nachfragt, was die Bilder denn bedeuten, antwortet Bohr ungefähr Folgendes:

4 ATOMMODELLE UNTER BETRACHTUNG VON GESTALT- UND FUNKTIONALITÄTSTREUE

„Diese Bilder sind ja aus Erfahrungen erschlossen, oder, wenn Sie wollen, erraten, nicht aus irgendwelchen theoretischen Berechnungen gewonnen. [...] Wir müssen uns klar darüber sein, dass die Sprache hier nur ähnlich gebraucht werden, wie in der Dichtung, in der es ja nicht darum geht, Sachverhalte präzise darzustellen, sondern darum, Bilder im Bewusstsein des Hörers zu erzeugen und gedankliche Verbindungen herzustellen.“

(HEISENBERG, 1969/2015, S. 54)

Auch hier ist also eine geringe *Gestalttreue* der (mentalen) Modelle und eine hohe *Funktionalitätstreue* als eine der Kernaussagen des Modellbildes festzustellen.

4.1.5 Heisenbergs Atomverständnis

HEISENBERG erinnert sich während dieses Gespräches auch an ein früheres Gespräch seiner Studienzeit und kommt zu dem Schluss, dass Elektronen „keine Dinge mehr seien“, da ihnen klassische Eigenschaften fehlten, wie „Ort“ oder „Ausdehnung“ (HEISENBERG, 1969/2015, S. 55). Diese Erkenntnis, dass die *Gestalt* der Modellbilder keine direkte *Gestalttreue* besitzt, sondern nur die Kodierung für etwas anderes ist, ist erneut ein Schritt fort von klassischen mechanischen Modellvorstellungen, die HEISENBERG immer wieder in seiner Autobiografie durchscheinen lässt. Eine *Gestalttreue* wird dem folgenden Orbitalmodell damit nicht mehr zugesprochen. Ein zentraler Kern, der die Physiker wie Thomson, Rutherford und Bohr in dieser Zeit bewegte, war die Problematik, dass die bekannten mathematischen Gesetze und Strukturen aus der Newtonschen Mechanik an ihre Grenzen stießen, beziehungsweise vollständig versagten. Hinzu kam, dass die Objekte, um die sich die Forschung drehte – die „Atome“ – eine Größe besaßen, durch die sie der direkten Beobachtung entzogen waren und somit aus ihrer Wirkung nur mit Experimenten Rückschlüsse über die Funktionsweise des Atoms geschlossen werden konnten. Eine *Gestalttreue* der Modelle erreichen zu wollen war also im Prinzip gar nicht mehr möglich, wohl aber eine immer bessere *Funktionalitätstreue*. In der folgenden Zeit wurde dies immer deutlicher, vor allem auch, als der Compton-Effekt entdeckt wurde (COMPTON, 1923) oder ein Multiplett in Spektrallinien (ORNSTEIN & BURGESS, 1924) gefunden wurde. HEISENBERG versuchte 1924 schließlich, mittels des Prinzips des harmonischen Oszillators die Elektronen zu beschreiben und wandte seinen Blick von dem Bahnbegriff vollständig ab, um eine mathematische Beschreibung zu finden. Ihm gelang es dann schließlich auf Helgoland, einen mathematischen Ansatz für die Quantenmechanik zu finden. Diesen Moment beschreibt er damit, durch die „Oberfläche der atomaren Erscheinung“ zu brechen und auf die „mathematischen Strukturen herunterzusehen“, die die Natur vor ihm ausgebreitet hatte (HEISENBERG, 1969/2015, S. 78) – dem Finden einer mathematischen, funktionalen Beschreibung für die Phänomene, die zuvor nicht erklärbar waren.

Nach HEISENBERGS Arbeit mit Matrizen, die die Quantenmechanik beschrieben, veröffentlichte Erwin Schrödinger 1926 seine Wellengleichung (SCHRÖDINGER, 1926), von der man schnell zeigen konnte, dass sie mit der bisherigen Quantenmechanik mathematisch äquivalent war. Sie beschreibt die bis dahin bekannten Teilchen wie Elektronen durch Wellenfunktionen Ψ , die mittels des Hamiltonoperators H bezüglich eines Raumes (z.B.

Orts- oder Impulsraum) und des reduzierten Planckschen Wirkungsquantums \hbar mit ihrer eigenen Zeitableitung in Beziehung gesetzt werden:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H \Psi.$$

Doch die Interpretation dieser Erkenntnis und vor allem von Ψ gab Anlass zu Streitereien bei der Interpretation der Quantenphysik. Hatten Bohr und HEISENBERG sich noch am Bild des Elektronensprungs festgehalten, so argumentierte Schrödinger dafür, auch Materie als Welle zu sehen, wie es mit seiner Wellengleichung nun beschreibbar war. Er forderte ein anderes Bild für den mathematischen Untergrund und sprach sich für die Wellenbeschreibung aus, welche die Teilchenvorstellung in vielen Punkten ablehnte. Auch Bohr und HEISENBERG selbst waren sich nun uneinig: Bohr zog in Betracht, dass Wellen- und Teilcheneigenschaften parallel existierten, wobei HEISENBERG daran festhielt, dass seine eigene andere Interpretation die Richtige sei (HEISENBERG, 1969/2015, S. 95).

Es war schließlich die Arbeit von Born über Stoßprozesse, die das erste Mal Ergebnisse lieferte, die er damit erklärte, dass die Schrödinger'sche Wellenfunktion die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Teilchens angibt, wobei er sich später korrigierte und diese Eigenschaft dem Quadrat von Ψ zusprach (BORN, 1926). Wird zum Beispiel die Schrödingergleichung auf das im Wasserstoff gebundene Elektron angewendet, so erhält man als Lösungen für Ψ komplexwertige Kugelwellen, wobei ihr Betragsquadrat die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen angibt. Diese Aufenthaltswahrscheinlichkeiten sind heute auch als „Orbitalmodell“ bekannt.

Borns These gefiel HEISENBERG nicht, auch wenn er sie als richtig einschätzte (HEISENBERG, 1969/2015, S.95). Er nutzte sie nun, um zu erklären, wie man denn etwas in der Nebelkammer beobachten konnte, was die *Gestalt* einer Bahn hatte. Seine Idee war es, die Tröpfchen der Nebelkammer als Ortsmessungen zu deuten, die die laufende Wellenfunktion des Elektrons permanent kollabieren ließen (ebd.). Aus dieser Idee der Projektion eines komplexen Hilbertraumes auf den \mathbb{R}^3 -Ortsraum leitete er dann auch seine Heisenbergsche Unschärferelation ab. Es war nun das erste Mal in der Geschichte der Physik so, dass die Mathematik eine „Welt“ beschrieb, die jenseits der beobachteten liegt und die nur durch Projektion auf die 3D-Welt wahrgenommen – gemessen - werden kann (siehe auch Kapitel 4.2). Dies wollte vor allem Einstein nicht gelten lassen und argumentierte bis zu seinem Tod gegen eine zufällige Natur der Quantenphysik, die zu jener Zeit so aufgefasst wurde, dass die Quantenphysik „*das Mögliche, nicht das Faktische*“ beschreibt (HEISENBERG, 1969/2015, S. 100). HEISENBERG selbst beschrieb die Gesamtheit der Mathematik der Quantenphysik als „*objektive Welt*“ und die Welt der Beobachtungen als „*subjektive Welt*“ (HEISENBERG, 1969/2015, S. 108). Dadurch weist er der quantenmechanischen Welt der *Funktionalität* wohl eine eher übergeordnete Rolle zur Welt der Erscheinungen und *Gestalten* zu, welche nur Manifestationen dieser Funktionen sind.

Auch veröffentlichte HEISENBERG 1928 seine bekannte Unschärferelation, die ein erneutes physikalisches Umdenken mit sich brachte. Die beiden in der klassischen Mechanik bekannten Größen Impuls p und Ort x werden uminterpretiert und nun als Observablen - als lineare Operatoren \hat{x} für den Ort und \hat{p} für den Impuls - aufgefasst, die auf

Zustandsfunktionen (bspw. von einem Elektron) wirken. Aufgrund der Komplexwertigkeit dieser Funktionen ist es jedoch nicht mehr möglich, diese selbst zu messen.

In Amerika hatten die Wissenschaftler in ihrer pragmatischen Tradition im Gegensatz zu Leuten wie Einstein weniger Probleme damit, die neuartigen Züge der Quantenphysik zu akzeptieren – sie argumentierten damit, dass die Quantenphysik besser funktioniere als andere Beschreibungen und somit zu benutzen war (vgl. HEISENBERG, 1969/2015). Diese bessere *Funktionalität* der quantenphysikalischen mathematischen Beschreibungen im Gegensatz zu klassischen führte schließlich dazu, dass sie als die akzeptierte Beschreibung für Vorgänge auf kleinster – atomarer und subatomarer – Ebene wurde.

4.1.6 Allgemeines Atomverständnis

Die historische Betrachtung des Entwicklungsprozesses von (mentalen) Modellen zu Atomen ist durch Bilder geprägt, auch wenn sie in einer mathematischen, komplexwertigen Beschreibung endete, welche einen höherdimensionalen Raum beschreibt - was eine Darstellung mit dreidimensionalen Bildern unzureichend macht.

Bohr, Rutherford, Thomson und Heisenberg scheinen die (mentalen) Modelle primär nur als *funktionalitätstreu* anzusehen. Dabei messen sie der Gestaltbildung zum Fassbarmachen einer Idee aber trotzdem eine große Wichtigkeit zu. Der Ablauf ihrer Modellbildung lässt sich grob in zwei Schritten zusammenfassen, welche auch mit denen von GRECA & MOREIRA (1997, siehe Kapitel 5 und 7) vergleichbar sind:

- 1.) Gestaltbildung: Die Bildung von Gestalten (hier meist Bilder) machte die ersten Ideen fassbar. Dabei werden Gestalten als „als ob“-Gestalten empfunden.
- 2.) Funktionalitätsanalyse: Die Funktionalität des (mentalen) Modells wird überprüft und es wird analysiert, ob die Funktionen des Modells Beobachtungen besser beschreiben und voraussagen als vorherige Modelle und deren Funktionen.

Es scheint allgemein durch, dass die *Gestaltstreu* relativ gering ausgebildet ist und die Bilder eher als Werkzeuge zum Fassbarmachen benutzt werden. Durch *Funktionalitätstreu* hingegen werden Modelle von den Fachleuten bewertet: Solche, die als am funktionalitätstreuesten empfunden werden, haben den Vorrang in der wissenschaftlichen Gesellschaft (siehe auch den Kreislauf von KUHN, 1970). Außerdem werden scheinbar immer *funktionalitätstreuer* Modelle erdacht und dies scheint das Ziel der Wissenschaftler zu sein (ebd.). Auch sehen zumindest Bohr und Heisenberg die Mathematik als ausschlaggebende funktionale Beschreibung der Physik. Dies steht im starken Gegensatz zu den Erkenntnissen, die heute über Schülerdenken bekannt sind: Hier werden die *Gestalten* sehr wohl als realitätstreu empfunden, was zu großen Schwierigkeiten führt (siehe Kapitel 2.3). Daher ist es zum einen potenziell ertragreich, das Modellverständnis der Physiker im Zusammenhang mit ihren Modellen auch anzusprechen und somit im Sinne von *Nature of Science* ein Modellbewusstsein zu entwickeln. Zum anderen zeigt sich aber auch, dass es noch an Modellen mangelt, die den Lernenden die Quantenphysik anschaulich machen können. Aufgrund dessen werden im folgenden Abschnitt auch einige quantenmechanische Visualisierungen vorgestellt, die zu diesem Zweck entwickelt wurden.

4.2 Haptisch-visuelle Zugänge zu Atommodellen

Wie bereits erörtert, sind *mentale Modelle* häufig primär visuelle und/oder auditive kodierende Darstellungen (vgl. MAYER, 2001). Eine fehlende Komponente ist in diesem Fall jedoch die körperliche – die kinästhetische – Wahrnehmung. Sie beschreibt das Körperempfinden, welches in der Physiologie oft in „Oberflächensensibilität“ und „Tiefensensibilität“ unterteilt wird (vgl. BIRBAUMER & SCHMIDT, 2006). Unter „Oberflächensensibilität“ fällt der Großteil haptischer Reizinformationen; solche, die durch Druckwahrnehmung auf der Haut aufgenommen werden. Ergänzend hierzu gibt es die „Tiefensensibilität“, welche durch interozeptive Sinneswahrnehmung die Lage und Ausrichtung der Körperelemente wie Muskeln abbildet und im kinästhetischen Gedächtnis abbildet. Dieses Gedächtnis wird oft als „Muskelgedächtnis“ bezeichnet, obwohl damit nicht alle Sinnesinformationen adressiert werden, die es speichert. Das kinästhetische Gedächtnis arbeitet zum größten Teil unbewusst, bildet aber das Fundament für bewusste Erfahrungen und Konzepte, die daraus erwachsen (siehe auch WILSON, 2002; PANKSEPP, 1998).

Der Zugang zum kinästhetischen Sinneskanal mittels „anfassbarer“ Modelle bietet eine Möglichkeit, Lernprozesse mit einem nicht häufig in der physikalischen Bildung genutzten Sinneskanal zu unterstützen und die Ausbildung *mentaler Modelle* für physikalische Phänomene in diesen Bereich hin anzuregen und auszubauen (BIRBAUMER & SCHMIDT, 2006; GLENBERG, 2010). Die Untersuchungen zur Benutzung haptischer Modelle als Stützen zur Entwicklung kinästhetisch kodierter *mentaler Modelle* ist im Bereich der Quantenphysik noch in den Kinderschuhen, aber erste Ansätze sind bereits entwickelt (unsere Modelle sind nachzulesen bei UBBEN & HEUSLER 2018; HEUSLER & UBBEN 2018; HEUSLER & UBBEN, 2019A; HEUSLER & UBBEN, 2019B). Unsere Modelle von dieser Konzeption werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt, um eine Grundidee zu vermitteln, welche haptischen Modelle – vor allem unter Benutzung neuer Technologien wie des 3D-Druckes (PUSCH & BRUNS, 2018) – genutzt werden könnten, um quantenphysikalische Konzepte im wahrsten Sinne des Wortes greifbar zu machen.

4.2.1 Haptische Kugelflächenfunktionen- und Kugelwellenmodelle

Die Grundbeschreibung des Orbitalmodells erfolgt durch die Lösung der Schrödingergleichung für das im Wasserstoff gebundene Elektron und dem Finden seiner möglichen Zustände. Die Herleitung kann aber auch in allgemeinerer Form erfolgen und wird nun dargelegt: Voraussetzung dafür ist nur ein radialsymmetrisches Potential – wie es beim Wasserstoff der Fall ist. Der Hamiltonoperator H_r sei dabei gegeben durch

$$H_r = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V(r) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{r^2} \partial_r r^2 \partial_r + V_{eff}(r)$$

und das effektive Potential durch Berücksichtigung des Drehimpulses $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ durch

$$V_{eff}(r) = V(r) + \frac{L^2}{2mr^2} = V(r) + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2}.$$

Nun ist es ertragreich, die für diesen Fall zu lösende Schrödingergleichung zu betrachten:

$$H_r \Phi = E \Phi.$$

Die Lösungen dieses Falles können mittels der Zerlegung in einen radialabhängigen und einen winkelabhängigen Teil erhalten werden, die durch

$$\Phi_{\eta,l,m}(r, \phi, \theta) = R_{\eta}^l(r) \cdot Y_{l,m}(\phi, \theta)$$

gegeben sind (vgl. z.B. MÜNSTER, 2010). Dabei bietet es sich an, sich bei der qualitativen Betrachtung dieser Funktionen zunächst auf die Zahlen l und m der Kugelflächenfunktionen zu beschränken. Bei genauer Untersuchung bemerkt man, dass diese beiden Parameter Aussagen über die Anzahl von Knotenorte machen – wobei auf einer Kugeloberfläche als 2D-Objekt Knotenlinien zu finden sind. Dabei beschreibt l die Gesamtanzahl der Knotenlinien auf der Kugeloberfläche und m die Orientierung in Bezug auf eine festgelegte Achse (z.B. die z -Achse). Damit gibt es für jedes gegebene l insgesamt $2l + 1$ verschiedene Moden unter Berücksichtigung ihrer Orientierung. In **Abb. 13.** sind die möglichen Orientierungen für $l = 0,1,2,3$ grafisch veranschaulicht, wobei das Vorzeichen vor m die Rotationsrichtung der Knotenlinien um die festgelegte Achse angibt. Die Kugelflächenfunktionen sind radial unabhängig, was bedeutet, dass sie für jedes r die gleichen Werte besitzen. Um dies zu verdeutlichen und fassbar zu machen, wurde für die 3D-gedruckten Modelle ein Radius r_f festgelegt und die Knotenlinien für $r < r_f$ im Modell abgebildet, was die Knotenlinien der Kugelflächenfunktionen in den 3D-Raum erweitert zu Knotenflächen macht. Da die 3D-Modelle geöffnet und geschlossen werden können, ist es Lernenden möglich, sowohl die Oberflächenschwingung einer Kugel anhand ihrer Knotenlinien zu klassifizieren (Modell geschlossen) als auch den Zusammenhang zur Kugelflächenfunktion im 3D-Raum herzustellen (Modell geöffnet, siehe **Abb. 14.**).

Wird nun der Radialteil ebenfalls betrachtet, so kann anhand der Formeln zunächst festgestellt werden, dass $R_{\eta}^l \rightarrow 0$ für $r \rightarrow \infty$. Auch im Falle des Radialteils lassen sich die Kugelwellen anhand der Nullstellen charakterisieren, allerdings in diesem Fall nur abhängig vom Radius. Dies führt in 3D dazu, dass bei einem bestimmten Abstand vom Mittelpunkt der Kugelwelle eine Anzahl η von Knotenflächen in *Gestalt* von Knotenschalen nach demselben Prinzip wie beim Winkelanteil entsteht (siehe **Abb. 15.**).

Im Falle der Kombination des Radial- und Winkelanteils einer Kugelwelle erhält man im Modell alle möglichen Schwingungsmoden, die aus der Schrödingergleichung für radialsymmetrische Potentiale erwachsen und damit die Kugelwellenfunktion $|\Psi\rangle = |r, l, m\rangle$ für die möglichen Wellenfunktionen eines Elektrons (siehe bspw. **Abb. 16.**) in Abhängigkeit der Parameter Hauptquantenzahl n , Nebenquantenzahl l und Magnetquantenzahl m .

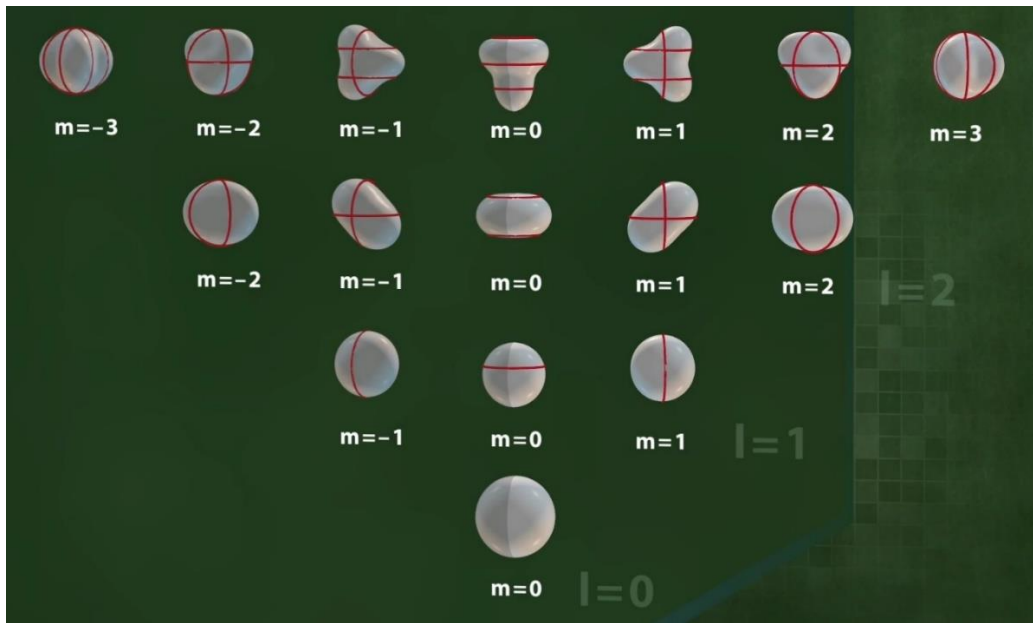


Abb. 13. Orientierte Moden für die Fälle $l = 0, 1, 2, 3$, wobei das Vorzeichen vor m die Rotationsrichtung der Knotenlinien um die festgelegte Achse angibt.³

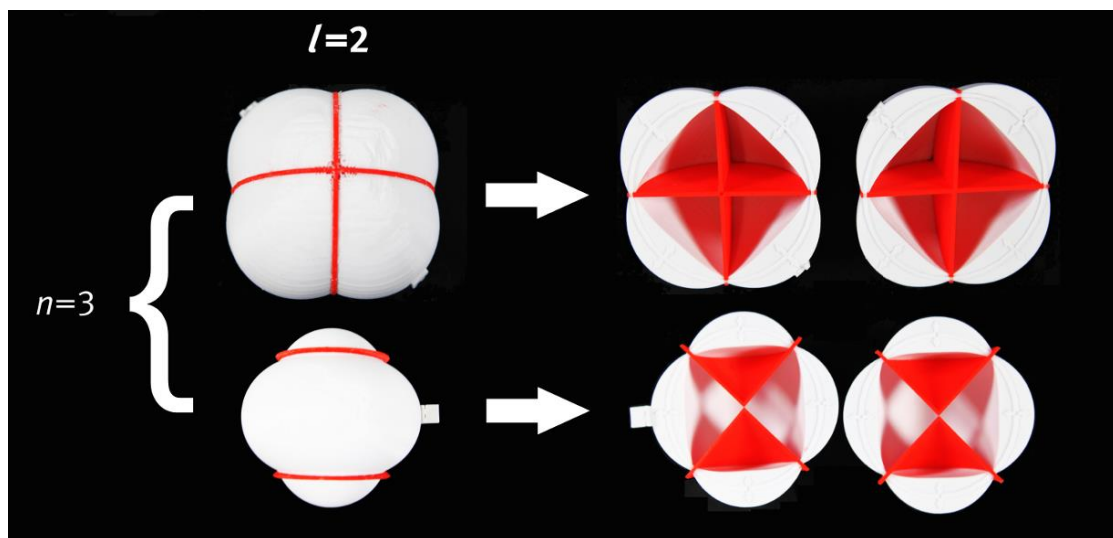


Abb. 14. Haptische Modelle der Wellenfunktionen eines Elektrons im Wasserstoffatom, die nur Knotenlinien im Radialteil haben (also $l = n - 1$). Links sind die Modelle geschlossen und die Außenseite ist zu sehen; rechts sind die Modelle geöffnet und das Innenleben wird sichtbar, wobei die roten Flächen die Knotenflächen sind. Die Schnittflächen entsprechen den Chladnischen Klangfiguren auf einer Rundplatte, die nur aus azimuthalen Knotenlinien bestehen. Die Entartung der d -Wellenfunktionen ist nur im dreidimensionalen sichtbar – die Schnitte sind in beiden Wellen Knotenlinien in einem Winkel von 90° .

³ Die Grafik stammt von quantumreflections.net (U2 5-5) und wurde mit freundlicher Genehmigung von Stefan Heusler reproduziert.

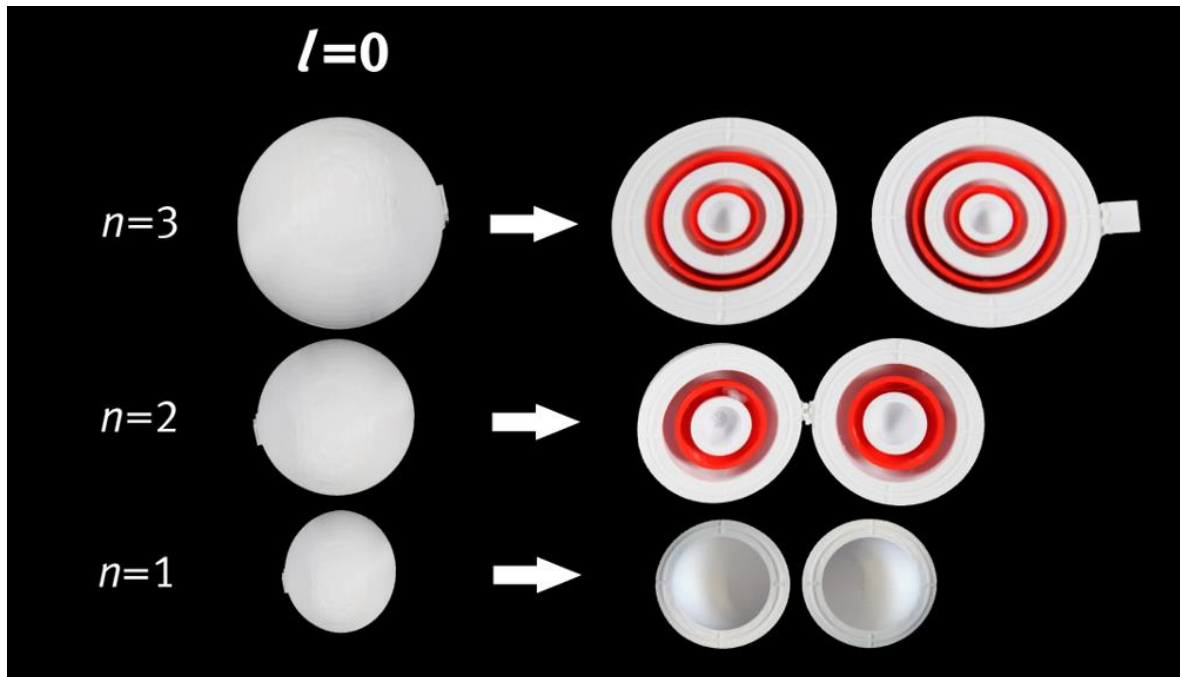


Abb. 15. Haptische Modelle der Wellenfunktionen eines Elektrons im Wasserstoffatom, die nur Knotenlinien im Radialteil haben (also $l = 0$). Links sind die Modelle geschlossen und die Außenseite ist zu sehen; rechts sind die Modelle geöffnet und das Innenleben wird sichtbar, wobei die roten Schalen die Knotenschalen sind. Die Schnittflächen entsprechen den Chladnischen Klangfiguren auf einer Rundplatte, die nur aus radialen Knotenlinien bestehen.

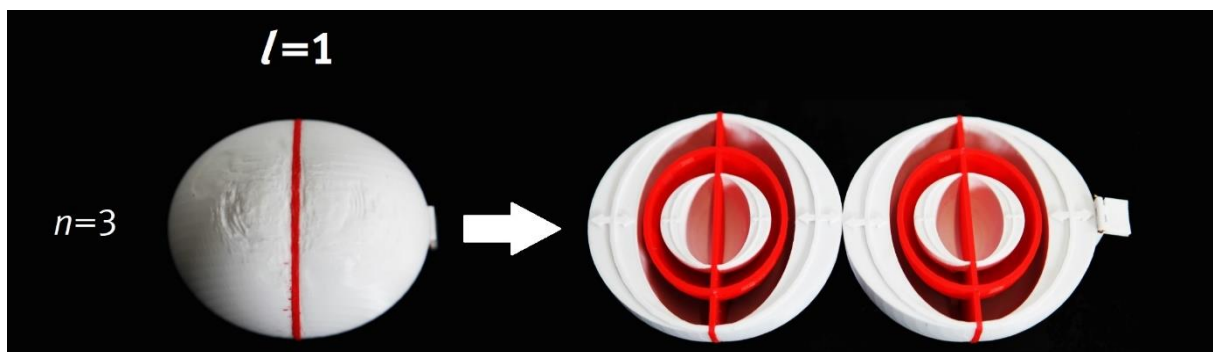


Abb. 16. Exemplarisches haptisches Modell der Wellenfunktionen eines Elektrons im Wasserstoffatom, die nur Knotenlinien im Radialteil haben (also $0 < l < n - 1$). Links ist das Modell geschlossen und die Außenseite ist zu sehen; rechts ist das Modell geöffnet und das Innenleben wird sichtbar, wobei die roten Flächen die Knotenflächen sind. Die Schnittfläche entspricht einer Chladnischen Klangfigur auf einer Rundplatte, die sowohl aus azimutalen als auch aus radialen Knotenlinien besteht.

Auch die Operation $|\cdot|^2$ kann haptisch verdeutlicht werden: Dazu benötigt werden einzig ein Luftballon und ein Stift. Die Knotenlinien der Kugelflächenfunktionen werden auf den Luftballon gezeichnet und der Luftballon wird an der jeweiligen Stelle verdreht, sodass man

aus den „Wellenfunktionen“ die „Orbitale“ erhält (siehe **Abb. 17.**). Nimmt man zum Beispiel die Wellenfunktion $|\Psi\rangle = |0,1,0\rangle$, welche aus einer einfachen Knotenfläche am Äquator besteht, so kann man diese durch Verdrehung zum entsprechenden Orbital $|\Psi|^2$ transformieren. Dabei ist anzumerken, dass dies nur mit den Kugelwellen mit $r = 0$ (keine radialen Knotenlinien) möglich ist, da radiale Knotenlinien zu radialen Leerbereichen würden.

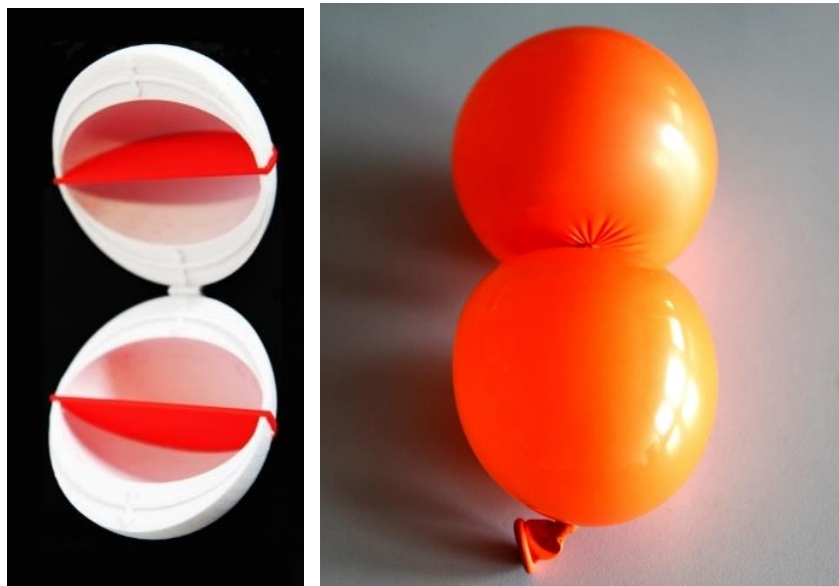


Abb. 17. Die Quadratur der Wellenfunktion (links) führt zum korrespondierenden Ballonorbital (rechts). Dabei werden die Knotenlinien auf das Zentrum der Kugel abgebildet. Diese Veranschaulichung ist möglich bei allen Ψ_{nlm} mit $l = n - 1$.

Auch anzumerken ist, dass durch Aufklappen der Modelle und Betrachtung des Querschnittes die 2D-Schwingungsmoden der Chladni'schen Klangfiguren auf einer Rundplatte wiedergefunden werden, sodass auch ersichtlich wird, wie auf qualitativer Ebene aus den stehenden Wellen in 2D die stehenden Wellen in 3D entwickelt werden können (siehe **Abb. 18.**). Nimmt man zum Beispiel die Chladni'sche Figur mit einer azimuthalen Knotenlinie, so ist diese im Schnitt der Wellenfunktion $|\Psi\rangle = |0,1,m\rangle$ zu finden. Auch erstaunlich ist es, dass die Wellenfunktionen $|\Psi\rangle = |0,2,m\rangle$ alle aus derselben Chladnifigur erwachsen, obwohl sie oberflächlich unterschiedlich zu sein scheinen: Der Chladni'schen Klangfigur mit zwei azimuthalen Knotenlinien (siehe **Abb. 19.**). Damit sind haptisch-visuelle Modelle für die Wellenfunktionen (im Realteil) und Orbitale gegeben, die genutzt werden könnten, um mentale Modellbildungen zu begünstigen.

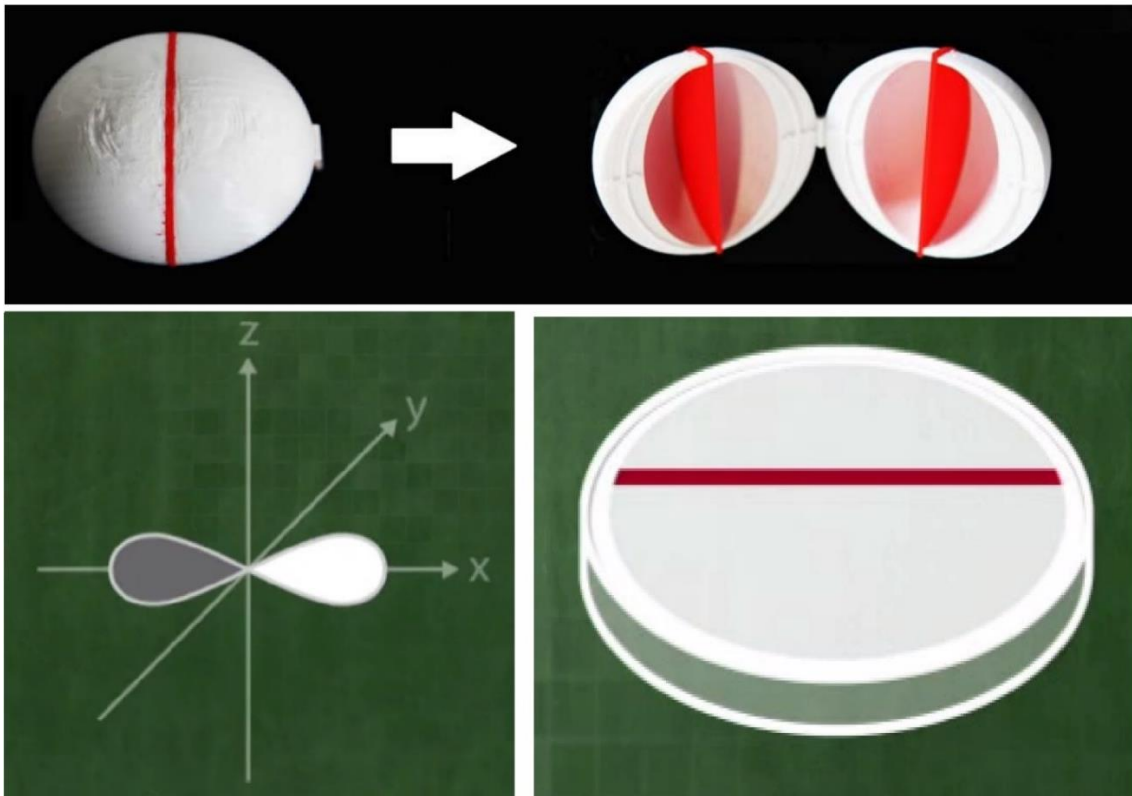


Abb. 18. Der Vergleich mehrerer Modelle im Zusammenhang mit der Elektronwellenfunktion der Parameter $|\Psi\rangle = |0,1,m\rangle$ zeigt verschiedene Darstellungen: Die 3D-gedruckte Wellenfunktion (Realteil, oben), die quadrierte Wellenfunktion (unten links) und die entsprechende Chladnische Figur (unten rechts)⁴.

4.2.2 Haptische Modelle für Spin

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, können für die Kugelflächenfunktionen Y_{lm} auf relativ simple Weise mittels 3D-gedruckter haptischer Modelle visualisiert werden. Da die Drehimpulsalgebra Repräsentationen mittels ganzzahliger und halbzahliger Spinwerte zulässt, ist die nahe Verwandtschaft von Spinzuständen und Kugelflächenfunktionen klar, allerdings fehlte aufgrund der komplexwertigen mathematischen Beschreibung eine vereinheitlichte visuelle und haptische Darstellung. Eine solche wurde daher von uns vorgeschlagen und wird folgend skizziert⁵: Dabei beschränke ich mich auf den einfachsten Fall eines Systems mit Spin $\pm 1/2$ (in Einheiten von \hbar), wobei der Zustand $|0\rangle$ dem „Spin up“ und der Zustand $|1\rangle$ dem „Spin down“ entspricht. In diesem Zusammenhang können alle reinen Spinzustände im Hilbertraum vom „Spin up“-Zustand $|0\rangle$ erreicht werden mithilfe eines unitären Operators $U \in SU(2)$ mit $U|0\rangle = z_0|0\rangle + z_1|1\rangle$, wobei für die komplexen Amplituden z_1 und z_2 gelten muss: $|z_0|^2 + |z_1|^2 = 1$. Damit bilden alle diese

⁴ Die unteren Grafiken stammen von quantumreflections.net (U2 5) und wurde mit freundlicher Genehmigung von Stefan Heusler reproduziert.

⁵ Genaueres kann z.B. bei HEUSLER & UBBEN (2018) nachgelesen werden.

Zustände in geometrischer Interpretation die Hyperkugel S_3 in vier räumlichen Dimensionen. Orbits auf dieser Hyperkugel schließen nach einer 4π -Rotation – im Gegensatz zu den 2π -Rotationen auf der dreidimensionalen Kugel S_2 . Aus dieser Beobachtung können 3D-Modelle für halbzahlige Spins abgeleitet werden, wobei im Folgenden zwei unterschiedliche vorgestellt werden, die bei genauer Betrachtung aber eng zusammenhängen.

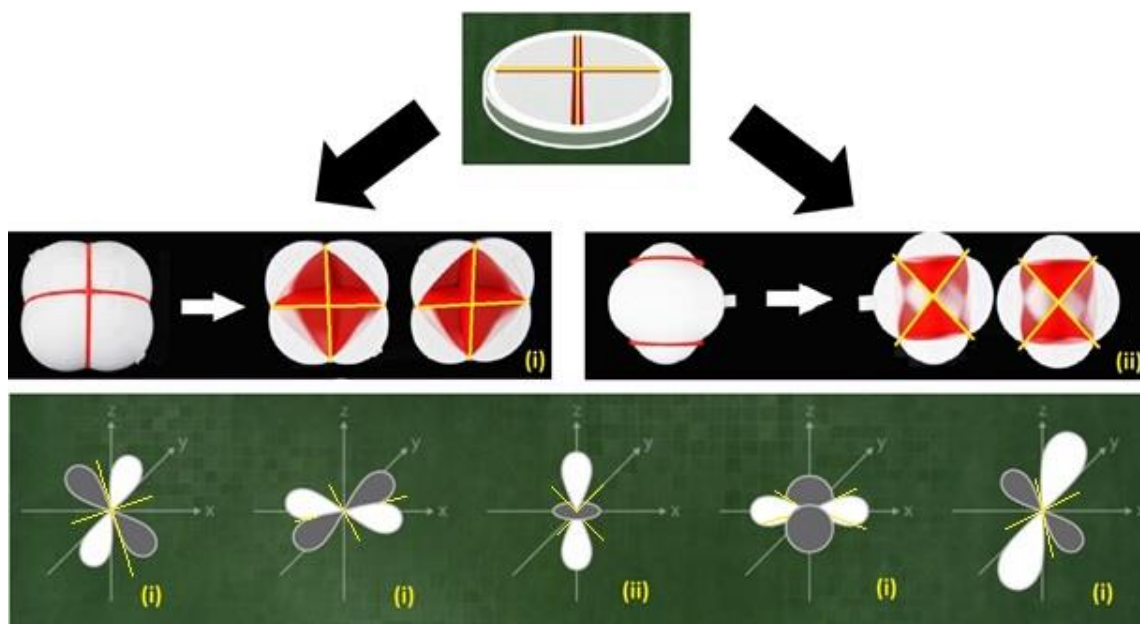


Abb. 19. Der Vergleich mehrerer Modelle im Zusammenhang mit der Elektronenwellenfunktion der Parameter $|\Psi\rangle = |0,2,m\rangle$ zeigt verschiedene Darstellungen: Die 3D-gedruckte Wellenfunktion (Realteil, mitte), die quadrierte Wellenfunktion (unten) und die entsprechende Chladnische Figur, aus denen diese erwachsen (oben).⁶

Das erste Modell ist eines ähnlich der bereits vorgestellten Modelle für die Kugelflächenfunktionen. Es werden nun jedoch die Kugelschwingungen als doppelt aufgewickelte stehende Wellen betrachtet – im Gegensatz zu den einfach aufgewickelten stehenden Wellen im Falle der Kugelflächenfunktionen. Dies bedarf einer näheren Erläuterung: Zunächst sollen nur die Schnitte durch die Kugelflächenfunktionen betrachtet werden. Die Knotenpunkte liegen auf einem Kreis, welcher auch als aufgewickelte stehende Welle betrachtet werden kann (siehe **Abb. 20.**).

⁶ Die Grafik stammt von quantumreflections.net (U2 5-5) und wurde mit freundlicher Genehmigung von Stefan Heusler reproduziert.

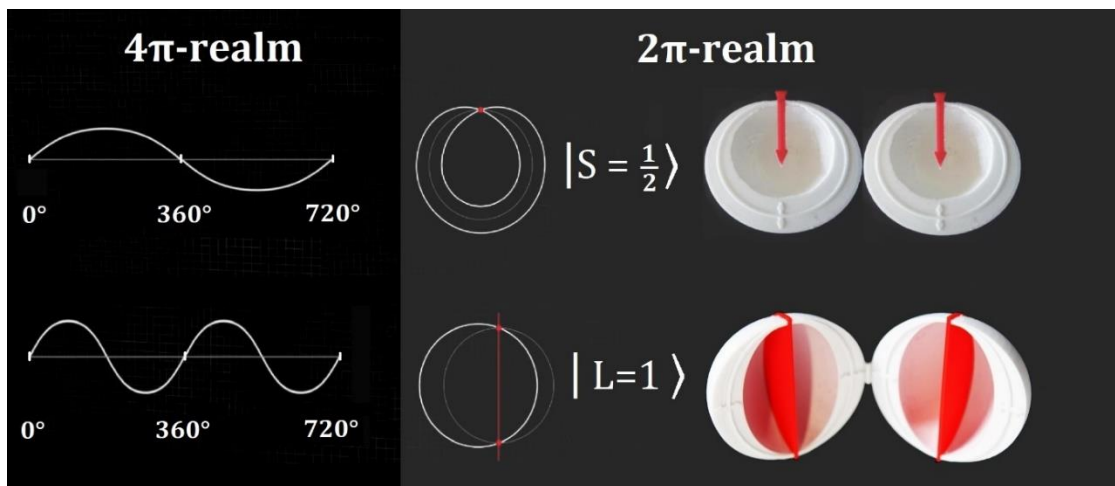


Abb. 20. Die beiden Wellenfunktionen zu Spin $\pm 1/2$ und der Kugelflächenfunktion $Y_{10}(\theta, \phi)$ auf einer S_2 -Sphäre. Dabei ist je die Wellenfunktion aus dem 4π – Bereich doppelt auf der S_2 aufgewickelt, was im Falle des Spins zu einer Knotensäule führt (roter Pfeil).

Dabei ist durch den Kreisumfang 2π die Länge der aufgewickelten stehenden Welle auf der Einheitskugel festgelegt. Dies ist allerdings in diesem Beispiel nur gültig für die S_2 . Wie bereits festgestellt, hat die S_3 aber einen Umfang von 4π , was einer Länge der aufgewickelten stehenden Welle von 4π in diesem Beispiel entspricht. Wie hängen nun aber die stehenden Wellen auf der S_2 und der S_3 zusammen? Wenn man sich eine stehende Welle auf der S_3 ansieht, so gibt es zwei „Arten“: stehende Wellen mit einer Anzahl $4n$ von Bäuchen und stehende Wellen mit einer Anzahl $4n + 2$ von Bäuchen. Wickelt man nun die stehenden Wellen mit $4n$ Bäuchen der Länge 4π doppelt auf einen 2π Kreis, so würde man dies nicht bemerken, da die Bäuche und Knoten exakt aufeinander liegen. Im Falle der $4n + 2$ Bäuche ist dies nicht der Fall; die Maxima liegen auf den Minima und jeder Punkt des Kreises hat zwei verschiedene Werte zugewiesen – mit Ausnahme der Knotenpunkte. Für den einfachen Fall mit zwei Bäuchen – welcher dem Spin $\pm 1/2$ entspricht, heißt dies, dass auf der S_2 mit dem Umfang 2π ein Knotenpunkt zu finden ist – oder, wenn man beliebige Radien zulässt, eine „Knotensäule“ (siehe **Abb. 20**). Durch diese Überlegungen erhält man ein 3D-Modell für den Spin $\pm 1/2$, wobei die Richtung des Spins von der Knotensäule weg zu dem Ort mit maximaler Amplitude zeigt.

Ein anderes haptisches Modell, welches wir vorschlagen, legt seinen Fokus auf den Übergang der S_2 zur S_3 und umgekehrt. Dabei wird eine Darstellung des Schnitts durch die S_2 im Falle des Spins $\pm 1/2$ durch ein Möbiusband dargestellt (siehe **Abb. 21**).

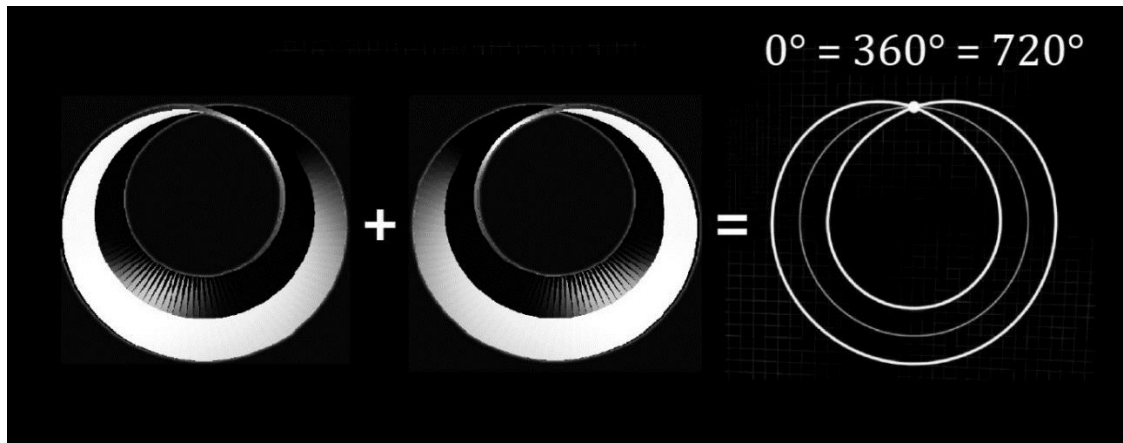


Abb. 21. Das rechtsgedrehte und linksgedrehte Möbiusband entsprechen überlagert der „Spinschwingung“.

Die Doppeldeutigkeit der Punkte auf der Kugeloberfläche wird in diesem Fall mittels der Doppeldeutigkeit des Bandes (verschiedene Orientierung nach 2π Drehung) dargestellt. Wenn nun dieses Band längs durchgeschnitten wird, so verdoppelt sich die Länge von 2π auf 4π und eine neue Repräsentation des Spins $\pm 1/2$ geht hervor in Gestalt eines Diracgürtels – eines Bandes mit vier Verdrehungen, auf dem die Doppeldeutigkeit aufgehoben ist (siehe **Abb. 22.**). Der Übergang von S_2 zur S_3 kann also einfach mittels eines Schnitts bzw. eines Zusammenklebens dargestellt werden. Auch eine Verallgemeinerung ist dabei möglich (HEUSLER & UBBEN, 2019; AVRIN, 2012).

Es muss allerdings an dieser Stelle auch betont werden, dass diese Modelle nur eine *Gestalt* bieten sollen, mittels derer eine *Funktionalität* erfassbar und greifbar gemacht werden kann. Die Modelle sind nicht gestalttreu – sie sind nur hochgradig *funktionalitätstreu*. Es ist nach wie vor nicht möglich, ein komplettes „Aussehen“ der (Spin-)Wellenfunktionen im Dreidimensionalen zu liefern, aber es ist zumindest eine Hilfestellung geleistet, bei Lernenden einen Stützpunkt aufzubauen. Aber auch wie bei allen anderen Modellen in der Physik ist es unerlässlich, dass Klarheit darüber geschaffen wird, was in der Realität die Modelle darstellen: *Funktionalitäten* – nicht *Gestalten*. Die Gestaltproblematik in der Quantenphysik wird daher aufgrund ihrer Wichtigkeit noch einmal kurz in Kapitel 4.3 in den Mittelpunkt gestellt.

4.3 Gestalttreue und die Quantenphysik

Wie bereits angesprochen, ist ein hohes Empfinden von *Gestalttreue* im Zusammenhang mit quantenphysikalischen Ideen meist eher hinderlich (siehe Kapitel 2.2 und 4.1). In diesem Unterkapitel wird daher noch einmal auf diesen Aspekt der *Gestalttreue* eingegangen werden. Dabei werden zwei unterschiedliche Ideen in den Fokus genommen: Zum einen eine topologische Beschreibung quantenphysikalischer Prinzipien, welche die Frage nach möglichen Gestaltdarstellungen im Hilbertraum aufwerfen. Zum anderen das

Korrespondenzprinzip, welches den Übergang von quantenmechanischen Beschreibungen auf klassische adressiert und somit einen Übergang quantenmechanischer *Gestalten* und *Funktionalitäten* zu klassischen *Gestalten* und *Funktionalitäten* darstellt.

4.3.1 Quantenphysikalische Gestalten: das Papierstreifenmodell

Durch die Tatsache, dass in der Quantenphysik die Objekte in einem „ 4π -realm“ beschreibbar sind, stellt sich die Frage danach, was für Gestaltdarstellungen sie dort besitzen können. Als eine Veranschaulichung kann unser Papierstreifenmodell genommen werden, in dem dieser Fall durch einen Diracgürtel dargestellt werden kann. Die abbildende Beziehung ist in **Abb. 22.** dargestellt.

Die *Gestalt* des Papierstreifens in B.) kann dabei auch durch mathematische Beschreibung geplottet werden: Dazu wird der Spin-Zustand (dargestellt ist in dieser Arbeit aus Gründen der Anschaulichkeit nur der Fall Spin $1/2$) von der S_3 in den \mathbb{R}^3 projiziert werden. Sei dafür zunächst die S_3 definiert mittels vier reeller Parameter (X, Y, Z, U) . Diese werden projiziert mittels

$$(X, Y, Z, U) \rightarrow (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \left(\frac{X}{1-U}, \frac{Y}{1-U}, \frac{Z}{1-U} \right),$$

wobei exemplarisch in diesem Fall die Parametrisierung

$$\left(\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2} - a \right)^2 + \lambda_3^2 = r^2$$

genutzt wird (vgl. HEUSLER & UBBEN, 2019b). Dadurch kann ein (p, q) – Torusknoten eingebettet in \mathbb{R}^3 parametrisiert werden durch

$$\lambda_1 = (a + r \cos(pt)) \cos(qt)$$

$$\lambda_2 = (a + r \cos(pt)) \sin(qt)$$

$$\lambda_3 = r \sin(pt).$$

Für die Beispielparameter $a = 2$; $r = 1.2$ bzw. $r = 0.8$; $p = 1$ und $q = 1$ können die *Gestalten* in **Abb. 23.** abgelesen werden. Dies ist eine der wenigen Möglichkeiten, eine sehr *funktionalitätstreue* 4D-Darstellung in \mathbb{R}^3 mittels einer *Gestalt* fassbar zu machen. Diese *Gestalt* ist aber ebenfalls nicht *gestalttreu* in Bezug auf die Realität, da nicht wirklich sichtbare Linien auf Quantenebene auftreten.

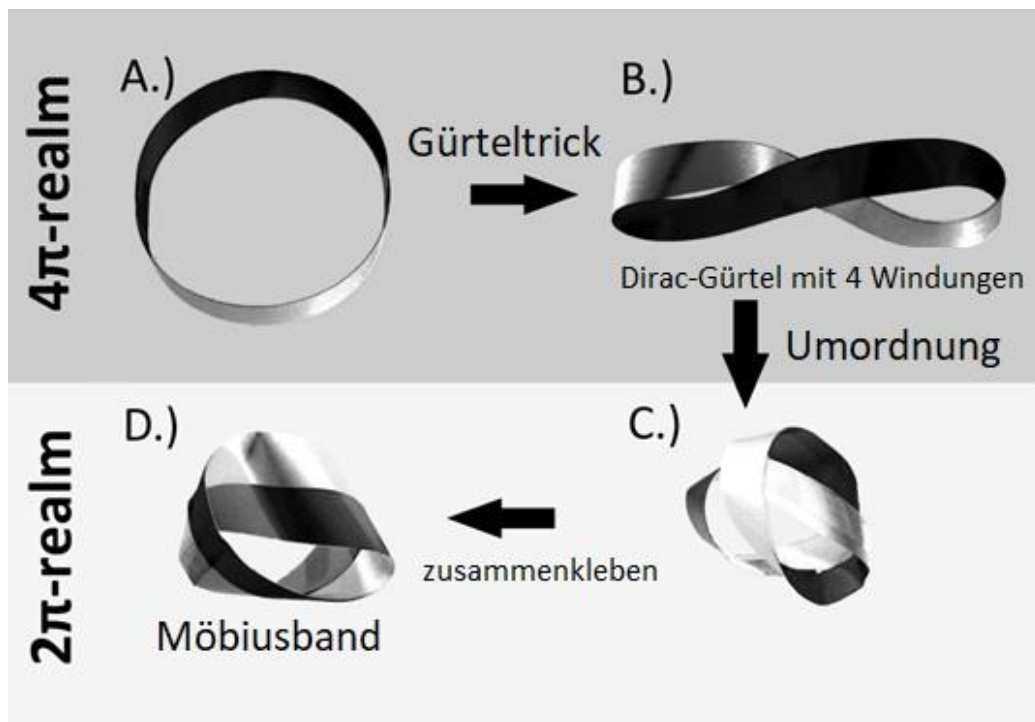


Abb. 22. Der Zusammenhang des 4π – *realms* und des 2π – *realms* dargestellt durch unser Papierstreifenmodell. Dabei ist ein Spin $\frac{1}{2}$ vertreten durch ein Möbiusband im 2π – *realm* bzw. einen Dirac-Gürtel im 4π – *realm*.

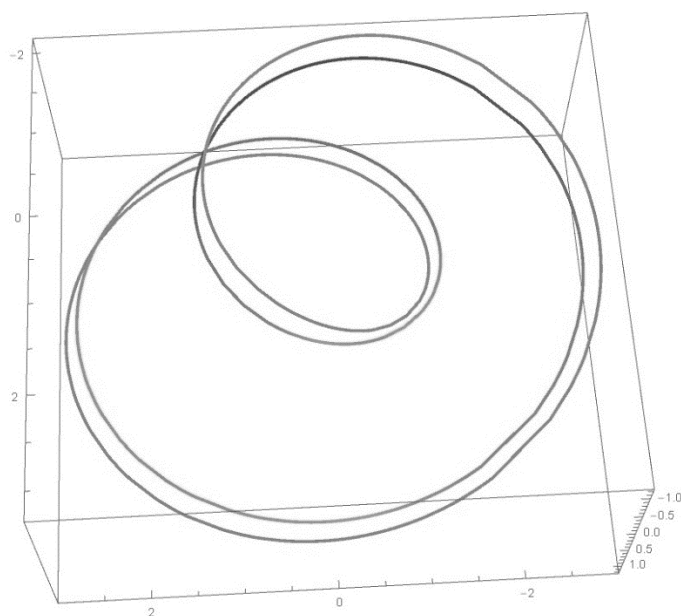


Abb. 23. Mathematischer Plot zum Dirac-Gürtel im 4π – *realm* mit den Beispielparametern $a = 2$; $r = 1.2$ und $r = 0.8$; $p = 1$ und $q = 1$.

4.3.2 Das Korrespondenzprinzip

Die klassische Newton'sche Mechanik beschreibt Regeln und *Funktionalitäten*, die uns im Alltag begegnen. Diese sind mit den *Gestalten* bzw. Objekten kodiert, die wir als Reizmuster wahrnehmen. In der Quantenphysik ist dies nicht der Fall, wie bereits im vorigen Unterkapitel erläutert wurde. Die Verbindung der klassischen Mechanik mit der Quantenmechanik und die klassische Mechanik als quantenmechanischer Grenzfall wird mittels des Korrespondenzprinzips beschrieben. Ein eindrucksvolles Beispiel, welches diesen Übergang veranschaulicht, ist das Beispiel des harmonischen Oszillatorpotentials (siehe **Abb. 24.**).

Das Potential des harmonischen Oszillators ist im eindimensionalen Fall gegeben durch

$$V(x) = \frac{k}{2} \hat{x}^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 \hat{x}^2.$$

Wird die Schrödingergleichung mittels dieses Potentials gelöst, so erhält man die Eigenfunktionen

$$|n\rangle = \frac{(\hat{a}^\dagger)^n}{\sqrt{n!}} |0\rangle,$$

wobei \hat{a}^\dagger der Erzeugungsoperator und $|0\rangle$ der energetisch niedrigste Zustand ist.

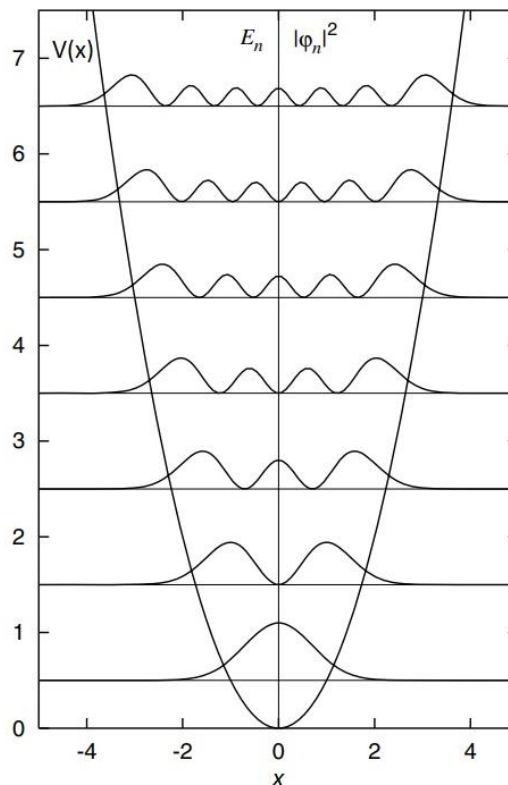


Abb. 24. Das Potential $V(x)$ des harmonischen Oszillators mit den Betragsquadraten der Wellenfunktionen φ_n und Energien E_n für kleine n . Adaptiert nach MÜNSTER (2010, S. 93).

Es sind exemplarisch einige Betragsquadrate niedrigenergetischer Wellenfunktionen in das Potential von **Abb. 24.** eingezeichnet, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten an jedem Ort x angeben. Es ist zum Beispiel zu beobachten, dass ein Pendel klassisch gesehen die geringste Aufenthaltswahrscheinlichkeit am Punkt $x = 0$ hat, da die Geschwindigkeit dort am größten ist. Für $|0\rangle$ allerdings ist an diesem Punkt die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen anzutreffen, am höchsten. Interessant wird nun aber der Grenzfall $n \rightarrow \infty$ und die damit verbundenen Wellenfunktionen, welche stellvertretend exemplarisch durch $|20\rangle$ in **Abb. 25.** dargestellt ist. Hier ist deutlich zu sehen, dass die klassische Beschreibung als Grenzfall der quantenmechanischen Beschreibung zu finden ist und die größte Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen zu finden, wieder „wie gewohnt“ in den Außenbereichen des Potentials ist.

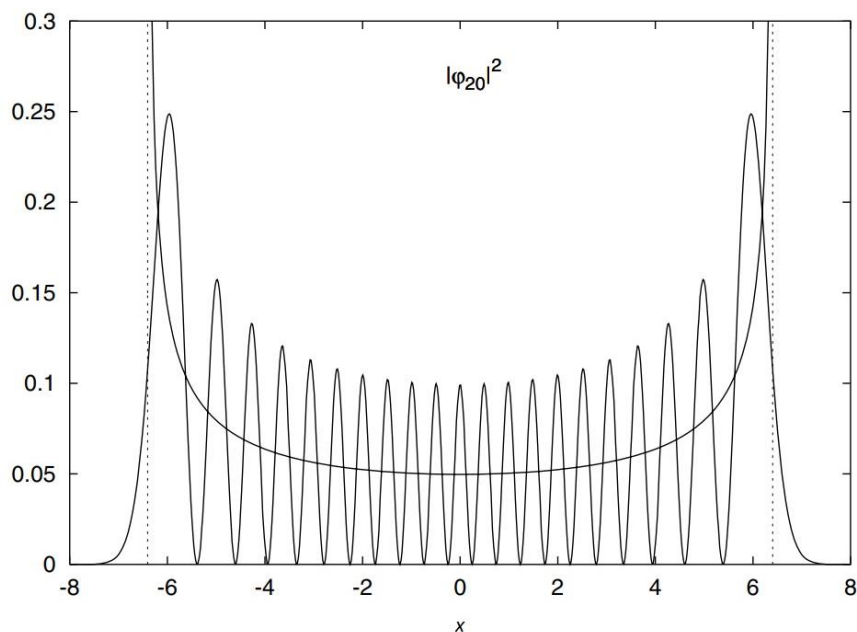


Abb. 25. Das Potential des harmonischen Oszillators mit dem Betragsquadrat der Wellenfunktion des Zustandes $|20\rangle$ exemplarisch für den Grenzfall $n \rightarrow \infty$. Adaptiert nach MÜNSTER (2010, S. 94).

Es ist somit exemplarisch gezeigt worden, dass die quantenmechanischen *Gestalten*, die aus der Mathematik erwachsen und klassischen *Gestalten* über ihre *Funktionalitäten* – ihre mathematischen Kerne – verbunden und gegeben sind. Es ist zumindest gezeigt, dass das Erstellen von sinnvollen *Gestalten* im Zusammenhang mit der Quantenphysik möglich ist und die vorgestellten Modelle und Visualisierungen, die in diesem Kapitel gezeigt wurden, potenziell dazu dienen können, anschlussfähige *Gestalten* für Lernende als Ankerpunkte darzubieten. Trotzdem muss auch hier stark darauf geachtet werden, den Lernenden keine *Gestalttreue* der Modelle zu suggerieren.

Damit kommt im Zuge dieser Arbeit der isolierte Fokus auf *mental*en Modellen der Quantenphysik im Hinblick auf *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* zum Ende und anhand der bisher gewonnenen Erkenntnisse und **Tab. 7.** werden im folgenden Kapitel Vergleiche mit

4 ATOMMODELLE UNTER BETRACHTUNG VON GESTALT- UND FUNKTIONALITÄTSTREUE

mentalen Modellen anderer Fachbereiche dargelegt, um der Frage nachzugehen, ob deren Beschreibung mittels den vier Verständnistypen ebenfalls plausibel ist.

5 Vergleich empirischer Folgerungen mit weiterer Literatur

Die empirischen Ergebnisse aus Kapitel 3 erlauben eine verallgemeinerte Sicht auf die *mental*en Modelle im Zusammenhang mit der Atomhülle: Ein großer Faktor bei der Konstruktion des Testinstrumentes war die teilweise Anlehnung an TREAGUST et al.'s (2002) Items zu Modellvorstellungen im Allgemeinen, welche eine quantitative Ergänzung der qualitativen Ergebnisse von GROSSLIGHT et al. (1991) sind. Die von uns verwendeten Items unterscheiden sich nur dahingehend von den Originalen, als dass der Begriff „Modell“ als „physikalisches Modell“ spezifiziert wurde. Daher ist es zunächst theoretisch gesprochen nicht abwegig, dass die empirischen Ergebnisse unserer Studie sich auch auf andere Forschungsgebiete wie die Didaktik der Physik allgemein, die Didaktik der Biologie oder die Didaktik der Chemie erweitern lassen. Außerdem werden einige ausgewählte Erkenntnisse der Entwicklungspsychologie und der Neurologie genutzt, um auch dort einige vergleichbare Forschungsergebnisse darzustellen. Um diese mögliche Verallgemeinerung zu untersuchen, werden theoretische Ausprägungen zu Verständnistypen *mentaler Modelle* zu einigen gängigen Konzepten dieser Fachgebiete aus den allgemeinen Charakteristika (siehe **Tab. 7.**) abgeleitet und dann mit Funden und Daten aus mehreren Studien verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in den nachfolgenden Abschnitten dokumentiert und werden anschließend zur Diskussion gestellt. Dabei wurde die Literatur in Hinblick auf die Aspekte *Gestalt* und *Funktionalität* gesichtet. Wenn eine Aussage aus der Literatur Gestaltmerkmale (sensorische Muster) ansprach, wurde sie als die *Gestaltstreue* betreffend gewertet. Darunter verstanden werden Aussagen wie „der Gegenstand ist rot“, „der Gegenstand ist nicht rund“. Wenn eine Aussage aus der Literatur Funktionalitätsmerkmale ansprach, wurde sie als die *Funktionalitätstreue* betreffend gewertet. Darunter fielen Aussagen wie „dies drückt einen Vorgang aus“, „das wandelt sich so um“, „es bewegt sich nicht...“.

Um einen möglichst umfassenden Vergleich zu ermöglichen, wurden je drei Konzepte aus der Physik und der Biologie sowie zwei Konzepte aus der Chemie stellvertretend für diese Fachbereiche gewählt. Es werden mindestens drei Beispiele aus der Literatur zu jedem Verständnistypen angeführt werden, die vergleichbar mit seinen theoretisierten Ausprägungen sind. Dadurch ist eine Diskussion der Vergleiche im Anschluss (Kapitel 6) möglich. Die Studien, welche genutzt werden, sind hauptsächlich im Forschungsgebiet der „Schülvorstellungen“ zu verorten. Außerdem werden vorwiegend Quellen angeführt, die Schülvorstellungen wörtlich wiedergeben, um eine direktere Interpretation zu ermöglichen.

Vor den Vergleichen der empirischen Modellierung mit der Literatur werden die Stufen des Modellverständnisses nach GROSSLIGHT et al. (1991), welche bereits in Kapitel 2.3 angeführt und erläutert wurden, einer näheren Betrachtung unterzogen. Dies geschieht vor allen Dingen aus dem Grund, dass die Grundideen für einige der Items unserer Studie von GROSSLIGHT et al.'s Forschungserkenntnissen herrühren.

Zunächst ist festzustellen, dass die Stufen 1, 2 und 3 nach GROSSLIGHT et al. (siehe **Tab. 8.**) in groben Zügen passgenau mit den Verständnistypen II, III und IV sind, obwohl bei

GROSSLIGHT et al. schon an früherer Stelle funktionale Aspekte thematisiert werden und die Stufen bei ihm zwingend aufeinander folgen – was durch unsere Daten allein noch nicht impliziert wird. Ein Unterschied unserer Modellierung (**Tab. 7.**) zu GROSSLIGHT et al.'s Charakterisierung ist bei diesem Vergleich das Auslassen des „Modellierers“, da die Verständnistypen I-IV nicht nur Vorstellungen von „schulischen“ physikalischen Modellen umfassen – also Modellen, die ein anderer modelliert hat – sondern zusätzlich auch die damit verbundenen Interpretationen der eigenen *mental*en Modelle.

Einzig eine „Stufe 0“ existiert bei GROSSLIGHT et al. nicht, da allen Probanden vier Exemplars für Modelle gezeigt wurden und somit vermutlich zumindest die Empfindung der *Gestalttreue* vorhanden war. Ihre Studie kann also deswegen und aufgrund der Parallelität ihrer Gesamtergebnisse als erster Hinweis darauf aufgeführt werden, dass sich die Charakteristiken der Verständnistypen I-IV nicht nur auf den Bereich der Quantenphysik beschränken und sich eventuell von I zu IV entwickeln (siehe für eine Diskussion dieser Vermutung Kapitel 6).

Auch sind starke Züge der empirisch extrahierten Typen I-III mit den theoretisch von GRECA und MOREIRA (2000, nach VOSNIADOU & ORTONY, 1989) beschriebenen Entwicklungsschritten mentaler Modelle vergleichbar:

*“For instance, from this perspective, in order to generate a mental model of how a bicycle works, we must distinguish, in the first stage (**envisioning**), the system components and their relations (wheels, pedals, chain, relation between wheel size and the chain, possible states of the wheel, etc.), and in the second (**running**), we must establish the relation in such a way that these components will start moving and, therefore, they will allow us to ride the bicycle without falling off (establishment of the conditions of static and dynamic equilibrium conditions, relation between the force applied to the pedals and the acquired speed, etc.). Only then could the subject ‘run’ the model based on causal rules.”*

(GRAECA & MOREIRA, 2000, S. 3, Hervorhebungen hinzugefügt)

Dabei kommt das *Vorstellen* einer Entwicklung von Verständnistyp I zu Typ II gleich und das *Simulieren* (*Funktionen aufprägen*) einer Entwicklung von Verständnistyp II zu Typ III. Der letzte Schritt wird in dieser Theorie noch nicht erwähnt. Zusammengefasst ergeben aber die qualitative Studie von GROSSLIGHT ET AL. (1991) und die theoretische Überlegung von GRECA und MOREIRA (2000) bzw. dem Sammelband von VOSNIADOU und ORTONY (1989) schon ähnliche Charakteristiken der vier Typisierungen vom Verständnis *mentaler Modelle*, die auch unabhängig davon von uns zuvor aus den quantitativ erhobenen Daten extrahiert wurden.

Tab. 8. Gegenüberstellung der Verständnistypen von *mentalen Modellen* nach den Typen I bis IV mit dem Modellverständnis von GROSSLIGHT et al. (1991, S. 817-818, frei übersetzt).

Modelltyp	Eigenschaften	Entsprechung bei GROSSLIGHT et al.
Typ I (-)	Es existiert kein <i>mentales Modell</i> , das über deklaratives Wissen herausgeht. Das mentale Modell hat damit keine Bedeutung, es wird weder als Abbild eines realen Phänomens in Gestalt noch in Funktion verstanden.	Keine Entsprechung
Typ II (Stufe 1)	Innerhalb dieser Stufe des Modellverständnisses wird das <i>mentale Modell</i> primär als einfache Kopie der Realität gesehen. Dabei ist der Hauptfaktor, der mit dem Modell verbunden wird, ein hoher Grad an Gestalttreue.	Innerhalb dieser Stufe des Modellverständnisses werden Modelle als Spielzeuge oder einfache Kopien der Realität gesehen. Der Zweck eines Modells für Personen auf dieser Stufe ist es, eine Kopie von Objekten oder Handlungen zu sein. Eventuelle Diskrepanzen zwischen Modell und Realität können nicht explizit gegeben werden.
Typ III (Stufe 2)	Dieser Typ des Modellverständnisses unterscheidet sich insofern von den vorherigen Typen, als dass dem Lernenden klar wird, dass das <i>mentale Modell</i> auch eine Funktion trägt, die ebenfalls im modellierten realen Phänomen selbst gefunden werden kann.	Die zweite Stufe des Modellverständnisses unterscheidet sich insofern von der Stufe 1, dass dem Lernenden klar wird, dass das Modell zu einem bestimmten Zweck konstruiert wurde. Daher spielen die Gedanken und Ideen der Modellierer eine Rolle, da diese Aspekte des Modells bewusst so darstellen, dass sie einen Zweck erfüllen. Im Zuge dessen können Modelle veränderte Abbilder der Realität sein, bei denen das Augenmerk auf bestimmte Aspekte der Realität von den Modellierern gelegt wird (z.B. durch Hervorheben, Vereinfachen, Hinzufügen von Symbolen, Verwendung verschiedener Versionen). Trotzdem liegt der Fokus hier noch auf der Realität, die modelliert wird, aber nicht auf den Ideen, die dargestellt werden. Tests des Modells werden so interpretiert, dass das Modell und nicht die Idee dahinter getestet wird.

<p>Typ IV (Stufe 3)</p>	<p>Der letzte Typ des Verständnisses eines <i>mentalen Modells</i> ist primär die Sicht, dass das Modell abstrakte Ideen (Funktionalität) repräsentiert. Die Gestalttreue ist dabei kein wichtiger Teil des mentalen Modells mehr. Dadurch ist solch ein mentales Modell eines, welches die Funktionalität eines Phänomens beschreibt.</p>	<p>Die letzte Stufe des Modellverständnisses ist schließlich charakterisiert durch drei Aspekte:</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) Modelle repräsentieren abstrakte Ideen und diese können durch das Modell getestet werden. Modelle stellen keine Kopien der [Gestalt der] Realität dar. (2) Der Modellierende erstellt das Modell zu einem bestimmten Zweck und wählt dabei aus verschiedenen Designs aus, um das zu finden, was die Idee des Modells wiedergibt. (3) Das Modell kann angepasst werden um neue Ideen zu generieren, welche in neuen Modellen [oder angepassten Modellen] ausgedrückt werden. Dadurch geben Modelle Informationen durch einen konstruktiven Kreisprozess.
------------------------------------	--	--

Im Rahmen dieser Überlegungen wird im Folgenden argumentiert, dass mittels der aus der empirischen Untersuchung entstandenen Modellierung ein zusammenfassender Beschreibungsuntergrund gefunden werden kann, mithilfe dessen Problematiken während des Lernprozesses gezielter adressiert und eventuell behoben werden können. Es muss bei der Betrachtung der jeweiligen Studien aber immer im Hinterkopf gehalten werden, dass die Fragestellungen, unter denen die jeweiligen Studien durchgeführt wurden, einen Einfluss auf die Antworten der Lernenden haben. So ist es beispielsweise nicht verwunderlich, wenn die Antwort auf eine Frage nach „Struktur“ z.B. die Charakteristiken eines Verständnistyps II zeigt. Die Literatur der Quantenphysik wurde schon zusammengefasst (siehe Kapitel 2.1), allerdings sollen auch in diesem Fall die Kernprobleme noch einmal unter dem Licht der Beschreibung durch die Verständnisaspekte *Funktionalitätstreue* und *Gestalttreue* betrachtet werden.

5.1 Vorstellungen in der Physik

Nicht nur in der Quantenphysik sind die Charakteristiken der Verständnistypen I-IV zu finden, auch in der Physik im Allgemeinen gibt es zahlreiche Beispiele, in denen sich die Aspekte der Verständnistypen in vergleichbarer Form lokalisieren lassen. Im Folgenden werden zusätzlich zur *Atomhülle* daher exemplarisch zwei weitere Konzepte (*Licht* und *Felder*) der Physik daraufhin untersucht, wie sich die Verständnisse von *mental*en Modellen nach unserer Typentheorie manifestieren würden und diese mit Forschungen verglichen. Auch aus dem Bereich der Thermodynamik ließen sich aufschlussreiche Beispiele anführen, jedoch ergeben sich in vielen Fällen Überschneidungen mit Befunden aus der Chemiedidaktik (siehe dazu Kapitel 5.2). Vor allem die Modellierung mittels eines idealen Gases wird dabei häufig mit einem Teilchenmodell in Verbindung gebracht und wird daher im physikalischen Teil nicht betrachtet.

5.1.1 Vorstellungen der Quantenphysik

Wie in Kapitel 2.1 bereits dargelegt, ist die Schwierigkeit bei der Entwicklung *mentaler Modelle* von klassischer Physik zur Quantenphysik vielfältig nachgewiesen worden. In diesem Sinne werden die dort aufgeführten Studien in ausgewählten Teilen noch einmal mit dem nicht-entwickelten Typ (Verständnistyp I), dem Architekturmodell-Typ (Verständnistyp II), dem dualen-Typ (Verständnistyp III) und dem Funktionaltyp (Verständnistyp IV) beschrieben werden. In der **Tab. 9** können zu jedem der Typen beispielhafte vergleichbare Fälle herausgelesen werden.

Zu Beginn des Lernprozesses steht keine Vorstellung von der Atomhülle. In solchen Fällen werden Atome oft als kleine Teilchen gesehen, die nicht weiter auflösbar sind. Elektronen sind dabei nicht als Konstituenten der Atomhülle bekannt und das Atom ist nur eine feste Kugel (siehe z.B. GRIFFITHS & PRESTON, 1992 oder HARRISON & TREAGUST, 1996) oder die Atomhülle ist nur mathematisch beschrieben - ohne konzeptuelles Verständnis (JOHNSTON et al., 1998).

Es ist festzuhalten, dass die ersten *mentalen Modelle*, welche sich im Zusammenhang mit dem Atom entwickeln, scheinbar rein statischer Natur und hauptsächlich Träger von *Gestalt* sind. Dabei sind Modelle anzuführen wie solche, die Atome als Kugeln sehen (siehe z.B. GRIFFITHS & PRESTON, 1992 oder HARRISON & TREAGUST, 1996), wobei fortgeschrittenere Varianten auch in die Kugel eingebettete statische Elektronen enthalten (siehe z.B. PARK & LIGHT, 2009; PARK, 2006; PAPAGEORGIOU, MARKOS & ZARKADIS, 2016; COKELEZ & DUMON, 2005; COKELEZ, 2012).

Tab. 9. Hergeleitete Verständnistypen *mentaler Modelle* zur *Atomhülle* nach dem Schema 3.9, zusammen mit vergleichbaren Entsprechungen in der Literatur.

Modelltyp	Theoretisches Modell	Exemplarische Literatur
Verständnistyp I (nicht-entwickelter Typ)	Die <i>Atomhülle</i> ist als solche nicht bekannt. Es existiert keine (ausgereiften) Vorstellung von der Atomhülle oder ihren Aspekten, außer, dass eventuell deklaratives Wissen genannt wird.	DONOVAN & HAEUSLER (2015); KNOTE (1975); JOHNSTON et al. (1998)
Verständnistyp II (Architekturmodell-Typ)	Die <i>Atomhülle</i> wird primär anhand von ihrer Gestalt charakterisiert (z.B. Schalen). Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein.	KAWALKAR & VIJAPURKAR (2009); CHARLET-BREHELIN (1998); HARRISON & TREAGUST (1996)
Verständnistyp III (dualer Typ)	Die <i>Atomhülle</i> wird anhand von ihrer Gestalt und ihrer Funktionalität charakterisiert. Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein (z.B. da Atom als kleines Planetensystem).	KE et al. (2005); BORMANN (1986); PETRI & NIEDERRER (1998)
Verständnistyp IV (funktionaler Typ)	Die <i>Atomhülle</i> wird rein funktional gesehen. Die <i>Atome</i> werden mittels ihrer Funktionalität beschrieben. Die Gestalt wird als irrelevant gesehen.	DANGUR et al. (2014); ZARKADIS et al. (2017); PAPAPHOTIS & TSARPALIS (2008)

Erst mit der Einführung des Atoms als „Planetensystem“ kommt meist eine dynamische, funktionale Komponente in die Modellvorstellung hinein, indem die Elektronen als im Atom beweglich angesehen werden. Zumeist wird die letzte Stufe des statischen Modells – die Version mit Elektronen in einer oder um eine positiv geladene Kugel – als „Thomson’sches Modell“ betitelt, was allerdings nicht ganz zutreffend ist: Schon Thomson stellte sich Elektronen als beweglich vor (THOMSON, 1903 und Kapitel 4.1).

Nichtsdestotrotz ist die erste tiefere Verständnisversion eines *mentalen Modells* zum Atom eine Version, die vergleichbar mit dem Architekturmodelltyp ist. *Mentale Modelle* interpretiert mit den Charakteristiken des Verständnistyps II finden sich sowohl im Zusammenhang mit dem Bohrschen Modell als auch mit dem Orbitalmodell. Zum Beispiel ist ein extremer Fall hiervon, dass die Umlaufbahn des Elektrons als rein gestaltlich aufgefasst wird – also als Kreis. Diese stark gestaltorientierte Aussage findet sich auch allgemeiner im Zusammenhang mit *mentalen Modellen* zum Sonnensystem zum Beispiel bei KAWALKAR und VIJAPURKAR (2009). Sie fragten junge Schüler (7. Klasse) nach Analogien für das Aussehen einer Zelle

und die Schüler zählten runde Objekte auf – darunter das Planetensystem, was die Autoren scheinbar ungläubig mit einem Ausrufezeichen markierten (KAWALKAR & VIJAPURKAR, 2009, S. 191). Es ist daher nicht unwahrscheinlich, dass dieses Verständnis auch beim Bohrschen Modell existiert.

Eine andere Art des *mental*en Modells zur Atomhülle ist die *electron suite*-Vorstellung, bei der ein positiv geladener Nukleus umringt von gleichvielen negativen Elektronen statisch vorgestellt wird (COKELEZ & DUMON, 2005). Aber nicht nur im Zusammenhang mit planetensystemähnlichen *mental*en Modellen gibt es Interpretationen vergleichbar mit einem Typ II. HARRISON und TREAGUST (1996) fanden diese Interpretation auch beim Orbitalmodell: Probanden gaben an, dass die Orbitale eine Art Material sind, in dem eingebettet sich Elektronen aufhalten. Die hohe *Gestalttreue* und geringe *Funktionalitätstreue* ist also auch beim Orbitalmodell zu finden und nicht nur auf das Planetenmodell passend. Architekturmodellverständnisse sind also in der Tat häufig bei der Entwicklung von Vorstellungen zur Atomhülle zu finden. Auch zu erwähnen ist, dass die Planetenbahn nicht unbedingt dem Verständnistyp III oder IV eines *mental*en Modells entsprechen muss. Aufgrund der Erkenntnis von zum Beispiel KAWALKAR und VIJAPURKAR (2009) ist nicht mehr immer sicher, dass der dynamische Charakter des Planetenmodells als wichtig oder überhaupt verstanden wird. Allgemein ist somit auch zu sagen, dass selbst bei dynamischen Aspekten *mentaler Modelle* nicht zwingend auf eine hohe Ausprägung der Funktionalitätstreue im Zusammenhang mit dem Modell geschlossen werden kann.

Als erstes und mitunter prominentestes Beispiel für einen dualen Typ (Verständnistyp III) ist der Schüler „Carl“ aus der Studie von PETRI und NIEDDERER (1998) zu nennen, bei dem die Entwicklung *mentaler Modelle* für das Konzept des Atoms in großer Detailliertheit dokumentiert wurde. Dabei scheint der Schüler mit einem Modelltyp zu starten, der zwar ein dualer Typ ist, aber als *mentales Modell* ein Bohrsches Modell beschreibt, welches das fortgeschrittenste Modell ist, welches er vom Atom kennt. Dieses *mentale Modell* und seine Interpretation hält sich stark, auch als sich im Verlauf des Unterrichts aus diesem Modell schließlich das Orbitalmodell bildet. Am Ende der Studie reflektiert Carl über seine *mental*en Modelle und gibt an, sich das Bohrsche Modell primär vorzustellen, da es einfach und leicht vorstellbar ist und sich außerdem an der ihm bekannten Physik orientiert. Auch gibt er allerdings an, dass das Orbitalmodell das ist, welches die *Funktionalität* des Atoms besser beschreibt und führt als Charakteristiken für ein Elektron nicht mehr das Aussehen an, sondern betont Verhaltensweisen. Auch gibt Carl an, dass beide plausibel sind, das Bohrsche Modell, weil es anschaulich ist wie etwas, was er aus dem Alltag kennt und das Orbitalmodell, weil er angibt, die Herleitung verstanden zu haben und er die höhere Erklärmächtigkeit schätzt. Die Studie zu Carls Modellverständnis scheint durch die Modellierung *mentaler Modelle* anhand von *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* und in diesem Sinne mittels des dualen Verständnistyps zunächst erstaunlich gut beschreibbar zu sein. Als Hauptgrund dafür, dass Carl das Orbitalmodell überhaupt akzeptierte, ist angeführt, dass die Unschärferelation ihn das Bohrsche Modell als nicht mehr akkurat genug erscheinen ließ. Dadurch entwickeln sich am Ende sogar zwei *mentale Modelle*, eines, welches nach dem Typ II oder III verstanden wird (Bohr) und eines, welches nach dem Typ IV interpretiert wird (Orbital).

Das Verständnis, dass *mentale Modelle* *funktionalitätstreu* und *gestalttreu* sind (Typ III) wurde auch in der Studie von KE et al. (2005) gefunden. Nicht nur wurden in den von ihnen

durchgeführten Interviews mehrere Modelle verwendet, sondern es gab auch Probanden, welche noch keinen Quantenphysikunterricht hatten (z.B. Proband U1-01), die stark klassisch geprägt waren und deren *mentale Modelle* der Atomhülle primär aus sich bewegenden Kugelektronen bestanden. Dies scheint ähnlich wie die frühe Entwicklungsstufe des *mental Modells* von PERTRI und NIEDERRERS (1998) Carl zu sein, bevor er Quantenphysikunterricht hatte. Bereits bei BAYER (1986) findet sich die Elektronenbahn und die *Funktionalitätstreue* wird in einem Beispiel sogar schon von der Wahrscheinlichkeitsinterpretation beeinflusst: Ein Proband unternimmt dabei vermutlich den Versuch, sein *mentales Modell* funktionalitätstreuer zu machen, da er denkt, die Beschreibung des Elektrons in der Atomhülle werde so genauer:

„S[chüler]: Am besten kann ich mir das halt so vorstellen, dass halt Elektronen, wobei ich mir da im Moment noch Kügelchen drunter vorstelle, aber das ist auch so ne‘ Sache, die ich danach nochmal definieren möchte, die Elektronen kreisen halt um den Atomkern herum innerhalb der Schale eben, wobei sie immer verschiedene Positionen einnehmen können, die man halt nicht bestimmen kann.“

(BAYER, 1986, S. 251)

Dabei ist auch zu sehen, dass die *Gestalttreue* des angesprochenen *mental Modells* in gewissem Rahmen schon angezweifelt wird und vermutlich nicht mehr so stark ausgeprägt ist, wie bei anderen Lernenden. Er stimmt aber auch noch gestalttreuen Aussagen zu:

„Elektronen schwingen auf ihren Umlaufbahnen auf und ab. Aus der Überlagerung der Umlaufbewegung und der senkrecht zur Bahn erfolgenden Schwingungsbewegung ergibt sich das Bild einer stehenden Welle.“

(BAYER, 1986, S. 251)

Eine funktionale und abstrakte Beschreibung der Atomhülle – ein mentales Modellverständnis des Typs IV - wird von den meisten Forschern als Desiderat angesehen. So schreiben zum Beispiel ZARKADIS, PAPAGEORGIU und STAMOVLASIS (2017) über die Entwicklung des Verständnistypen IV eines *mental Modells* im Zusammenhang mit der Atomhülle:

„The most sophisticated and abstract student models are those that take into account quantum theory and look into the atomic structure through a probabilistic logic.“

(ZARKADIS, PAPAGEORGIU & STAMOVLASIS, 2017, S. 894)

Auch DANGUR, AVAGIL, PESKIN und DORI (2014) vertreten ebenfalls die Ansicht, dass das Erlernen von abstrakten (funktionalen) Konzepten das Ziel der quantenchemischen Bildung ist und die Auffassungen, dass *Gestalttreue* dabei Probleme verursacht:

„One of the most prevalent reported obstacles is the difficulty in understanding abstract concepts. Students in middle and high school tend to depict atoms and molecules as discrete and concrete structures.“

(DANGUR, AVAGIL, PESKIN & DORI, 2014, S. 298)

Sie advozieren jedoch auch für einen Unterricht, der durch Visualisierungen unterstützt ist – zählen also die Gestaltbildung zu einem wichtigen Schritt bei der Bildung *mentaler Modelle*.

Auch PAPAPHOTIS und TSARPALIS (2008) haben ein Verständnis ihrer *mentalen Modelle* zur Quantenchemie, welches vergleichbar mit dem Verständnistypen IV ist und welches sie durch das Kriterium verschieden komplexer Funktionalität (Abstraktheit) charakterisieren:

„*The concepts and processes of quantum chemistry are abstract and complex, so learning them is difficult without a thorough understanding of the subject, without meaningful learning. [...] Evidence of meaningful learning occurs when tests of comprehension are presented in a somewhat different context from that originally encountered[...]*.“

(PAPAPHOTIS & TSARPALIS, 2008, S. 329)

Ein teils problematischer Faktor beim Erlernen der Quantenphysik scheint die reine Anwendung der Mathematik zu sein, was unter anderem eine Charakteristik des Verständnisses eines *mentalen Modells* vom Verständnistyp I darstellt. Viele Studien haben Ergebnisse erzielt, in denen die Mathematik als losgelöst vom Konzeptverständnis (JOHNSTON, CRAWFORD, & FLETCHER, 1998; REIF, 1995; REIF & ALLEN, 1992) kritisiert wird. Es ist in diesem Zusammenhang möglich, dass die Quantenphysik an dieser Stelle aus nicht-entwickelten mentalen Modellverständnissen besteht. Zwar können mathematische Formeln und Rechnungen genutzt werden, um gewisse Problemstellungen zu lösen; es bleibt aber in vielen dieser Fälle fraglich, ob die Probanden verstehen, was sie genau beschreiben – weder wie diese Dinge aussehen (in der Quantenphysik generell ein fraglicher Aspekt) noch wie sie sich verhalten (REIF, 1995; REIF & ALLEN, 1992). In diesem Sinne kommen die Lernenden oft allein unter Verwendung der Mathematik ohne Kontexte nicht zum Verständnis eines Typs II bis IV ihrer *mentalen Modelle*, die somit keinen ersichtlichen Bezug zur durch die Quantenmechanik modellierten Welt haben.

Paradoxerweise ist die Mathematik aber gleichzeitig – wenn sie richtig mit den Phänomenen verknüpft wird, die sie beschreibt, eine Form des funktionalen Typs IV eines *mentalen Modells*: Die Funktionen, die durch die Mathematik ausgedrückt werden, sind an sich sehr klar und präzise Beschreibungen auf einer abstrakten (gering *gestalttreuen*) Ebene. Auch besitzen zum Beispiel Formeln selbst eine offensichtlich niedrige *Gestalttreue*. Die Problematik, dass die Mathematik ein Charakterzug sowohl des nicht entwickelten Typs (Typ I) als auch des funktionalen Typs (Typ IV) sein kann, findet sich auch bei vielen anderen Fällen beim Lernen wissenschaftlicher Konzepte wieder (siehe auch Kapitel 5.2 und 5.3). Damit ist das Beherrschen von Mathematik kein eindeutiges Indiz für tiefgreifendes Konzeptverständnis (Typ IV).

In nahezu jedem in dieser Arbeit betrachteten Artikel zu *mentalen Modellen* in der Atomphysik finden sich Aussagen, die alle auf ein rein funktionales, abstraktes Verständnis der Atomhülle verweisen, welches nach den Expertenmeinungen beim Lernenden zu erreichen ist. Dies ist daher nicht extra mit Einzelfällen belegt, da ich es nach Sichtung der Literatur als fundamental bewerte. Es wird in den folgenden Kapiteln deutlich, dass dies nicht nur im Zusammenhang mit dem Erlernen von Quantenphysik der Fall ist.

5.1.2 Vorstellungen zum Licht

Im Zusammenhang mit der Ausbreitung von Licht ist ein häufig in der Literatur angeführter konzeptueller Ansatz der Beschreibung von Lichtausbreitung eine mittels Vektoren. Aufgrund der zu hohen formalen Komplexität wird sich jedoch häufig auf eine eher qualitative Beschreibung reduziert: Das Konzept der Lichtausbreitung mittels eines *Lichtstrahls*. Nicht nur ist diese Beschreibung eine historisch gesehen früh erwachsene (NEWTON, 1672), sondern auch anschlussfähig in der Wellenoptik mittels der Interpretation als Ausbreitungsvektor \vec{k} . Doch eine Beschreibung von Lichtausbreitung mittels geometrischer Strahlen ist ein großes Hindernis für Lernende (vgl. für eine Übersicht über die betreffende Literatur z.B. SCHECKER, WILHELM, HOPF & DUIT, 2018). Bei der Konzeptentwicklung von Ausbreitungsbeschreibungen für Licht sind dabei vergleichbare Fälle zu den von uns gefundenen verschiedenen Verständnistypen *mentaler Modelle* zu finden: In **Tab. 10.** sind exemplarisch einige Studien aufgeführt, die vergleichbar mit den zunächst theoretisch hergeleiteten Verständnistypen *mentaler Modelle* sind.

Es findet sich die Charakteristik des Verständnistyps I im Zusammenhang mit dem Lichtstrahl relativ häufig: Zu Beginn des Lernprozesses, wenn Licht meist nur aus dem Alltag bekannt ist, haben Lernende oft keine Vorstellung von Lichtausbreitung. Zum Beispiel stellen GUESNE, SERE und TIBERGHIE (1983) heraus, dass einige Lernende angaben, dass Licht einfach da ist. Sie führten eine Studie mit Interviews und Fragebögen durch, wobei sie unter anderem auch die Vorstellung aufdeckten, dass Licht nur dort ist, wo man einen Lichtfleck auf einer Oberfläche sieht. Diese sehr frühe Vorstellung von Licht als etwas, das einfach da ist und sich nicht ausbreitet, wird auch von STEAD und OSBORN (1980) im Laufe einer neuseeländischen Interviewstudie festgestellt. Auch in Bezug auf Farben können ähnlich aufgefasste Interpretationen *mentaler Modelle* festgestellt werden: Lernende geben in einer Studie von EATON, HARDING und ANDERSON (1985) an, dass Farben einfache Eigenschaften von Objekten seien und Lichtausbreitung somit beim Farbsehen keine Rolle spielt.

Eine Vorstellung mit Zügen eines Verständnistyps II - dass Licht materiell ist und z.B. aus realen statischen Strahlen besteht - wurde unter anderem von GALILI (1996) festgestellt. Später verwendete er zusammen mit einem Kollegen diese Erkenntnis während der Konstruktion eines Testinstrumentes (GALILI und HAZAN, 2000) und sie stellen in einer Erhebung mittels dieses Instrumentes erneut fest, dass Lernende unter anderem Lichtstrahlen als primär *gestalttreue* Objekte verstehen. Als Beispiel übernahmen sie dabei den Vergleich von Lichtstrahlen mit optischen Faserkabeln. Zusätzlich legen sie dar, dass Lernende Lichtstrahlen als Materie und nicht als funktional sehen:

„Light rays are often assimilated as a ‘matter based’, reified concept, instead of as a ‘process based’ one.“

(GALILI & HAZAN, 2000, S. 80)

Tab. 10. Deutungstypen von Lernenden in Bezug auf ihre *mentalen Modelle* von *Licht* mit Beispielen aus der Literatur zu Schülervorstellungen in der Physik.

Modelltyp	Theoretisches Modell	Exemplarische Literatur
Verständnistyp I (nicht-entwickelter Typ)	Die Vorstellung von <i>Licht</i> (<i>ausbreitung</i>) ist als solche nicht bekannt. Es existiert keine ausgereifte Vorstellung, außer, dass eventuell deklaratives Wissen genannt wird.	GUESNE, SERE & TIBERGHEN (1983); STEAD & OSBORNE (1980); EATON, HARDING & ANDERSON (1985)
Verständnistyp II (Architekturmodell-Typ)	Das <i>Licht</i> (z.B. Lichtstrahl) wird primär nur als Objekt gesehen, dessen Gestalt durch gewisse Merkmale charakterisiert ist. Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein.	HUBBER (2006); GALILI & HAZAN (2000); GALILI (1996)
Verständnistyp III (dualer Typ)	Das <i>Licht</i> wird als Objekt gesehen, dessen Gestalt durch gewisse Merkmale charakterisiert ist (z.B. Strahlen). Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein. Zusätzlich werden dem Licht verschiedene Funktionen zugeschrieben (Reflexion, Informationsübertrag, Ausbreitungsgeschwindigkeit, ...).	DJANETTE & FOUAD (2014); GOLDBERG & DERMOTT (1986); GALILI (1996)
Verständnistyp IV (funktionaler Typ)	Das <i>Licht</i> wird als abstrakt gesehen. Dabei bündelt es einen Satz von Funktionen, die zusammen <i>Licht</i> ausmachen. Gestaltaspekte sind nicht mehr wichtig.	GALILI & HAZAN (2000); GOLDBERG & McDERMOTT (1986); HEYWOOD (2005)

Auch HUBBER (2006) befasst sich mit *mentalen Modellen* und deren Interpretation im Zusammenhang mit der Ausbreitung von Licht. Er führt in Anlehnung an die Studie von GROSSLIGHT et al. (1991) eine Befragung mittels Interviews zum Modellverständnis des Lichts durch, bei der er auch GROSSLIGHTS et al.'s Stufe 1 des Modellverständnisses findet: Lichtstrahlen seien physische Objekte, aus denen Licht besteht.

Bei Verständnissen mit Ähnlichkeiten zum Verständnistyp II *mentaler Modelle* eines Lichtstrahls werden sehr häufig auch schon Ansätze funktionaler Aspekte festgestellt. Der Großteil der Studien zu *mentalen Modellen* von Lichtstrahlen führt diesen funktionalen Teil mit an. Eigenschaften ähnlich eines Verständnistyp III sind somit sehr viel besser dokumentiert als ein Modellverständnis, das primär gestaltorientiert ist. Ein Beispiel für diese Art des *mentalen Modells* geben zum Beispiel DJANETTE und FOUAD (2014): Eine Aussage, die sie in ihrer Veröffentlichung anführen ist eine ballistische Vorstellung von Lichtstrahlen:

„[T]he source of light gives the speed to the light rays.“

(DJANETTE & FOUAD, 2014, S. 586)

Damit werden in dieser Vorstellung die Lichtstrahlen aus einer Lichtquelle heraus beschleunigt. Auch in den Interviews von GOLDBERG und DERMOTT (1986) werden in einem dokumentierten Fall Lichtstrahlen mittels Eigenschaften ähnlich einer *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* klassifiziert:

„I[nterviewer]: Can you explain your reasoning?

S[tudent]: The lens has the effect of bending the light rays, or actually just moves them towards each other, so that they cross at a point, which ends up flipping the image over and turning it backwards.

I[nterviewer]: And what happens without the lens?

S[tudent]: Without the lens the rays just follow a normal straight path.“

(GOLDBERG & DERMOTT, 1986, S. 110)

Die Aussage stellt sowohl dar, dass Lichtstrahlen in gewissem Rahmen als Objekte betrachtet werden, befasst sich aber auch damit, was diese „Objekte“ tun oder was mit ihnen gemacht werden kann – es sei aber darauf hingewiesen, dass die Antworten auch von der Fragestellung abhängen.

GALILI (1996) stellt ebenfalls dar, dass in seinen Studien die Probanden Licht als Objekte verstehen, die gewisse Dinge tun - wie zum Beispiel Informationen transportieren oder durch optische Elemente gebogen werden. Dabei betont er auch eine typische Entwicklung von *mental*en Modellen des Lichts von „statischem Licht“ zu „dynamischem Licht“, wobei er nur das dynamische Licht als *ray* bezeichnet:

„Students' knowledge regarding a light source [...] could often be represented as evolving from the static understanding of light ('static model') to the 'rays' understanding ('flashlight model').“

(GALILI, 1996, S. 853)

Aussagen mit Zügen eines funktionalen Verständnistyps von *mental*en Modellen zum Licht (Verständnistyp IV) können sehr häufig in den Experteneinschätzungen – Einschätzungen von den Forschern zu den jeweiligen *mental*en Modellen - wiedergefunden werden. Als Beispiele werden folgend eher Beispiele aus der Strahlenoptik genannt, aber auch in der Wellenoptik lassen sie sich finden (z.B. FYTTAS, KOMIS & RAVANIS, 2013). Unter anderem wird nach GALILI und HAZAN (2000) - wie bereits erwähnt - der Lichtstrahl in „adäquater Form“ als prozessbasiertes Konzept gesehen. Auch GOLDBERG und MCDERMOTT (1986) beschrieben Strahlendiagramme als „representations of the principles of geometrical optics“ (GOLDBERG & MC DERMOTT, 1986, S. 479). HEYWOOD (2005) sieht Licht ebenfalls als abstraktes Konzept:

„As light clearly represents an abstract and difficult area of learning [...]“

(HEYWOOD, 2005, S.1451-1452)

Das Ziel im Physikunterricht scheint also nach Expertenmeinungen ein abstraktes, funktionales Verständnis von *Licht* zu sein. Dies ist zum Beispiel auch bei FRISCH (1972) zu finden, der die Bilder – oder die Beschreibung der Welt durch Dinge – als naiv und nur als Teilschritt zum Verständnis beschreibt:

*„...we should not ask what light really is. Particles and waves are both constructs of the human mind, designed to help us **speak of the behaviour** of light in different circumstances. With Bohr we give up the naive concept of reality, **the idea that the world is made up of things**, waiting for us to discover their nature. The world is made up by us, out of our **experiences and the concepts we create to link them together.**“*

(FRISCH, 1972, S.105, Hervorhebungen hinzugefügt)

Mit dieser Position weist er auch das „Konzept“ als primären Aspekt der Welt aus, obschon in diesem Zusammenhang nicht ganz klar ist, was er unter Konzepten versteht, wohl aber, dass er sie mit Erfahrungen (Prozessen bzw. Funktionalitäten) in Verbindung bringt.

5.1.3 Vorstellungen zu Feldern

Der Feldbegriff ist in der Physik eine rein funktionale Beschreibung eines Raumes mit gewissen Eigenschaften. Durch den hohen Abstraktionsgrad ist es wie im Folgenden dargestellt oft schwierig, eine rein funktionale Deutung *mentaler Modelle* diesbezüglich zu entwickeln. Eine Zusammenfassung von theoretischen Verständnistypen I-IV *mentaler Modelle* im Zusammenhang mit Feldkonzepten und Literaturangaben mit vergleichbaren Aussagen ist in **Tab. 11.** abzulesen.

Fälle mit Eigenschaften ähnlich eines Verständnistyp I *mentaler Modelle* kommen relativ oft im Zusammenhang mit dem Konzept eines *Feldes* vor. GRECA und MOREIRA (1997) berichten unter anderem, dass viele Studenten im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern nur Mathematik benutzen, aber nicht wissen, was dies bedeutet. So geben die Studentinnen „Guilherme“ und „Ariel“ Folgendes an:

„In the problems, I look for the formulae. I don't worry about visualizing the situation.“

(„Guilherme“, aus GRECA & MOREIRA, 1997, S. 718)

„Well, in this RLC circuit, I don't know what happens. I have the formulae, one of them must help me.“

(„Ariel“, aus GRECA & MOREIRA, 1997, S. 718)

Doch auch in anderen Studien sind rein deklaratives Wissen oder mathematische Prozeduren ohne Verständnis der beschriebenen Realität große Probleme im Zusammenhang mit Feldern. So stellten MAAROUF und BENYANMA (1997) fest, dass der hohe mathematische Formalismus bei der Bildung eines Verständnisses im Wege steht. Auch gibt es häufig Aussagen von Probanden, dass Magnetismus nicht bekannt ist, wobei damit kein Feldkonzept existiert (BORGES & GILBERT, 1998):

„I[nterviewer]: Why is that the magnet behaves in this way?“

S[tudent]: I don't know what magnetism is . . . I have no idea what it is.“

(BORGES & GILBERT, 1998, S. 366)

Ähnlich ist es im Fall der Studie von CAO und BRIZUELA (2016), in der einer der analysierten Probanden kein Konzept eines elektrischen Feldes selbst hatte:

“When the two charges met, they were attracted to and moved toward each other and combined into a new thing.”

(Xinmiao, in CAO & BRIZUELA, 2016, S.9)

Tab. 11. Theoretisches Verständnis des *mentalen Modells* zu *Feldern* unter verschiedenen Verständnistypen mit vergleichbaren Beispielen aus der Literatur zu Schülervorstellungen in der Physik.

Modelltyp	Theoretisches Modell	Exemplarische Literatur
Verständnistyp I (nicht-entwickelter Typ)	Das <i>Feld</i> ist als solches nicht bekannt. Es existiert keine ausgereifte Vorstellung vom <i>Feld</i> , außer, dass eventuell deklaratives Wissen genannt wird.	GRECA & MOREIRA (1997); MAAROUF & BENYAMNA (1997); CAO & BRIZUELA (2016)
Verständnistyp II (Architekturmodell-Typ)	Das <i>Feld</i> wird primär als Objekt gesehen, dessen Gestalt durch gewisse Merkmale charakterisiert ist (z.B. das <i>Feld</i> als Material). Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein.	MUTHIRAPARAMPIL (2012); FEDELE, MICHELINI & STEFANEL (2005) GRECA & MOREIRA (1997)
Verständnistyp III (dualer Typ)	Das <i>Feld</i> wird als Objekt gesehen, dessen Gestalt durch gewisse Merkmale charakterisiert ist. Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein. Zusätzlich werden dem <i>Feld</i> verschiedene Funktionen zugeschrieben (z.B. Kraftwirkung).	SAĞLAM & MILLAR (2006); CAO & BRIZUELA (2016); GUISASOLA, ALMUD & ZUBIMEND (2004)
Verständnistyp IV (funktionaler Typ)	Das <i>Feld</i> wird primär als abstrakte Beschreibung wahrgenommen. Dabei bündelt es einen Satz von Funktionen, die zusammen das <i>Feld</i> ausmachen. Gestaltungsaspekte sind nicht wichtig, verschiedene <i>Feldarten</i> werden durch ihre unterschiedlichen Funktionen und nicht durch ihre unterschiedlichen Gestalten klassifiziert.	BORGES & GILBERT (1998); GUISASOLA, ALMUD & ZUBIMEND (2004); SAĞLAM & MILLAR (2006)

Die Frage, ob Lernende irgendwann nur glauben, dass Felder (in den folgenden Beispielen beschrieben durch Feldlinien) reale *Gestalten* sind, ohne ihnen eine *Funktionalität* zuzuschreiben (also ähnlich eines Verständnistyps II des *mentalen Modells* zum *Feld*), ist schwierig aus der Literatur zu isolieren. Zwar findet sich häufig in wenig wissenschaftlichen Quellen diese Vorstellung als „gängige Fehlvorstellung“ (siehe z.B. IBIX, 2018, November 30; SOUTHWEST HIGH SCHOOL, 2019), doch nur bei MUTHIRAPARAMPIL (2012) lässt sich die explizite Frage „Sind Feldlinien real?“ in einer Studie finden – eine Frage, die viele der Probanden jener Studie bejahen. Allerdings ist an dieser Stelle Vorsicht walten zu lassen:

Weder wurden zusätzliche ähnliche Fragen gestellt, noch ist die Formulierung präzise, was alle Antworten nur bedingt aussagekräftig macht. In diesem Sinne ist auch nichts über die Funktionalitätsdimension zu sagen und damit ebenfalls nicht, ob den Feldlinien eine *Funktionalität* zugeschrieben wurde. Mit großer Vorsicht sei bei der Nennung eines Beispiels auf den Beitrag auf Physics Forums Insights (IBIX, 2018, November 30) hingewiesen, auf dem der Autor von sich selbst aussagt, eine mit dem Verständnistyp II vergleichbare Vorstellung im Zusammenhang mit seinem frühen *mentalen Modell* eines Feldes gehabt zu haben und eine Modellinterpretation ähnlich des Verständnistyps IV am Ende des Lernprozesses als desiderabel anführt.

Eine mögliche Erklärung für die eher geringe Anzahl an Studien zu einem dem Typ II ähnlichen Verständnis eines *mentalen Modells* zu Feldern ist, dass Feldlinien teils eingeführt werden, um eine Bewegung zu erklären und somit sehr schnell oder sogar sofort einen stark funktionalen Charakter bekommen. Auch ist anzumerken, dass viele Testaufgaben, die in den im Folgenden bei dem Vergleich zum Typ III angeführten Studien verwendet wurden, dynamische Szenarien verwendeten. Es ist also auch nicht klar, inwieweit die Erhebungsmethoden somit einen Einfluss auf die *mentalen Modelle* hatten.

Eine eventuelle Problematik beim Finden eines mit dem Typ II vergleichbaren Verständnisses stellt vermutlich zusätzlich das Alter der Probanden dar: Zwar werden die meisten Studien zum Elektromagnetismus nur mit eher älteren Probanden durchgeführt (siehe die Kommentare zu diesem Thema von SAĞLAM & MILLAR, 2006), aber in einer Studie mit Kindern der Altersstufen 5-10 zum Thema Magnetismus entwickelten einige von sich aus eine Vorstellung von einem Feld, wobei dies scheinbar nur Gestaltaspekte aufwies:

„From the pictures of explored situations it emerges the idea of field as something between two magnets, but not well specified.“

(FEDELE, MICHELINI & STEFANEL, 2005, S. 4)

Dabei ging es um Zeichnungen und Erklärungen zum Thema Magnetismus; die Autoren merken aber an, dass *Felder* nur von den ältesten (9-10-jährigen) Probanden als Bilder entwickelt wurden.

Auch in der Interviewstudie von GRECA und MOREIRA (1997) finden sich Aussagen, die dem Verständnistyp II ähneln. So sagt zum Beispiel „Vanisse“, als sie nach dem *mentalen Modell* eines elektrischen Feldes gefragt wird:

„Well, it's a cloud around the charge.“

(Vanisse, aus GRECA & MOREIRA, 1997, S. 718)

Aussagen vergleichbar mit dem dualen Typ (Verständnistyp III) wurden dagegen sehr viel häufiger in Studien dokumentiert. So nennen zum Beispiel SAĞLAM und MILLAR (2006) als eine der vier Hauptvorstellungen, die sie in ihrer Studie zum Verständnis des Elektromagnetismus isolieren, eine zu reale Feldlinienvorstellung. Einer der Probanden beschrieb Feldlinien als Linien, die auf eine Oberfläche aufschlagen:

„In fact in the second situation there are more [field lines] biting the surface.“

(Student 2C5, aus SAĞLAM & MILLAR, 2006, S. 560)

Auch TÖRNKVIST, PETTERSSON und TRANSTRÖMER (1993) kamen bei ihren Studien zu *mentalen Modellen* elektrischer Feldlinien zu einem ähnlichen Schluss:

„They attach far too much reality to the field lines and often treat them as isolated entities in the Euclidean space, not as a set of curves representing a vectorial property of that space.“

(TÖRNKVIST, PETTERSSON & TRANSTRÖMER, 1993, S. 338)

Auch bei den Interviews von CAO und BRIZUELA (2016) stellt eine ihrer Probandinnen das Feldlinienbild als räumliches Muster dar, das die Bewegungspfade von Probeladungen angibt. Sie wiederholt öfters „*die Linien sind nicht real*“, kann allerdings nicht ausführen, was sie damit meint. Dies wird in jenem Artikel als deklaratives Wissen interpretiert, welches sie einmal genannt bekommen hat. Bei GUIASOLA, ALMUD und ZUBIMEND (2004) sind ebenfalls Fälle zu finden, in denen den Feldlinien eine reale Entität zugeordnet wird. GUIASOLA et al. fassen dies wie folgt zusammen:

„Thus, in category B.1 [between 6 and 12%] we have grouped those answers that attribute a real entity to field lines and which identify them with magnetic force.“

(GUIASOLA, ALMUD & ZUBIMEND, 2004, S. 545)

In diesem Beispiel schwingt ebenfalls der Aspekt der *Funktionalitätstreue* mit, da die Feldlinien mit funktionalen Kräften gleichgesetzt werden.

Nach den Fällen, in denen das Verständnis *mentaler Modelle* ähnlich des Typs III aufgeführt wurde, wird nun das Augenmerk auf ein eher funktionales Verständnis *mentaler Modelle* gelegt (Verständnistyp IV). Aufzuführen ist zum Beispiel eine Studie von BORGES und GILBERT (1998), die Interviews mit Technikern durchgeführt haben, welche teils auch im Alltag mit elektromagnetischen Feldern zu tun hatten. Einer der Probanden beruft sich eher auf die *Funktionalität* bei der Frage nach einem Magnetfeld:

S[tudent]: 'Cause it creates a magnetic field and whatever thing enters this field suffers its influence. Within this field it exerts . . . there are forces that attract metals.

I[nterview]: How is that?

S[tudent]: The field is always there. However, these forces ... they only exist from the moment that there is something for them to act upon.“

(BORGES & GILBERT, 1998, S. 367)

GUIASOLA, ALMUD und ZUBIMEND (2004) selbst schreiben den *mentalen Modellen* einen eher gestaltuntreuen Charakter zu, betonen aber den Wert einer *Gestalt* in der Erklärung von Phänomenen:

„Students must be informed that scientists use human intellect and **imagination** to **explain** the natural phenomena...“

(GUIASOLA, ALMUD & ZUBIMEND, 2004, S. 458, Hervorhebungen eingefügt)

Auch SAĞLAM und MILLAR (2006) beschreiben als Desiderat ein Verständnis *mentaler Modelle*, das dem eines Typen IV ähnelt:

„Underlying all of these, perhaps, is the difficulty many students have in coming to terms with an abstract model (involving constructs and variables such as: field, field lines, flux through areas, rate of change of flux, potential difference, etc.) and learning how to apply it to new situations.“

(SAĞLAM & MILLAR, 2006, S. 564)

5.2 Vorstellungen in der Biologie

Bevor eine umfassende und tiefgehende Analyse von *mental*en Modellen in der Biologie geschieht, wird zuerst der Modellbegriff der Biologiedidaktik betrachtet werden, dessen Aspekte starke Parallelen mit den Faktoren *Gestalt* und *Funktionalität mentaler Modelle* allgemein aufweisen: Es geht bei den gängigen biologischen Modellen um die beiden Aspekte „Struktur“ und „Funktion“, welche unter anderem sogar im Lehrplan als Basiskonzept verankert sind, wobei als exemplarisches Beispiel im Lehrplan von in NRW folgende Begründung dafür angeführt wird:

„Das Erfassen, Ordnen und Wiedererkennen von Strukturen legt die Grundlage für das Umgehen mit der biologischen Vielfalt. Erst die Kenntnis von Strukturen ermöglicht das Verständnis und die Erklärung biologischer Funktionen auf allen Systemebenen und im Verlauf der Entwicklung.“

(MINISTERIUM FÜR SCHULE & WEITERBILDUNG DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, 2019
NOVEMBER 30, S. 21)

Es sei an dieser Stelle auch angemerkt, dass in NRW in der Physik und Chemie diese Trennung nicht vollzogen wird und nur das Basiskonzept „Struktur (der Materie)“ behandelt wird. Trotz der expliziten Nennung als eines der Basiskonzepte ist „Struktur und Funktion“ kein Thema, welches nach dem Kernlehrplan in NRW explizit behandelt werden muss, sondern nur eines, was sich innerhalb der verschiedenen Inhalte der Jahrgangsstufen 5-9 implizit zeigt (ebd.). Zwar ist diese Betrachtung eher exemplarischer Natur, zeigt aber schon die Wichtigkeit der Rolle von *Gestalt* und *Funktionalität* bei Modellen in der Biologie.

Ein Beispiel einer Diskussion von Struktur und Funktion aus fachlicher Perspektive findet sich im Zuge der Beschreibung des zentralen Nervensystems und dem damit einhergehenden Vergleich der beiden Aspekte unter anderem bei SWANSON (2012, S.130), der Struktur und Funktion einen sich gegenseitig ergänzenden Charakter zuordnet (der Funktion aber in seinen Ausführungen deutlich mehr Kapitel einräumt und sie in den Fokus setzt). Es ist an dieser Stelle somit fraglich, ob ein Verständnis mit Ähnlichkeiten des Typs IV angestrebt wird, da in der Biologie auch die *Gestalttreue* eine wichtige Rolle z.B. bei Klassifizierungen einnimmt (ebd.). Trotzdem werden im Folgenden zu mehreren Konzepten mit den Typen I-IV vergleichbare Aussagen und Forschungsbefunde aufgeführt. Dabei werden die Verständnistypen mit Forschungen zu Vorstellungen zur *Genetik*, zur *Evolution* und zur *Zelle* verglichen.

5.2.1 Vorstellungen zur Zelle

Die ersten *mentalen Modelle*, zu denen ein theoretisches Verständnis in den Ausprägungen nach Typen I-IV mit Forschungsbefunden verglichen wird, sind *mentale Modelle* zum Konzept der *Zelle* und ihrer Bestandteile. Dabei ist zunächst festzustellen, dass die Zelle selbst als Gegenstand von Untersuchungen *mentaler Modelle* hauptsächlich in Studien zu unteren Jahrgangsstufen anzutreffen ist. Die meist untersuchten Altersgruppen bewegen sich dabei im Rahmen von 5 Jahren bis Klasse 9. Dies ist vermutlich vor allem darin begründet, dass das Konzeptverständnis von der Zelle und ihren Teilen nach der Mittelstufe vorausgesetzt wird. Verständnisse ähnlich der Typen III und IV wurden unter anderem in einer Studie mit einer Klasse 11 gefunden, allerdings ist nicht klar, inwieweit die *Gestalt* jeweils interpretiert wurde und deswegen können dort keine weiteren Aussagen über eine Differenzierung dieser Typen gemacht werden. Vor allem der Übergang von Typ I ähnlichem Verständnis zu Typ II ähnlichem Verständnis ist aber sehr gut dokumentiert. Die theoretischen Verständnistypen und die vergleichbaren Funde aus Studien sind in **Tab. 12.** dargestellt.

Ein mit dem Verständnistyp I vergleichbares Verständnis der Zellvorstellung ist häufig belegt und findet sich unter anderem bei Problemen wieder, die viele Lernende am Anfang ihres Lernprozesses haben. Dabei verwechseln Schülerinnen und Schüler oft Zellen mit Atomen und haben keine klare Trennung zwischen diesen, wobei sie entweder angeben, dass Atome leben und einen Zellkern besitzen (SEWELL, 2002) oder dass sie glauben, Atome bestünden aus Zellen als Grundbausteine (ROLAND, 2009). Aber nicht nur diese mit einem Typ I-Verständnis vergleichbare Charakteristik ist zu finden; auch ist dokumentiert, dass Lernende dazu neigen, einfach die Schulbuchdefinition auswendig zu nennen, ohne sie erklären zu können (DREYFUS & JUNGWIRTH, 1989):

„Question: Are you sure this is what the nucleus does?”

*Pupil 1: No, I am not sure, **I never thought about it, but we did learn that the nucleus regulates the activities of the cell, didn't we?***

Pupil 2: Yes, this is what we have learned.“

(DREYFUS & JUNGWIRTH, 1989, S. 55, Hervorhebung hinzugefügt)

Eine Untersuchung, welche den Übergang zwischen einem dem Typ I zum Typ II ähnlichen Verständnis von *mentalen Modellen* bezüglich der Zelle relativ detailliert dokumentiert, ist die Studie von HAŞILOĞLU und EMINOĞLU (2017). Dabei fanden sie in einem Pretest zu einer Unterrichtseinheit zum Thema der Mikroskopie am Beispiel von Zellen heraus, dass die meisten Lernenden keine sinnvollen Aussagen zu der Frage, was denn Zellen seien, geben konnten. Dabei waren die Fragen des Pretests alle offen. Auch konnten die Lernenden zum Großteil keine sinnvollen Zeichnungen von Zellen anfertigen. Nach der Einheit waren die Lernenden zum Großteil in der Lage, eine Zelle zu zeichnen und die Struktur bildlich grob zu beschreiben. Von Funktionen sprachen sie dabei nicht, sondern rein vom Aussehen der Zellen, was darauf hindeutet, dass am Ende mindestens eine dem Verständnistyp II ähnliche Interpretation des *mentalen Modells* vorhanden war – auch wenn dies rein der Lernsituation geschuldet sein könnte.

Tab. 12. Theoretische Ausprägung der Verständnistypen *mentaler Modelle* von *Zellen* und Verortung der vier Verständnistypen in der Literatur zu Schülervorstellungen in der Biologie.

Modelltyp	Theoretisches Modell	Exemplarische Literatur
Typ I (nicht-entwickelter Typ)	Die biologische <i>Zelle</i> ist als solche nicht bekannt. Es existiert keine ausgereifte Vorstellung von der biologischen Zelle oder ihren Teilen, außer, dass eventuell deklaratives Wissen genannt wird.	DREYFUS & JUNGWIRTH (1989); SEWELL (2002); ROLAND (2009)
Typ II (Architekturmodell-Typ)	Die biologische <i>Zelle</i> wird primär als Objekt gesehen, dessen Gestalt durch gewisse Merkmale charakterisiert ist.	KAWALKAR & VIJAPURKAR (2019); TAMBO, MUKARO & MAHASO (2003); HAŞILOĞLU & EMINOĞLU (2017)
Typ III (dualer Typ)	Die biologische <i>Zelle</i> oder ihre Teile werden als Objekte gesehen, deren Gestalt durch gewisse Merkmale charakterisiert sind. Zusätzlich werden den verschiedenen Teilen der Zelle Funktionen zugeschrieben (Zellkern – Speicherung von Erbmateriale; Zellplasma – Schutz).	KAWALKAR & VIJAPURKAR (2019); TAMBO, MUKARO & MAHASO (2003); FLORES, TOVAR & GALLEGOS (2003)
Typ IV (funktionaler Typ)	Die <i>Zelle</i> wird als abstrakter Baustein von Lebensformen gesehen. Dabei bündelt er einen Satz von Funktionen (Funktionalität), die zusammen die <i>Zelle</i> ausmachen. Gestaltaspekte sind nicht wichtig, verschiedene Zellarten werden durch ihre unterschiedlichen Funktionalitäten und nicht durch ihre unterschiedlichen Gestalten klassifiziert.	TAMBO, MUKARO & MAHASO (2003); DREYFUS & JUNGWIRTH (1988); KAWALKAR & VIJAPURKAR (2019)

Ein anderes Beispiel für Lernende mit einem Verständnis ihrer *mentalen Modelle* mit einer Charakteristik des Typ II bietet die Studie von TAMBO, MUKARO und MAHASO (2003). Sie stellten eine hohe Abhängigkeit von Schulbuchbildern fest, wenn Lernende Zellen identifizieren sollten: Solche Beispiele wurden genannt, die nach Einschätzung der Autoren ein Aussehen ähnlich der Abbildungen in Schulbüchern aufwiesen. Dies bedeutete häufig allerdings, dass die „Zelle“, welche die Lernenden als solche benannten, keine war. Auch starke Hinweise auf ein mit dem Typ II vergleichbares Verständnis bringen KAWALKAR und VIJAPURKAR (2019). In ihren Studien wurden die Lernenden ebenfalls angewiesen, eine Zelle zu zeichnen, waren aber dazu so nicht in der Lage, weil ihnen die Information nach der Art der Zelle fehlte; als eine Pflanzen- oder Tierzelle vorgeschlagen wurde, zeichneten sie jeweils diese, mit der Begründung, dass „sie anders aussehen“. Dies ist ebenfalls ein starker Hinweis darauf, dass der vereinende funktionale Aspekt des Konzeptes der Zelle zu diesem Zeitpunkt noch nicht entwickelt war. Zusätzlich stellen KAWALKAR et al. heraus, dass Zellen teils als

2D-Objekte angesehen werden und im Schülerverständnis keine räumliche Tiefe besitzen. So sind Zellen eher „circular“, also sehr flache Objekte - „spherical“ war nach Schüleransicht allerdings keine passende Beschreibung für die *Gestalt* einer Zelle (ebd., S.188). Als Grund vermuten die Autoren der Studie ebenfalls, dass in den Textbüchern die Zellen immer zweidimensional dargestellt werden.

Die Differenzierung der mit den Verständnistypen III und IV vergleichbaren Fälle gestaltet sich im Zusammenhang mit den *mentalen Modellen* der Zelle schwierig. Es sind selten eindeutig zuordenbare Beispiele in der Literatur zu finden, da meist der Gestaltaspekt in Interviews oder Fragebögen nicht mehr angesprochen wird. Deshalb ist oft nicht zu sagen, ob Lernende die *Gestalt* ihres *mentalen Modells* als Abbild der realen *Gestalt* sehen.

Bei TAMBO, MUKARO und MAHASO (2003) finden sich Aussagen, bei denen Zellteile mittels ihrer *Funktionalität* und eventuell ihrer *Gestalt* beschrieben werden. So sagte einer ihrer Probanden „*Most cells have a nucleus at the centre of the cell for instructions*“ (ebd., S.128), ein anderer „*The cytoplasm is the liquid part of the cell which acts as a transport medium*“ (ebd.). Auch ein Verständnis ähnlich des Typs III scheinen Probanden bei FLORES, TOVAR und GALLEGOS (2003) zu haben, da sie nicht mittels der Funktionen eine Integration der Zellvorstellungen in ein „großes Ganzes“ vollführen können:

„*In particular, the establishment of relationships between cell structures and their functions are especially complex for students who are not able to integrate them into an overall picture.*“

(FLORES, TOVAR & GALLEGOS, 2003, S. 270)

Auch führen sie Fälle an, in denen die Zellernährung als herunterskaliertes Replikat des Ernährungsprozesses bei größeren Lebewesen aufgefasst wird:

„*For them the process of nutrition in the cell is similar to the digestive system where food is ground and processed.*“

(FLORES, TOVAR & GALLEGOS, 2003, S. 279)

Eine Beschreibung mittels eines *mentalen Modells* als hauptsächlich *funktionalitätstreu* findet sich bei KAWALKAR und VIJAPURKAR (2019). Bei ihnen gibt einer der Schüler nach ihrer Unterrichtseinheit zur Zelle an, dass „*the shape is appropriate to their function*“ (ebd., S.190). Dies fand statt, nachdem schon alle Schüler der Versuchsgruppe die Funktionen der einzelnen Zellteile (eventuell nur auswendig) gelernt hatten. Zusätzlich scheinen Experten den Verständnistyp IV in Grundzügen zu besitzen: So führen TAMBO, MUKARO und MAHASO (2003) als „richtige“ Antworten auf Zellfunktionen an „*Cell structure is adapted to its function*“ und „*Cells differ in relation to their function*“ (ebd., S. 128). Es ist allerdings auch an diesem Punkt anzumerken, dass die *Gestalt* in gewissem Maße wichtig ist, da sie aus der *Funktionalität* erwächst. Dies zeigt erneut, dass vor allem in der Biologie in Fällen *Gestaltstreu* und *Funktionalitätstreu* beide als wichtig angesehen werden. Auch DREYFUS und JUNGWIRTH (1989) dokumentieren einige Verständnisse mit Zügen des Typ IV, da die meisten ihrer Probanden wissen, dass „*Specialized cells fulfill specific functions*“ (ebd., S. 226) – obwohl nicht auszuschließen ist, dass es sich um rein deklarative Aussagen handelt. DREYFUS et al. untersuchen außerdem, inwieweit ein elaboriertes funktionales Verständnis (vergleichbar mit

Verständnistyp IV) von Zellen bei Lernenden vorhanden ist und stellen nach ihrer Studie fest, dass dieses als zu schwierig eingeschätzt werden müsse:

„The 'general functional idea of the living cell as the basic unit of life' which was, in a nutshell, the curricular expectation of the 'establishment', turned out to have been sadly lacking in a large part of the test population. [...]“

(DREYFUS UND JUNGWIRTH, 1988, S. 229)

5.2.2 Vorstellungen zu Genetik

Im Rahmen der *Genetik* werden folgend ebenfalls Schülervorstellungen mit theoretischen Verständnistypen I-IV verglichen. Dieser Vergleich ist in **Tab. 13.** abzulesen.

Tab. 13. Theoretische Ausprägung der Verständnistypen *mentaler Modelle* von *Genen* und Verortung der vier Verständnistypen in der Literatur zu Schülervorstellungen in der Biologie.

Modelltyp	Theoretisches Modell	Exemplarische Literatur
Verständnistyp I (nicht-entwickelter Typ)	Die <i>Gene</i> sind als solche nicht bekannt. Es existiert kein ausgereiftes Verständnis von <i>Genen</i> oder ihren Teilen, außer, dass eventuell deklaratives Wissen genannt wird.	VENVILLE & TREAGUST (1998); FRERICHS (1999); LEWIS ET AL. (2000)
Verständnistyp II (Architekturmodell-Typ)	Die <i>Gene</i> werden primär als Objekte gesehen, deren Gestalt durch gewisse Merkmale charakterisiert ist.	DIKMENLI, CARDAK & KIRAY (2011); SAKA, CERRAH, AKDENIZ ET AL. (2006); BOUJEMAA, PIERRE, SABAH ET AL. (2010)
Verständnistyp III (dualer Typ)	Die <i>Gene</i> oder ihre Teile werden als Objekte gesehen, deren Gestalt durch gewisse Merkmale charakterisiert sind. Zusätzlich werden den Genen Funktionen zugeschrieben.	SAKA, CERRAH, AKDENIZ ET AL. (2006); GERICKE (2008); BOUJEMAA, PIERRE, SABAH ET AL. (2010)
Verständnistyp IV (funktionaler Typ)	Die <i>Gene</i> werden primär als funktionale Einheiten verstanden (Synthese von Proteinen etc.). Ihre Bestandteile werden ebenfalls als primär funktionale Objekte gesehen.	DIKMENLI, CARDAK & KIRAY (2011); GERICKE & HAGBERG (2007); GERSTEIN, BRUCE, ROZOWSKY ET AL. (2007)

Der erste theoretische Verständnistyp eines *mentalen Modells* zum Konzept des Gens (Verständnistyp I) ist der von einem oberflächlichen deklarativen Wissen bis hin zu keinem Wissen im Zusammenhang mit diesem Konzept. Vergleichbare Vorstellungen eines solchen Typen finden sich häufig in der Literatur: So führen VENVILLE und TREAGUST (1998) die Vorstellung auf, dass Gene Zellen sind und somit das Konzept keine von einem anderen Konzept unabhängige Bedeutung besitzt. Auch FRERICHS (1999) fand diese Vorstellung und

vermutete als Grund, dass die Lernenden ausdrücken wollen, dass Gene „*sich der unmittelbaren Sichtbarkeit entziehen*“ (ebd., S. 146), also evtl. klein wie Zellen sind.

Des Weiteren fanden LEWIS, LEACH und WOOD-ROBINSON (2000) heraus, dass einige Schülerinnen und Schüler nicht wissen, dass Chromosomen die genetischen Informationen tragen, das Konzept des *Chromosoms* ist also nicht entwickelt gewesen. Dabei wurden die Studien in der Altersgruppe 14-16 Jahre durchgeführt. Auch SAKA, CERRAH, AKDENIZ und AYAS (2006) beschrieben, dass ein Großteil der Probanden ihrer Studie an unterschiedlichen Altersgruppen im Biologieunterricht deklarative (funktionale) Aussagen machte, die ohne wirkliche Bedeutung für sie waren.

Auch Fälle mit den Eigenschaften eines Verständnistyps II sind häufig in der Literatur dokumentiert: So fanden DIKMENLI, CARDAK und KIRAY (2011) heraus, dass ein Großteil der 140 von ihnen untersuchten Lernenden das Gen als rein strukturelle Einheit sieht. Auch SAKA et al. (2006) bestätigten, dass die meisten Probanden ihrer Studie die Struktur und Zusammensetzung der DNS beschreiben konnten, aber zum Großteil bei der Beschreibung ihrer Funktionen versagten. So war für eine Schülerin der achten Klasse die DNS einem Gebäck gleich, da die Form sie an einen essbaren Zopf erinnerte. Auch bei BOUJEMAA, PIERRE, SABAH, SALAHEDDINE, JAMAL und ABDELLATIF (2010) war die häufigste Antwort auf die Frage nach der Definition von Genen die eines DNS-Segments, wobei zumindest einige der Probanden keine weiteren funktionalen Aspekte für die Definition aufführten.

Mit dem Verständnistyp III vergleichbare Interpretationen ihrer Vorstellungen sind bei Lernenden ebenfalls häufig zu finden. Auch hier ist zum Beispiel die Studie von SAKA et al. (2006) aufzuführen: Im Zusammenhang mit Chromosomen fanden sie, dass die Lernenden allgemein strukturelle und funktionale Erklärungen für das Konzept lieferten. GERICKE (2008) beschreibt in seiner Dissertation auch häufig die Problematik, dass Lernende an alten Modellen festhalten und ähnlich wie in der Situation des Bohrschen Modells und des Orbitalmodells nicht von solchen Bildern wegkommen, die sie früh erlernen und in diesem Zusammenhang auch an der *Funktionalität* früherer Modelle festhalten. Dies weist auf ein Verständnis *mentaler Modelle* vergleichbar mit dem Typ III hin, bei dem sowohl die *Gestalt* als auch die *Funktionalität* als realitätstreu empfunden werden. Auch BOUJEMAA et al. (2010) fanden, dass viele Probanden ihrer Studie sowohl die Struktur als auch die Funktionen bei der Frage, was ein Gen sei, beschrieben. Damit lagen bei der Mehrzahl der Studienteilnehmer die Charakteristika des Verständnistyps III für die *mentalen Modelle* vor, auch wenn BOUJEMAA et al. feststellten, dass diese sehr rudimentärer Art waren.

GERICKE (2008) führt in seiner Dissertation zu Schülervorstellungen in der Genetik als Desiderat eine mit dem Verständnistyp IV vergleichbare Beschreibung als die Zielsetzung des Verständnisses des Konzeptes Gen an, wobei er auch explizit die Vermittlung des Gestaltaspekts als unzureichendes Ziel anführt:

„*For example, that the gene can be regarded as a process, instead of a discrete material unit, which encodes a coherent set of potentially overlapping functional products.*“

(GERICKE, 2008, S. 68)

Eine Studie von DIKMENLI, CARDAK und KIRAY (2011) zeigt auch Hinweise auf ein Verständnis ähnlich des Typs IV; zwar finden sie, dass einige ihrer Studienteilnehmer *Gene*

als strukturelle Einheiten ansehen, aber auch, dass eine andere Gruppe Studienteilnehmer *Gene* als funktionale Einheiten ansehen. Es ist aber auch bei Genen festzustellen, dass ein Verständnis mit Charakteristiken des Typen IV eher bei den Durchführenden der Studien und nahezu gar nicht bei den jeweiligen Probanden gefunden werden kann: Viele Autoren fokussieren sich in ihren Artikeln auf funktionale Verständnisse des Gens als die „richtige“ Auffassung (siehe zum Beispiel GERICKE & HAGBERG, 2007; GERSTEIN, BRUCE, ROZOWSKY et al., 2007).

Es ist zusammenfassend zum Thema des Gens zu sagen, dass vor allem die Charakteristika der Verständnistypen I und II bzw. III bei Lernenden vorkommen und die den Verständnistypen III und IV ähnlichen Interpretationen von Vorstellungen eher grobe *Funktionalitäten* adressieren. Dabei ist leider in vielen der Studien nicht nachzuvollziehen, wie häufig die Charakteristika der Typen III, III und IV je vorkamen, da oft die strukturellen und funktionalen Modellaspekte gleichzeitig aufgenommen wurden und nicht mehr klar ist, welcher Student Aussagen zur *Gestalttreue*, *Funktionalitätstreue* oder zu beidem gemacht hat. Das einem Typ IV ähnliche Verständnis, welches die Experten als Zielsetzung des Modellverständnisses sehen, wird dabei nahezu nie erreicht – und wenn nur auf sehr grob beschreibende Art. Es ist aber auch anzuführen, dass in allen Studien nur Schülerinnen und Schüler im Alter von 14-16 Jahren untersucht wurden (bzw. wenige Lehramtsstudierende der Biologie) und damit nahezu keine Probanden, die sich tief inhaltlich mit den Konzepten auseinandergesetzt haben.

5.2.3 Vorstellungen zur Evolution

Eine umfassende Übersicht zur Forschung zu *mental*en Modellen der *Evolution* stellt EVANS (2008) als Zusammenfassung ihrer bisherigen Forschungserkenntnisse dar. Sie erläutert dabei viele Studien, die sich mit der Konzeptentwicklung im Bereich der Evolution befassen. Eine Übersicht der theoretischen Charakteristiken der Verständnistypen und vergleichbare Fälle in der Literatur sind in **Tab. 14.** abzulesen.

Tab. 14. Theoretische Ausprägung der Verständnistypen *mentaler Modelle* von *Evolution* und Verortung der vier Verständnistypen in der Literatur zu Schülervorstellungen in der Biologie.

Modelltyp	Theoretisches Modell	Exemplarische Literatur
Verständnistyp I (nicht-entwickelter Typ)	Die <i>Evolution</i> ist als solche nicht bekannt. Es existiert keine (ausgereifte) Vorstellung von <i>Evolution</i> oder ihren Aspekten, außer, dass eventuell deklaratives Wissen genannt wird.	SAMARAPUNGAN & WIERS (1997); EVANS (2005); EVANS et al. (2001)
Verständnistyp II (Architekturmodell-Typ)	Die <i>Evolution</i> wird primär anhand von ihrer Gestalt und dem Wandel von dieser charakterisiert. Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein.	SAMARAPUNGAN & WIERS (1997); FENNER (2013); EVANS (2008)
Verständnistyp III (dualer Typ)	Die <i>Evolution</i> wird anhand von ihrer Gestalt und deren Veränderung charakterisiert, aber es ist zusätzlich bekannt, dass die Veränderungen durch Mechanismen zustande kam. Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein.	BANET & AYUSO (2003); DAGHER & BOUJAOUDE (1997); FERRARI & CHI (1998)
Verständnistyp IV (funktionaler Typ)	Die <i>Evolution</i> wird primär funktional gesehen. Die <i>Evolution</i> wird mittels ihrer Prinzipien und Funktionsweisen beschrieben. Die Änderungen der Gestalt werden als Nebenprodukte der <i>Evolution</i> angesehen.	EVANS (2008); DEMASTES, SETTLAGE & GOOD (1995); BISHOP & ANDERSON (1990)

Im Gegensatz zu einigen anderen in diesem Kapitel aufgeführten Konzepten, die Lernende im Alter zwischen 14 und 16 Jahren in der Schule behandeln (z.B. *Gen, Atom, Zelle*), ist die *Evolution* in ihrer Natur als Beschreibung der Herkunft der Arten ein Konzept, das auch schon oft bei sehr jungen Kindern untersucht wurde. Damit ist im Falle der *Evolution* die Erhebung und Untersuchung von *mental*en Modellen, die ähnlich eines Verständnisses von Typ

I interpretiert werden - die sich also durch ein Nichtvorhandensein des Modells im Gegensatz zum deklarativen Wissen charakterisieren - möglich. Auf die Frage, woher denn die Tiere stammen, ist eine häufige Antwort, dass sie einfach aus dem Boden kamen. So beschreibt z.B. EVANS (2000), dass einige Kinder glauben, die ersten ihrer Art erschienen nach Niederschlägen aus dem Boden, obwohl keine Rede von Pflanzen war.

Diese Vorstellungsart wurde von Evans als naturalistische, nicht transformationistische Idee bezeichnet und drückt damit aus, dass kein Evolutionsprozess stattfindet. Zwar ist immer noch ein transformatorischer Aspekt zu finden, dadurch, dass Arten aus dem Boden *erscheinen* (im Sinne von „sie graben sich an die Oberfläche“), aber dies ist keine Veränderung zwischen Arten und somit in diesem Sinne keine *Evolution*. Auch zeigt z.B. GELMANN (2003), dass 5- bis 7-jährige Kinder angeben, dass eine Art sich nicht aus einer anderen entwickelt. Als eine der Ursachen hierfür führt EVANS (2008) an, dass die Kinder noch nicht verstehen können, dass Tiere irgendwann noch nicht existierten (EVANS, MULL & POLING 2001). Auch geben Lernende, die ein Verständnis ähnlich des Typs I besitzen, öfter an, dass Arten aussterben und verschwinden und sprechen keine eventuelle Änderung an, nicht einmal im Zuge einer Gestaltwandlung (SAMARAPUNGAVAN & WIERS, 1997).

Mit dem Verständnistyp II vergleichbare Beispiele sind im Zusammenhang mit *mentalen Modellen* in der Evolution häufig zu finden: Es scheint irgendwann die Idee im Lernenden aufzukommen, dass Arten nicht von Anfang an da waren und irgendeine Art von Wandel vorgegangen sein musste. Wieso dieser Wandel stattfand, wird meist nur grob mit „wegen der Umwelt“ begründet (SAMARAPUNGAVAN UND WIERS, 1997), wobei aber detailliertere Aussagen über die Wandlung des Aussehens von Tieren gemacht werden. Oft in diesem Zusammenhang genannt wird die „Dinosaurier-Hypothese“, mittels derer Kinder die heutigen Tierarten auf ihre Dinosaurier-vorfahren zurückführen, wie zum Beispiel den Menschen auf den „Dinosauriermensch“ (Neanderthaler o.ä.). So werden alle Tiere allgemein auf Dinosaurier zurückgeführt, wobei die „Dinosauriertiere“ je eine ähnliche Gestalt besitzen:

„R: There are no dinosaurs left.

E: What happened to them?

R: The climate began to change. It became hot and dry and there was less food... so... they began to change. They became smaller and smaller until they became the animals of now...

E: So how did the climate and the food make them become smaller?

R: Don't know exactly. As it became warmer, they changed slowly. For instance - the mammoth - it began to loose its hair . . . turned into an elephant, so it became extinct.“

(Richard, 8 Jahre, SAMARAPUNGAVAN & WIERS, 1997, S. 161-162)

In diesem Auszug sind Züge des Verständnistyps II ausgeprägt herauszulesen. Dabei verweist Richard auf den Aspekt der Gestaltwandlung im Zuge der Evolution; wie genau sie zustande kommt, kann er aber nicht sagen. Die einzige *Funktionalität*, die schwach aus seinen Äußerungen herauszulesen ist, ist die Veränderung selbst, doch der Fokus des *mentalen Modells* liegt primär auf der Gestaltwandlung der Tiere. Eine sehr viel elaboriertere Vorstellung

ähnlich eines Verständnistyps II im Kontext der Evolution ist bei SAMARAPUNGAVAN und WIERS (1997) ebenfalls zu finden:

„E: *How did the first animals come into being?*

T: *In the beginning there was no life, only dust and seeds. The seeds began to change. They formed into tiny germs which grew and took the shape of the different animals like the apes and so on. [...]*

E: *How did people first come to be on earth?*

T: *They also came from plants... The tiny seeds in the beginning...“*

(Thijs, 12 Jahre, SAMARAPUNGAVAN & WIERS (1997), S. 163)

Auch Thijs beschreibt neben einer Veränderung im Allgemeinen primär einen Gestaltwandel, der sich in seinen beiden *mentalen Modellen* zur Evolution – je für Tiere und Menschen – wiederfindet. Es besteht eine Kohärenz der Vorstellungen von Mensch und Tier; dabei wird je der Samen als Ausgangspunkt genutzt, um damit eine Gestaltwandelungsvorstellung aufzubauen. Damit weisen die einzelnen Modelle eine Gesamtstruktur zu Beginn der Gestaltbeschreibung auf und teilen sich dann irgendwann in Aspekte der jeweiligen Arten auf. Ein Grund dafür, warum unterschiedliche Arten entstehen, wird nicht im aufgeführten Datenmaterial genannt. Das *mentale Modell* der Evolution ist allerdings weit kohärenter und umfassender als das von Richard; wo Richard nur einzelne Veränderungen von ähnlichen Tieren ohne Begründung beschreibt (z.B. Mammut zu Elefant), hat Thijs eine elaboriertere kohärente Gestaltwandelungsvorstellung entwickelt, er hat also eine Vorstellung, wie Evolution „aussieht“, aber nicht wie Evolution „funktioniert“. Leider ist das Datenmaterial jedoch nicht vollständig publiziert worden, so dass keine Aussage darüber vorliegt, inwieweit Thijs die *Funktionalität* der Wandlungsprozesse beschreibt. Daher ist nur klar, dass die Gestaltwandelung als Kopie der Realität gesehen wird. Somit weisen die Aussagen in ihrer vorliegenden Ausführung nur vergleichbare Charakteristika eines Typ II-Verständnisses auf.

Viele Vorstellungen ähnlich des Verständnistypen III weisen eine erstaunliche Eigenschaft auf: Dabei werden Mikroevolutionsprozesse unter anderem nicht durch Populationen und Änderungen zwischen Generationen beschrieben, sondern die Wandlungsvorstellung scheint teils genau so verstanden zu werden, wie die *Gestalt* des *mentalen Modells* es vorgibt – eine Wandlung des Aussehens in der Vorstellung wird als Abbild der Realität gesehen und somit nur einem einzigen Exemplar der Spezies zugeschrieben (siehe zur Übersicht z.B. EVANS, 2008). Es wird dabei auch oft eine *Funktionalität* mitgenannt, welche auch als solche betitelt wird: Die *Gestalt* ändert sich, weil sie so besser in der Umwelt funktioniert (überlebt). Darum passt sich ein einzelnes Tier langsam an und verwandelt sich. Diese mit dem Verständnistyp III vergleichbare Interpretation der Vorstellungen bringt aber einen großen Nachteil mit sich: Dadurch, dass die Gestaltwandelung als Abbild der Realität gesehen und einem einzelnen Exemplar der Spezies zugeordnet wird, ist die Versuchung groß, dem Tier währenddessen eine gezielte Intention zuzuschreiben (z.B. BANET & AYUSO 2003, BIZZO 1994, DAGHER & BOUJAOUDE 1997, FERRARI & CHI, 1998).

Eigenschaften ähnlich eines Verständnistypen IV werden auch im Falle der Evolution eher von Experten gehalten und als gewünschtes Verständnis der zugehörigen *mentalen Modelle*

beschrieben. So stellt zum Beispiel EVANS (2008) nach ihrer jahrelangen Untersuchung zu *mentalen Modellen* in der Evolution heraus, dass der Kern der Evolutionstheorie ist, dass natürliche Prozesse Veränderungen in Populationen hervorrufen:

*„[...] the core tenets of evolutionary theory: That naturalistic, non-teleological, and non-intentional **processes** result in population change, speciation, common descent, and the interrelationship of all living things.“*

(EVANS, 2008, S. 281, Hervorhebung hinzugefügt)

Auch DEMASTES, SETTLAGE und GOOD (1995) beschreiben in ihrer Studie zum Verständnis der *Evolution*, dass ein wichtiger Lernaspekt die Mechanismen und Prozesse der Evolution ist. So betonen sie zum Beispiel *„the origin and survival of traits are separate processes“* (vgl. ebd., S. 538).

In der ersten Studie (BISHOP & ANDERSON, 1990), die mitunter zum Verständnis *mentaler Modelle* der *Evolution* unternommen wurde, ist ebenfalls eine Beschreibung der Evolution auf funktional orientierter Ebene als Definition von den Experten gewählt worden:

*„The idea of evolution (i.e., that species **change** over time) was around long before Darwin; what was lacking was knowledge of a plausible **mechanism**. It wasn't until Darwin painstakingly amassed and presented overwhelming evidence for evolution as a historical fact and postulated the **believable mechanism of natural selection** that the theory was generally accepted by biologists.“*

(BISHOP & ANDERSON, 1990, S. 415, Hervorhebungen hinzugefügt)

Somit kommt der rein funktionale Verständnistyp IV dem gewünschten Verständnis des *mentalen Modells* auch im Zusammenhang mit der *Evolution* sehr nahe.

5.3 Vorstellungen in der Chemie

Auch in der Chemie gibt es eine große Menge an Vorstellungen, welche oft als problematisch benannt werden. Da in der Chemie sehr viele Phänomene auf der Teilchenmodellebene beschrieben werden, werden in diesem Abschnitt nur zwei Konzepte – die *Teilchenvorstellung* und die *Stoffumwandlung* (Chemische Reaktion oder Phasenwandel) – betrachtet, da anhand dieser schon eine große Anzahl an Beispielen mit Zügen der Verständnistypen I-IV gefunden und Thematiken der Chemie abgedeckt werden können.

Zunächst sei angeführt, dass die Mathematik - genau wie in der Physik - nicht als eindeutiges Anzeichen für einen bestimmten Verständnistypen *mentaler Modelle* steht: Auch im Fall der Chemie scheinen mathematische Formulierungen zu den Typen I und IV zu gehören; Wissenschaftler dokumentierten mehrfach, dass zwischen dem mathematischen Umgang von Neulernern der Chemie und dem der Experten ein ähnlicher Unterschied wie in der Physik auftritt: Neue Lernende können mit der Mathematik umgehen – diese hat jedoch für die Lernenden keine Bedeutung im Zusammenhang mit den jeweiligen Prozessen der Chemie. Experten dagegen nutzen die Mathematik, um Prozesse scharf darzustellen. Daher ist im letzteren Fall auch die Mathematik ein Ausdruck von tiefem Verständnis (siehe dazu u.a. HESSE & ANDERSSON, 1992; POSNER, STRIKE, HEWSON, & GERZOG, 1982; TOULMIN, 1972).

5.3.1 Vorstellungen zu Stoffumwandlungen

Die *Umwandlung von Stoffen* primär als Änderung der funktionalen Eigenschaften zu sehen, ist eine hohe Stufe von Verständnis (ANDERSSON, 1986). Auf dem Weg zum abstrakten funktionalen Verständnis tauchen bei Lernenden häufig Verständnisse *mentaler Modelle* auf, die denen der Typen I bis III stark ähneln. Vor allem interessant ist die von ANDERSSON (1986) aufgestellte grobe Kategorisierung des Verständnisses der *Stoffumwandlungsprozesse*, die sich auf die vier Verständnistypen *mentaler Modelle* aus unseren Untersuchungen abbilden lässt:

1. „Das ist einfach so.“ (*Typ I*)⁷
2. Verschiebung (*Typ I*)
3. Modifikation (*Typ II*)
4. Transmutation (*Typ III*)
5. Chemische Interaktion (*Typ IV*)

Eine Übersicht der theoretischen Charakteristiken der Verständnistypen und vergleichbare Fälle in der Literatur sind in **Tab. 15.** abzulesen. Dabei ähneln Beispiele für die erste und die zweite Kategorie sehr den Eigenschaften eines Verständnistypen I: Die Schülerinnen und Schüler beschreiben beispielsweise zu einem sehr geringen Anteil, dass beim Prozess des Rostens einer Regenrinne keine *Stoffumwandlung* stattfindet, sondern sich ein „Rost-Stoff“

⁷ Die Kategorien 1.-5. sind frei übersetzt.

auf die Rinne setzt (ANDERSSON & RENTSTRÖM, 1983). Auch ist eine häufig auftauchende Vorstellung, dass neue Stoffe einfach von einem anderen Ort kommen und sich irgendwo nur anlagern. Zum Beispiel beschreiben auch Lernende in der Studie von SHOLLUM (1982), dass der Rost als kleine Partikel in der Luft bereits existiert und sich dann an einem Gegenstand – im Beispiel der Studie ein Nagel – ansetzt. Auch gab ein Schüler in einer Studie von MEHEUT, SALTIEL und TIBERGHIE (1983) zur Verbrennung beispielsweise an, dass es schwer vorzustellen sei, dass Wasserdampf immer im Holz gespeichert ist, dies aber so sein müsse. In diesem Sinne ist eine Vielzahl dem Typ I ähnlicher Modellverständnisse zu finden, in denen die Stoffumwandlung nicht existiert (und wenn nur als nahezu bedeutungsloses Wort). Auch häufig zu finden ist deklaratives Wissen in Form von Formeln und mathematischen Reaktionsgleichungen, welches keine tiefere chemische Bedeutung für die Lernenden hat (siehe u.a. YARROCH, 1985).

Der Verständnistyp II und die von ANDERSSON (1986) gefundenen Stufe der *Modifikation* gleichen sich ebenfalls. Dabei ist eine Stoffumwandlung z.B. von einem Aggregatzustand in einen anderen durch eine Modifikation des Aussehens (*Gestalt*) charakterisiert: Er führt einige Studien zur Untermauerung dieser Erkenntnis an, darunter auch die von PFUNDT (1982) und MEHEUT, SALTIEL und TIBERGHIE (1983), welche beide Beispiele nennen, in denen die Verbrennung von Alkohol als Gestaltumwandlung von einer Flüssigkeit zu einem Dampf aufgefasst wird. Auch ANDERSSON und RENTSTRÖM (1983) finden diese Vorstellung in abgewandelter Form: Sie fragten Schülerinnen und Schüler, warum ein Kupferrohr schwarz wurde, wenn man es erhitzte. Viele der Probanden antworteten, dass das Kupfer seine Farbe (und damit nur die *Gestalt*) änderte und schwarz wurde, also dass die Flamme sie einfärbte. Dabei ist meist auch ein „Verursacher“ der Reaktion benannt, zum Beispiel ein Bunsenbrenner.

Der Typ der Transmutation ist am ähnlichsten dem Verständnistyp III eines *mentalen Modells* zur Stoffumwandlung. Bei ANDERSSON und RENTSTRÖM (1981) zum Beispiel wird die Gestaltänderung während der Stoffumwandlung von Schülern als Merkmal angeführt, allerdings wird auch auf eine Veränderung der Eigenschaften (z.B. Masse) und somit der *Funktionalität* verwiesen. Damit scheint sowohl der Aspekt der Gestaltänderung als auch der Aspekt der Funktionalitätsänderung ein als wichtig empfundener Teil des *mentalen Modells* zu sein. Es ist allerdings kritisch anzumerken, dass in dieser Studie nicht klar ist, inwieweit die Lernenden beeinflusst wurden, den Aspekt der Gewichtänderung anzusehen, da die Stahlwolle auf einer Waage verbrannt wurde und so das Augenmerk auf das Gewicht gelenkt wurde.

Auch bei BARKER (1994) ist ein dem Verständnistyp III ähnliche Beschreibung eines *mentalen Modells* dokumentiert, wobei die Stoffumwandlung zwar an der *Gestalt* fest gemacht wird, aber auch eine dahinterstehende *Funktionalität* (Reaktion) mit aufgeführt wird:

"The gas formed after the reaction of the tablet hitting the water ... so it wasn't there before the two substances reacted together."

(BARKER, 1994, S. 142)

Tab. 15. Theoretische Verständnistypen *mentaler Modelle* zur *Stoffumwandlung* nach dem Schema 3.9 zusammen mit exemplarischen vergleichbaren Funden in der Literatur.

Modelltyp	Theoretisches Modell	Exemplarische Literatur
Verständnistyp I (nicht-entwickelter Typ)	Die <i>Stoffumwandlung</i> ist als solche nicht bekannt. Es existiert keine (ausgereifte) Vorstellung von Stoffumwandlungen oder ihren Aspekten, außer, dass eventuell deklaratives Wissen genannt wird. Stoffe werden als unveränderlich gesehen.	YARROCH (1985); SHOLLUM (1982); MEHEUT, SALTIEL & TIBERGHIE (1983)
Verständnistyp II (Architekturmodell-Typ)	Die <i>Stoffumwandlung</i> wird primär anhand von ihrer Gestalt und deren Veränderung charakterisiert. Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein.	ANDERSSON & RENSTRÖM (1983); MEHEUT, SALTIEL & TIBERGHIE (1983); PFUNDT (1982)
Verständnistyp III (dualer Typ)	Die <i>Stoffumwandlung</i> wird anhand von ihrer Gestalt und deren Veränderung charakterisiert, aber es ist zusätzlich bekannt, dass die Veränderungen durch Mechanismen zustande kam, die auch eine funktionale Änderung hervorriefen. Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein.	ANDERSSON & RENSTRÖM (1981); BARKER (1994); HESSE & ANDERSSON (1992)
Verständnistyp IV (funktionaler Typ)	Die <i>Stoffumwandlung</i> wird rein funktional gesehen. Die <i>Stoffumwandlung</i> wird mittels ihrer Prinzipien und Funktionsweisen beschrieben. Die Änderungen der Gestalt werden als Nebenprodukte der <i>Stoffumwandlung</i> angesehen.	ANDERSSON & RENSTRÖM (1981); ANDERSSON & RENSTRÖM (1983); HESSE & ANDERSON (1992)

Es ist allerdings festzustellen, dass in den Studien zur Stoffumwandlung häufig nicht darauf eingegangen wird, dass sich die Stoffe auch von ihrer *Funktionalität* her ändern, sondern meist nur die *Gestalt* als wichtiger Aspekt der Schülererklärung beachtet zu werden scheint.

Eine andere qualitative Studie, in der eine Probandin die Eigenschaften ähnlich eines Verständnistyp III ihres früheren *mentalen Modells* reflektiert angibt und dabei auch gleichzeitig Züge eines Verständnistypen IV zeigt, findet sich in der Fallstudie von HESSE und ANDERSSON (1992) wieder. Dabei produzierte die Probandin eine Analogie einer Stoffumwandlung, in der sie die *Funktionalität* mit der beim Kuchenbacken verglich. Als sie gefragt wurde, welche Form von ihren Mitschülern bevorzugt würde (Kuchenanalogie oder mathematische Formel), schätzte sie, dass die Hälfte vermutlich die Kuchenanalogie einer Erklärung durch eine chemische Formel vorziehen würde:

„SUE: Because the second one (the analogy) is like for people who don't know how much **of what elements are involved** so they are just trying their best to think of **how it works**, like we're (the students in the room) doing . . . like we are doing on these papers. . . . The scientists would know how much of what, and I think that they could just look at the formula.“

(HESSE & ANDERSSON, 1992, S. 289, Hervorhebungen hinzugefügt)

Der Grund hierfür ist allerdings nicht unbedingt, dass die *Gestalt* egal ist, sondern aus ihrer Sicht, dass sie oder andere die *Gestalt* der Dinge nur nicht kennen. Auch gibt SUE an, selbst immer eine Veranschaulichung zu brauchen, um zu verstehen, wie Sachen funktionieren, weil sie Chemie sonst schwierig begreift:

„INTERVIEWER: How did you come up with this cake thing?

SUE: I just thought of it . . . you try to think of examples of things . . . for a better understanding . . . it just popped into my mind.

INTERVIEWER: Do you do this a lot? (look for examples)

SUE: Yeah, cause I don't understand things a lot, . . . so I have to do it a lot.“

(HESSE & ANDERSSON, 1992, S. 290)

Das Modellverständnis, welches von Lehrenden meist als akzeptabel beschrieben wird, ist ähnlich eines funktionalen Verständnistyps (IV). Dabei sind die Beschreibungen der Schülerinnen und Schüler – wenn auch selten vorkommend – auf der Interaktion verschiedener Stoffe basierend. Im Zuge dessen sind vor allem die Reaktion selbst - wie sie funktioniert - und die Veränderungen der Eigenschaften (*Funktionalitäten*), wie Masse oder Dichte, das im Vordergrund stehende Merkmal. Zwar ändert sich in vielen Fällen die *Gestalt* ebenfalls, doch wird dies nur noch als grober Hinweis gesehen. Ein relativ gutes Beispiel eines Lernenden, der viele Eigenschaften des Verständnistyps IV zeigt, ist einer der Probanden aus der Studie von HESSE und ANDERSSON (1992). Im Interview gibt er nahezu einzig funktionale Aspekte der Stoffumwandlung wieder und sagt über die Formeln, die er unter anderem richtig erklärt, aus:

„INTERVIEWER: Why is the equation so important?

TOM: I think that it scientifically tells you **what is going on** . . . that's what we learned and that's (the equation) what I wanted to know . . . so I would be able **to explain what is going on** . . .“

(HESSE & ANDERSSON, 1992, S. 287 – 288, Hervorhebungen hinzugefügt)

Mit dem dualen Typ vergleichbare Interpretationen von *mental*en Modellen werden im Zusammenhang mit Stoffumwandlung häufig nur in den Studien angeschnitten, allerdings bietet der Fall von „SUE“ einen überraschend tiefen Einblick in diesen Typ, weil sie ihn scheinbar als Sprungbrett zum Verständnis von „*how [something] works*“ (HESSE & ANDERSSON, 1992, S. 289) benutzt – was eine Charakteristik eines Verständnistypen IV ist. In der Forschung zu beispielsweise *mental*en Modellen der Evolution dagegen sind Merkmale des dualen Verständnistyps öfter zu finden, hauptsächlich vermutlich, weil er dort eher der

Untersuchungsfokus ist. Am Ende stehen jeweils *mentale Modelle*, deren Fokus auf der *Funktionalität* des Modells liegt, wobei bei der Stoffumwandlung die Mathematik verwendet wird, um diese Ideen zu transportieren, in der Evolution aber eher funktionale Beschreibungen anderer Natur vorliegen. Bei beiden wird jedoch die *Funktionalität* als der wichtige Aspekt von Experten angesehen. Die *Gestalt* ist in diesem Zusammenhang eher Ausdruck und Hinweis der *Funktionalität*.

5.3.2 Vorstellungen zu Teilchen

In der Chemie wird wie in der Physik öfters zur Veranschaulichung die Teilchenebene genutzt. Dabei ist anzumerken, dass unter den Begriff *Teilchen* dabei sowohl Atome als auch Moleküle fallen. Zur Erklärung z.B. chemischer Reaktionen oder Eigenschaften oder von Mischungsvorgängen werden dabei *mentale Modelle* zu *Teilchen* gebildet (DERMAN, KOÇAK & EILKS, 2019). Um nicht eine Verwechslung zu bspw. Elementarteilchen in der Elementarteilchenphysik zu begünstigen, wird die in der Chemie gängige Kategorie *Teilchen* in diesem Abschnitt durch *Atome oder Moleküle* beschrieben. Theoretische Charakteristika der Typen I bis IV und vergleichbare Funde in der Literatur können in **Tab. 16.** abgelesen werden.

Die Charakteristik des Verständnistyp I wurde bereits ähnlich bei der Betrachtung der Zelle angesprochen: Das Atom, Molekül oder die Zelle bilden dabei ein Konzept einer „Ureinheit“, genaue Eigenschaften sind nicht bekannt (SEWELL, 2002; ROLAND, 2009). Auch DONOVAN und HÄUSLER (2015) stellen fest, dass vor einer von ihnen designten Lerneinheit nur drei von 18 Kindern das Wort *Atom* schon einmal gehört haben und zwei von diesen konnten angeben, dass Atome sehr klein seien. Ansonsten finden sie keine Vorstellungen vom Konzept des *Atoms*.

Züge des Verständnistyp II *mentaler Modelle* von Atomen und Molekülen sind in der Chemie interessant, da die häufigste erste wirkliche Vorstellung von Teilchen eine gestaltorientierte ist: Dabei wird oft die Problematik aufgedeckt, dass junge Lernende Teilchen als farbige Kugeln betrachten, wobei die Farbe dieselbe ist, die die Teilchen auf der Makroebene als Stoffe innehaben. Dies finden zum Beispiel COKELEZ und DUMON (2005) - wobei hier sogar in der Oberstufe noch Molekülvorstellungen gehalten werden, die als gestaltlich real gesehen werden und bei denen Moleküle als farbige Anordnungen von Kugeln beschrieben werden. Auch kommentieren die Autoren, dass diese Aussagen von Lernenden kamen, die starke Probleme hatten, Modell und Realität auseinanderzuhalten. ALBANESE und VICENTINI (1997) stellen ebenfalls bei ihrer Studie heraus, dass von 30 italienischen Schülerinnen und Schülern 24 angeben, dass Atome und damit Moleküle farbig seien. Auch TALENQUER (2009) stellt diese Problematik heraus, führt aber sogar neben einer bildlichen auch eine olfaktorische und evtl. taktile *Gestalt* (Temperatur) an: Atome und Moleküle riechen wie die Stoffe, die sie bilden und fühlen sich auch genauso „heiß“ oder „kalt“ an. Damit sind bei Teilchenvorstellungen *mentale Modelle*, die teils mehrmodale *Gestalten* haben, in Ansätzen zu finden.

Tab. 16. Postulierte exemplarische Typen *mentaler Modelle* zu *Teilchen (Molekül oder Atom)* nach dem Schema 3.9, zusammen mit Entsprechungen in der Literatur.

Modelltyp	Theoretisches Modell	Exemplarische Literatur
Verständnistyp I (nicht-entwickelter Typ)	Das <i>Molekül oder Atom</i> ist als solches nicht bekannt. Es existiert keine Vorstellung von <i>Atomen, Molekülen</i> oder ihren Aspekten, außer, dass eventuell deklaratives Wissen genannt wird.	SEWELL (2002); ROLAND (2009); DONOVAN & HAEUSLER (2015)
Verständnistyp II (Architekturmodell-Typ)	Die <i>Moleküle oder Atome</i> werden primär anhand von ihrer Gestalt charakterisiert. Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein.	ALBANESE & VICENTINI (1997); COKELEZ & DUMON (2005); TALENQUER (2009)
Verständnistyp III (dualer Typ)	Die <i>Moleküle oder Atome</i> werden anhand von ihrer hohen Gestalt- und Funktionalitätstreue charakterisiert. Dabei kann das <i>mentale Modell</i> verschieden stark differenziert sein.	ANDERSSON (1990); GRIFFITHS & PRESTON (1992); KIKAS (2004)
Verständnistyp IV (funktionaler Typ)	Die <i>Moleküle oder Atome</i> werden mittels ihrer Funktionalität beschrieben. Die Gestalt wird als irrelevant gesehen.	AULT, NOVAK & GOWIN, (1985); TÜMAY (2016); NAKHLEH & SAMARAPUNGAN (1999)

Merkmale des Verständnistyp III *mentaler Modelle* werden häufig als Erweiterung vom Verständnistyp II gefunden; verschiedene Fälle sind dokumentiert, in denen die *Funktionalität* (mögliche Reaktionen usw.) des Stoffes zusammen mit der *Gestalt* genannt wird und somit Lernende glauben, dass sie wüssten, wie Teilchen aussehen und welche potentiellen Verhaltensweisen (*Funktionalität*) sie besitzen. Zum Beispiel zeigt eine Studie von KIKAS (2004), dass fachfremde Lehrer angeben, dass z.B. beim Erwärmen die Moleküle oder Atome sich ausbreiteten, wie es der Stoff im Makroskopischen selbst tut. In diesem Zusammenhang findet sich auch bei ANDERSSON (1990) die Vorstellung, dass Eisenatome sich ausdehnen, wenn sie erhitzt werden, weil Eisen selbst sich dann auch ausdehnt. Es wird in diesem Sinne also ein Teil der makroskopischen *Funktionalität* von Eisen auf das mentale mikroskopische Stoffmodell projiziert. Ein Verständnis, das ebenso Züge des dualen Verständnistyps III zeigt, nennt auch ein Proband der qualitativen Studie von GRIFFITHS und PRESTON (1992). Er beschreibt Moleküle in einem eher skalierten Rahmen, wobei er sich dabei kleine Partikel vorstellt, die durch die Luft schweben und Wärmeteilchen aufsammeln:

“When the steam goes through the air it (molecules) can pick up warm particles . . . and some molecules can pick up more particles than others, so they can weigh differently.”

(GRIFFITHS & PRESTON, 1992, S. 620)

Die Züge des funktionalen Verständnistyps IV sind schließlich jene, die von Experten bevorzugt zu sein scheinen. Im Falle von AULT, NOVAK und GOWIN (1985) beispielsweise wird das abstrakte Verständnis als Essenz des Lernprozesses gesehen und sogar angeführt, dass eine dem Verständnistyp II und III ähnliche Sicht auf *mentale Modelle* genutzt wird, um sich dem abstrakten Kern des Konzeptes *Molekül* zu nähern:

*„The “molecule concept” is of nearly limitless complexity. These analyses of children’s understanding demonstrate that children have the capability of **grasping the abstract meaning of molecules** at some level, though often in terms of **imaginative, unconventional conceptual patterns**.“*

(AULT, NOVAK & GOWIN, 1985, S. 260, Hervorhebungen hinzugefügt)

Auch für TÜMAY (2016) stellt die *Funktionalität* der verschiedenen Atome und Moleküle - vor allem in Anbetracht von *„their properties, and interactions“* (ebd., S.236) – die Haupteigenschaft der Chemie dar. NAKHLEH und SAMARAPUNGAVAN (1999) sehen dies ähnlich:

*„The scientific (kinetic molecular) theory **explains** such phenomena in terms of the **actions** of unseen entities (atoms and molecules) that make up matter.“*

(NAKHLEH & SAMARAPUNGAVAN, 1999, S. 779, Hervorhebung eingefügt)

Somit ist – wenn in den Untersuchungen zu *mental*en Modellen überhaupt angeführt – das Ziel hauptsächlich ein Verständnis von *Funktionalität* von Atomen und Molekülen, was einem Verständnistyp IV nahekommt.

5.4 Entwicklungspsychologische Aspekte

Auch in der Entwicklungspsychologie finden sich einige Parallelen zu den Verständnistypen *mentaler Modelle*, wobei vor allem für eine Betrachtung eventueller Übergänge zwischen den Typen Anhaltspunkte gefunden werden. Einige dieser Aspekte werden im Folgenden angerissen, um auch in diesem Themengebiet zu überprüfen, ob vergleichbare Beobachtungen und Funde existieren, die eine Verallgemeinerung der Typen I-IV jenseits der (Quanten-)Physik plausibel machen. Bei der Betrachtung entwicklungspsychologischer Prozesse ist vermutlich die am besten bekannte Persönlichkeit Jean Piaget. Zwar ist seine Stadien-theorie seit den 70er Jahren eher durch domänenspezifische Kompetenztheorien verdrängt worden (siehe HORST, 2016 oder CAREY, 2009), doch wenn die Stufen Piagets als maximal mögliche Stadien der Entwicklung angesehen werden, bieten sie immer noch einen nützlichen Hinweis darauf, was Lernende in bestimmten Altersstufen in der Lage sind, kognitiv zu leisten. Natürlich ist dabei zu sagen, dass die Stadien-theorie nur eine grobe funktionale Beschreibung ist, die anhand einzelner Fallbeispiele von Piaget erarbeitet wurde (z.B. PIAGET, 1951) und später zusammen mit Inhelder präzisiert wurde (INHEDER & PIAGET, 1958). Vor allem die zu starke Generalisierung vom Alter auf alle Gebiete der kognitiven Entwicklung lassen sich als Kritikpunkte anführen (CROSSLAND, 2017; DONOVAN, HAEUSLER & VENVILLE, 2015; CAREY, 2009; FISCHER & BIDELE, 2006; BIDELE & FISCHER, 1992). Trotzdem sind auch an dieser Stelle starke Parallelitäten zwischen den Charakteristika der Stadien und den Charakteristika der Verständnistypen zu verzeichnen. Darum werden in diesem Abschnitt hauptsächlich Piagetsche Aspekte der Entwicklungspsychologie betrachtet; modernere Sichtweisen auf die Stadien werden aber im Abschluss ebenfalls gegeben.

5.4.1 Stadienmodell der kognitiven Entwicklung nach Piaget

Die vier Stadien können zusammengefasst in **Tab. 17.** abgelesen werden und beschreiben grob verschiedene Etappen, mit denen die kognitive Entwicklung eines Kindes während seines Heranwachsens zu einem jungen Erwachsenen beschrieben werden kann.

Piaget beleuchtet unter anderem den Übergang von einer impliziten Handlung zu einer expliziten mentalen Repräsentation mittels der Nutzung einer Gestalt (*signifier*), die mit der Handlung (*signified*) assoziiert wird, was einer Entstehung eines Gestaltverständnisses (Typ II und folgende Typen) aus dem nichtentwickelten Verständnistyp (Typ I) gleichkommt (siehe auch Kapitel 2).

Dabei wird zunächst nach seiner Ansicht ein (visuelles) Reizmuster imitiert und dann als Repräsentation (*mentales Modell*, vgl. Kapitel 2) internalisiert:

„It is clear from the outset, that the problem of imitation is linked with that of representation [mental models]. Since representation involves the image of an object, it can be seen to be a kind of interiorised imitation, [...]“

(PIAGET, 1951, S. 5)

Tab. 17. Das Stadienmodell nach INHELDER und PIAGET (1958). Zwar stimmt die Alterszuweisung der einzelnen Stufen vor allem in Anbetracht der Domänenspezifität von Wissen nicht, jedoch ist die Abfolge relevant in Anbetracht der Verständnistypen I-IV.

Stadium	Charakteristik
Stadium der sensomotorischen Intelligenz	Reflexbasierte, instinktive Interaktionen mit der Welt. Keine Repräsentationen
Stadium der präoperationalen Intelligenz	Objektpermanenz vorhanden, Nutzung von Symbolen und Bildern zur Kategorisierung
Stadium der konkret-operationalen Intelligenz	Konkret-funktionales Denken. Lösung von konkreten Problemen
Stadium der formal-operationalen Intelligenz	Abstraktes Denken. Lösung von abstrakten Problemen

In seiner Arbeit stellt er im Zuge dessen ausführlich dar, dass von grundlegenden Handlungs-Schemata ausgehend - welche aus impliziten Handlungsmustern (körperlicher *Funktionalität*) bestehen – *mentale Modelle* gebildet werden, die diese sensomotorischen unterbewussten Urfunktionen durch verschiedene Reizmuster (meist visuell) kodieren und das erste Mal dem Bewusstsein zugänglich und handhabbar machen (siehe auch „Modul“ bei HORST, 2016). Dies stellt er vor allem stark während seiner Untersuchung des Spielens bei Kindern fest, welches sich nach seinen Ideen von sensomotorischer Handlung zu symbolischer Handlung oder fantasievoller Handlung entwickelt:

„Play also, especially from the point of „meanings“ can be considered as leading from activity to representation [mental models], in so far as it evolves from its initial stage of motor activity to its second stage of symbolic or imaginative play.“

(PIAGET, 1951, S. 2)

Man mag Piaget dahingehend kritisieren, dass er nur wenige Kinder untersuchte und vieles seiner Theorie einzig aus vernunftgeleiteten Überlegungen herausarbeitete, allerdings sind viele seiner Ideen in der heutigen Forschung besser und ausführlicher empirisch untersucht worden. So entwickelte unter anderem GLENBERG (2010) aus diesen Ansätzen eine elaborierte Theorie der Kognitionsentwicklung aus sensorimotorischen Funktionsmustern (*embodiment framework*) und konnte damit starke Hinweise darauf finden, dass Sprache im Besonderen und mentale *Gestalten* im Allgemeinen aus Handlungen erwachsen. Diese sehr der Piagetschen Schule ähnliche Theorie stützt er mit zahlreichen Argumenten und Studien aus der Evolutionsbiologie, der Philosophie, der kognitiven Linguistik, der *perceptual symbol theory*, handlungsbasierten Theorien, Sozialpsychologie, Neurowissenschaften, klinischer Psychologie und Bildungspsychologie (siehe dazu auch WILSON, 2002). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Schritt von einem Verständnis ähnlich eines Verständnistyps I zu einem Verständnis ähnlich eines Verständnistyp II oder höheren Typen in der Entwicklungspsychologie starke Parallelen zur Entwicklung bedeutungsvoller symbolischer

Repräsentationen aufweist. Dabei ist die größte Überschneidung, dass in beiden Fällen etwas Unbekanntes bzw. Unbewusstes anhand einer *Gestalt* dem Bewusstsein zugänglich gemacht wird – es handelt sich dabei um eine Art der Explikation.

Das Erkennen der *Funktionalität* der Bilder oder beobachteten Phänomene dokumentierte Piaget nur kurz in seinem Kapitel zu ersten Schlussfolgerungen (PIAGET, 1951, S. 230-237). Darin führt er mehrere Beispiele seiner qualitativen Beobachtungen an, in denen Kinder *Gestalten* zur Kommunikation von *Funktionalitäten* nutzten und auch, wie Kinder begannen zu versuchen, die *Funktionalitäten* der Gestaltaspekte ihrer *mental*en Modelle anzuwenden und zu begreifen. So findet sich eine Situation, in der ein Kind einen Eisenstab dadurch definiert, wie er aussieht (*Gestalt* eines „stick“, Piaget, 1951, S.233) und was man damit tun kann (*Funktionalität*, „ob, yes, because it's cold, because it makes music (hitting the ground with it)“, ebd.). Piaget gibt sehr viele andere Beispiele für Vorstellungen, die mit den Eigenschaften eines Verständnistypen III zu entsprechen scheinen, wobei diese immer mehr werden, je älter seine Probanden werden. Zum Beispiel wird Schnee als Wolkenstücke gesehen, die herunterfallen und dann zu Wasser schmelzen. Sowohl das Aussehen scheint somit dabei ein wichtiger Punkt der Repräsentation (des *mental*en Modells) zu sein - sowie auch, welche Eigenschaften es besitzt und was es tut (PIAGET, 1951, S. 254).

Am Ende der Entwicklung des Kindes stand für Piaget die formal operationelle Phase, die durch die Fähigkeit zur Abstraktion gekennzeichnet wird. Dabei ist in dieser Phase möglich, über *Funktionalitäten* schließlich losgelöst von den ursprünglichen *Gestalten* zu reden und dadurch wird der Zugang zu abstrakten Kognitionsmechanismen wie *Problemlösen* oder der *Transfer* von Konzepten auf andere Situationen ermöglicht. Dabei sind die Parallelen zum Verständnistyp IV *mentaler Modelle* äußerst groß.

Zusammenfassend ist über Piagets Stadien zu sagen, dass sich in ihnen die Charakteristiken der vier Typen mentaler Modellverständnisse in vielen Beispielen feststellen lassen. Unter anderem zu finden sind starke Aspekte der Verständnistypen II und III. Dabei scheint das Aufkommen des Typen II vor dem Typen III zu stehen (siehe auch AEBLI, 1968). An letzter Stelle steht auch in Piagets theoretischem Rahmen ein funktionaler Verständnistyp IV. Vor allem ein Entwicklungstrend von Typ-I-Charakteristiken zu Typ-II-Charakteristiken und später zu Typ-III-Charakteristiken beim Verständnis der Repräsentationen ist zu sehen.

5.4.2 Moderne Entwicklungspsychologische Positionen

Piagets Stadien als absolut gültig zu sehen führt nicht zu fruchtbaren Erkenntnissen. So ist eine modernere Interpretation, dass Lernende in der Konzeptentwicklung (Entwicklung zum Verständnistyp IV *mentaler Modelle*) grob durch die Stadien schreiten, allerdings zum Beispiel auch die Stadien 1 bis 3 bei Jugendlichen oder Erwachsenen auftreten können. Die Stadien Piagets werden so nicht als altersabhängige Einheiten gesehen, sondern im Lichte von domänenspezifischem Konzeptverständnis (CAREY, 2009): Die Idee ist hier, dass sich das Verständnis und mit ihm die *mental*en Modelle in unterschiedlichen Domänen quasi losgelöst voneinander mittels Bootstrapping-Prozessen entwickeln. So ist zu vermuten, dass das Alter nur eine grobe Schranke dafür angibt, wie weit sich die *mental*en Modelle vom Typ I bis zum Typ IV entwickeln können und die Vertiefung des Konzeptverständnisses einer bestimmten

Wissensdomäne – in dieser Arbeit primär untersucht am Beispiel des groben Verständnisses der *Atombülle* – ist jeweils individuell vorangeschritten. Inwieweit die Dauern der Stadien daher generalisierbar sind, ist auch in diesem Punkt eher fragwürdig – vor allem, da verschiedene Studien zeigen, dass die kognitive Entwicklung z.B. in wohlhabenderen Haushalten schneller voranschreitet als in weniger wohlhabenden (vgl. z.B. BRADBURY, WALDFOGEL & WASHBROOK, 2019). Die Idee der Handlung als zentraler Aspekt des Lernprozesses spielt allerdings noch nach heutiger Sichtweise eine zentrale Rolle (CAREY, 2009; PETERSON, 1999; GENTNER & MARKMAN, 1997; GENTNER & STEVENS, 1984).

5.5 Neurologische Positionen

Psychometrische Studien wie die unsere sind ein Instrument der Psychologie, was bedeutet, dass sie primär kognitive Phänomene erfassen. Allerdings sind diese kognitiven Phänomene zwingend in neurologischen Mechanismen verwurzelt, so dass es hilfreich ist, nach Studien zu suchen, die Hinweise auf eine solche neurologische Unterstruktur in unserem Fall geben. In diesem Abschnitt wird daher auf einen Aspekt der Neurologie eingegangen, der in einer Studie von LEVY und TREVARTHEN (1976) prominent beleuchtet wird und der Ansätze für eine mögliche neurologische Sichtweise auf die extrahierten Faktoren *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* liefert.

Es geht dabei um Forschungen mit split-brain-Patienten, also Patienten, deren Corpus Callosum – die neuronale Hauptverbindung der beiden Gehirnhälften – durchtrennt ist. Dieser Zustand ermöglicht es, die beiden Gehirnhälften einzeln anzusprechen und Hinweise auf Asymmetrien zu erhalten. Zuvor hatten andere Studien gezeigt, dass die rechte Gehirnhälfte dazu tendiert, eine Spezialisierung auf räumlich-visueller Verarbeitung und dem Erkennen von visuellen Mustern aufzuweisen (BOGEN & GAZZANIGA, 1965; LEVY-AGRESTI & SPERRY, 1968; NEBES, 1971; LEVY, TREVARTHEN & SPERRY, 1972) und die linke Gehirnhälfte sich eher auf Rechenprozesse und Sprachstrukturen spezialisiert (SPERRY, GAZZANIGA & BOGEN, 1969; PANKSEPP, 1998). Die Frage, die bei der Betrachtung dieser Forschungsergebnisse aufkam, war, ob es eine Art „Metakontrolle“ gibt, die bestimmt, welche der Hirnhälften für die Bewältigung einer Denkaufgabe primär benutzt wird. Hinweise darauf hatten LEVY, TREVARTHEN und SPERRY (1972) bereits gesammelt, die darauf hindeuteten, dass der Vorzug einer Hirnhälfte davon abhängt, welche Art der Aufgabe erwartet wird. Sie entwickelten daher ein Experiment, welches testen sollte, welche Art der Erwartung zur jeweiligen Bevorzugung der rechten oder linken Hirnhälfte führte. In ihrer Studie verwendeten LEVY und TREVARTHEN vier split-brain Patienten, deren Corpi Callosa als Maßnahme gegen ihre starke Epilepsie durchtrennt worden waren. Ihnen werden zunächst einige Bilder gezeigt, zu denen sie passende andere Bilder auswählen sollten. Aufgrund vorheriger Studien entschieden sich LEVY und TREVARTHEN dazu, als Auswahlmöglichkeiten je ein Bild mit *visuo-structural similarities* (LEVY & TREVARTHEN, 1976, S. 301) und ein Bild mit *functional-conceptual similarities* (ebd.) zu präsentieren. In einem Probelauf mit 10 Studenten ergänzten alle 10 die jeweiligen gegebenen Bilder mit denen, die auch die Autoren als funktional bzw. strukturell passend bewertet hatten. Beispielhaft sind einige solcher Bildersätze in **Abb. 26.** zu sehen. In einem ersten Versuch zeigte sich, dass bei unspezifischer Aufforderung zur Paarbildung bei dem Test 45 von 48 Bildpaare je ein funktionales Matching durch die linke Hemisphäre und ein strukturelles Matching durch die rechte Hemisphäre geschah. Die anderen 3 Zuordnungen, die nicht diesem Muster entsprachen, führen die Autoren auf eine ungeeignete Itemkombination zurück, die sowohl strukturelle als auch funktionale Ähnlichkeiten aufwies. In einer weiteren Testbatterie untersuchten die Autoren dann, inwieweit die Hirnhälften bei jeweils instruierten funktional orientierten und strukturell orientierten Aufgaben aktiviert wurden. Am Ende schlossen sie aus diesen Experimenten, dass die Ergebnisse starke Hinweise auf „Metakontrollsysteme“ geben, welche je nach erwarteter Aufgabenart die spezialisierte Hirnhälfte primär ansprechen und wenn dies nicht möglich ist, die erwartete Funktion trotzdem – wenn auch ineffektiv - vollführen. Die Studien an split-brain Patienten und den unterschiedlichen Spezialisierungen

der Hemisphären führten schließlich sogar für einen der Experten auf diesem Gebiet – Roger Sperry – zum Nobelpreis 1981 in Physiologie und Medizin.

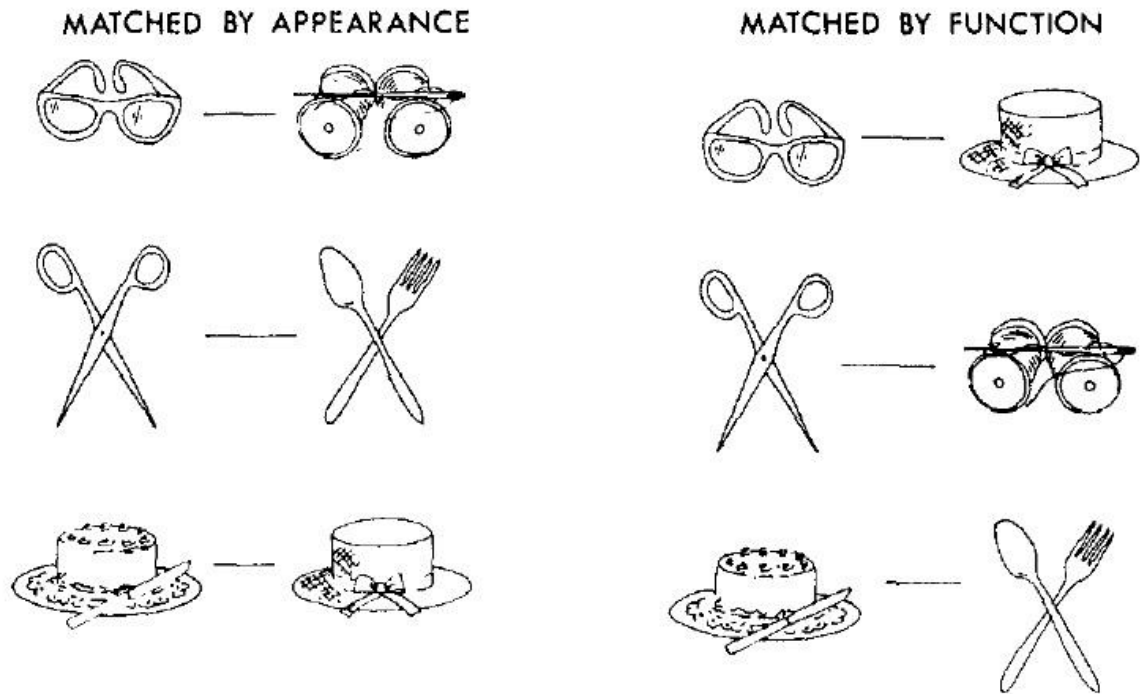


Abb. 26. Jeweils links der Stimulus und rechts das Bild, welches als funktional bzw. strukturell passend festgelegt wurde. Dabei sind strukturell festgelegt die Paare „Sonnenbrille-Nähzeug“, „Schere-Besteck“, „Torte-Sonnenhut“ und funktional festgelegt die Paare „Sonnenbrille-Sonnenhut“, „Schere-Nähzeug“, „Torte-Besteck“ (aus LEVY & TREVARTHEN, 1976, S. 302).

Des Weiteren ist über das Corpus Callosum seit der Studie von LEVY und TREVARTHEN einiges mehr bekannt, auch wenn aufgrund der Komplexität der Hirnstrukturen noch viele Mechanismen im Dunkeln liegen. Eine seiner Aufgaben ist es, die beiden Hirnspezialisierungen aufeinander abzustimmen und die Arbeit mit Strukturen von der rechten Hemisphäre weiterzuleiten und damit die funktionalen Arbeiten der linken Hemisphäre zu starten (siehe für eine Zusammenfassung auch GAZZANIGA, 2005). Eine andere Aufgabe ist, aus einfachen kausalen Reizmustern wie dem visuellen Nachvollziehen von Kollisionsprozessen (*perceptual causality*), die primär durch die rechte Hirnhälfte verarbeitet werden, und dem Nachvollziehen von abstrakten Kausalitätsprozessen durch die linke Hemisphäre (*inferential causality*) ein Kausalitätsverständnis durch interhemisphärische Synthese zu erlangen (siehe ROSER, FUGELANG, DUNBAR, CORBALLIS & GAZZANIGA, 2005). Dabei zeigen ROSER et al., dass das Erkennen von Kausalität mittels der rechten Hemisphäre hauptsächlich auf visuellen-zeitlichen Veränderungen basiert, also dass ein bestimmtes Reizmuster erkannt wurde, welches als „Kausalität“ verstanden wird. Die linke Hemisphäre dagegen reagiert auf abstrakte Kausalitäten wie das Anschalten einer Lampe. Wenn normale Patienten Urteile über ähnliche kausale Phänomene und Prozesse fällen

sollen, so ist eine bilaterale Hirnaktivierung zu beobachten – ein Zusammenspiel der rechten und linken Hirnhälfte (FONLUPT, 2003). Dies weist daraufhin, dass *Kausalität* ein Konzept ist, welches sowohl funktionaler als auch struktureller Verarbeitung bedarf.

Wenn neurologische Aspekte von Denkprozessen untersucht werden, so stellt man bei einem Vergleich schnell fest, dass es viele Parallelen zu den Konstrukten *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* bzw. *Gestalt* und *Funktion* im Zusammenhang mit *mentalen Modellen* gibt. Eine absolut grundlegende Beobachtung kann allein bei der Betrachtung von Neuronenarten erlangt werden. Es gibt drei Typen von Neuronen: Sensorneuronen, welche für die Aufnahme sensorischer Muster sorgen, Motorneuronen, welche für das Ausführen motorischer Aktivitäten verantwortlich sind und Interneuronen, die sensorische Muster auf motorische Muster abbilden und eine Art Steuerungseinheit darstellen (SWANSON, 2012). Im Laufe der Evolution wurden einzelne kleine Neuronengruppen der jeweiligen Funktionen immer weiter ausgebaut und verfeinert, so dass z.B. im Menschen das Sensorische System und das Motorsystem im Nervensystem als Untersysteme vorhanden sind (ebd.). Durch weitere Ausbildung dieser Systeme und die Fähigkeit, mittels des kognitiven Systems das sensorische System zu „simulieren“ (KOSSLYN, GANIS & THOMPSON, 2001; BORST & KOSSLYN, 2008), wurde nach heutigen Theorien die Fähigkeit, *mentale Modelle* zu bilden, entwickelt. Auch die Existenz eines Reiz-Reaktions-Mechanismus (auch als „Module“, „MAPs“ oder „perceptuomotorpatterns“ in der Literatur diskutiert) als Ausgangspunkt eines Bildungsprozesses für *mentale Modelle* wird von vielen Forschern als plausibel angenommen (PETERSON, 2013; HORST, 2016; WILSON, 2002). Dabei ist auch anzuführen, dass die Betrachtung von Sinnen neben dem visuellen sensorischen System dabei zwar nicht so häufig stattfindet, aber dennoch ähnliche Erkenntnisse liefert (HALPERN & ZATORRE, 1999). Es scheint daher auch aus neurologischer Perspektive sinnvoll, *mentale Modelle* durch *Gestalt* (Reizmuster) und nicht durch „Bild“ zu definieren und erneut wird evident, dass zwar visuelle Muster häufige Typen mentaler Modellkodierungen sind, aber nicht ausschließlich.

Auch wird bei bereits gelernten und integrierten *mentalen Modellen* die linken Hemisphären eher aktiviert – wie es in den meisten psychologischen Tests im Zusammenhang mit Erinnerungsaufgaben etc. der Fall ist (vgl. PANKSEPP, 1998; VILLARDITA, GRIOLI & QUATTROPANI, 1988; GOODGLASS, HYDE & BLUMSTEIN, 1969), bzw. die rechte Hemisphäre, wenn *mentale Modelle* neu entstehen. Grob gesagt: je mehr das *mentale Modell* in *Gestalt* und *Funktionalität* ausgeschärft und auf einzelne Funktionen fokussiert wird, desto mehr verschieben sich die zuständigen Gehirnareale von der rechten zur linken Hemisphäre, oder wie PETERSON (1999) es ausdrückt:

„The left hemisphere [...] tends to remain in charge when things – that is, explicitly categorized things – are unfolding according to plan. The right Hemisphere draws rapid, global, valence-based, metaphorical pictures of novel things; the left with its greater capacity for detail, makes such pictures explicit and verbal.“

(PETERSON, 1999, S. 32)

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse aus der neurologischen Literatur darauf hin, dass die Aspekte Struktur (*Gestalt*) und Funktion (*Funktionalität*) eine absolut grundlegende Basis für Denkprozesse bilden und die erhobenen psychometrischen Konstrukte mittels dieser plausibel erklärbar sind.

6 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden zahlreiche Aspekte zu *mental*en Modellen und ihrem Verständnis zusammengefasst, analysiert und evaluiert. In diesem Sinne wird folgend eine kondensierte Übersicht der vorangegangenen Erkenntnisse gegeben und im Zuge dessen werden auch im nächsten Kapitel basierend darauf Thematiken aufgezeigt, die einer weiteren, tiefergehenden interdisziplinären Forschungsarbeit bedürfen. Die zunächst zentrale Aufgabe war es zu definieren, was ein *mentales Modell* ist, um überhaupt eine Kommunikation über (Schüler-) Vorstellungen zu ermöglichen. Nicht nur gibt es geringfügig abweichende, ähnliche Definitionen in verschiedenen Forschungsgebieten, sondern auch wird das, was in dieser Arbeit als *mentales Modell* aufgefasst wird, an mehreren Stellen unter anderem Namen mehr oder weniger scharf beschrieben. Aufgrund dieses Umstandes wurde aus mehreren Quellen eine Arbeitsdefinition erarbeitet, die die wichtigsten Aspekte der jeweiligen Formulierungen zusammenfasst.

Im Sinne dieser Einordnung *mentaler Modelle* wurden die Aspekte *Gestalt* und *Funktionalität* und *Individualität* bzw. später bei dem empirisch untersuchten Verständnis einzelner *mentaler Modelle* die Aspekte *Gestaltstreue* und *Funktionalitätstreue* als zentrale Konstrukte identifiziert. Nach einer kurzen Darlegung dieser Analyse wurden die Forschungen zu *mental*en Modellen im Zusammenhang mit der Quantenphysik dargelegt, wobei das Hauptaugenmerk auf der Betrachtung der *mental*en Modelle zur Atomhülle liegt. Dabei ist festzustellen, dass eine starke kognitive Barriere beim Übergang eines *mental*en Modells auf klassischer Basis (kugelförmiges Teilchen, Bahnbewegung) zu einem *mental*en Modell auf quantenmechanischer Basis (Wellenfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, ...) überall in der Forschung zu finden ist. Ausgehend von dieser Feststellung soll diese Barriere näher untersucht werden, wie es seinerzeit auch LICHTFELDT (1992), BORMANN (1986), BETHGE (1988A) und andere Forscher taten. Im Zusammenhang mit dieser Barriere wird allerdings auch eine weitere Feststellung untersucht, die vielfältig in der Literatur zu *mental*en Modellen der Quantenphysik im speziellen und in der Literatur zu naturwissenschaftlichen Didaktik im allgemeinen häufig zu finden ist: Lernende geben oft an, dass naturwissenschaftliche Modelle Replikat der Realität in *Gestalt* und/oder *Funktionalität* sind (PLUTA, CHINN & DUNCAN, 2011; GROSSLIGHT ET AL., 1991). Einzig die Größe des Modells ist häufig ein Unterschied, den die Lernenden angeben. In diesem Zusammenhang stellte sich die Frage, ob diese Vorstellung mit der kognitiven Barriere zu tun hat, welche die *mental*en Modelle der klassischen Physik oft schwerlich überwindbar macht:

Forschungsfrage 1 (FF1)

Existiert eine nicht vernachlässigbare Korrelation zwischen dem generellen Modellverständnis in Physik (in Form einer Replikatvorstellung) und klassisch geprägten mentalen Modellen zur Atomhülle?

Zur Beantwortung dieser Frage wurde ein Fragebogeninstrument entwickelt, welches sich an MÜLLER (2003) und TREAGUST et al. (2002) orientiert. Damit wurden sowohl die *mental*en

Modelle zur Atomhülle (sowie in geringem Maße zum Magnetismus), als auch das Metaverständnis physikalischer Modelle erhoben. Das Instrument wurde während einer Onlineumfrage von 3108 Probanden benutzt und infolgedessen war eine Datenmenge vorhanden, die eine sinnvolle quantitative Analyse mittels Pearson-Korrelationen ermöglichte. Als Ergebnis dieser Untersuchung wurde eine mittelstarke Korrelation (Bewertung nach HEMPHILL, 2003) zwischen dem Verständnis physikalischer Modelle als Replikat und *den mentalen Modellen* klassischer Natur zur Atomhülle festgestellt:

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Forschungsfrage 1

Es existiert eine nicht vernachlässigbare Korrelation zwischen dem generellen Modellverständnis in Physik (in Form einer Replikatvorstellung) und klassisch geprägten *mentalen Modellen* zur Atomhülle.

Aufgrund der hohen Stichprobe wurden die Daten erneut untersucht, jedoch in diesem Durchgang mittels einer explorativen Faktoranalyse. Dies wurde durchgeführt, um eine eventuelle Tiefenstruktur zu untersuchen, die bei dem Verständnis physikalischer Modelle und der eigenen *mentalen Modelle* der Lernenden eine zusammenfassende Beschreibung bietet.

Forschungsfrage 2 (FF2)

Gibt es eine Tiefenstruktur im Zusammenhang mit dem allgemeinen physikalischen Modellverständnis und den Vorstellungen zur Atomhülle (und dem Magnetismus)?

Es war im Datenmaterial in der Tat eine deutlich ausgeprägte Tiefenstruktur zu finden, die eine Beschreibung mittels zweier Faktoren als die passendste ergab. Die beiden wurden nach inhaltlicher Analyse der Items als *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* benannt.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Forschungsfrage 2

Die *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* beschreiben zusammen die subjektiv empfundene *Realitätstreue* eines (mentalen) Modells.

Eine nähere Betrachtung der beiden Konstrukte ergab, dass beide voneinander nicht signifikant abhängig sind und somit zwei unabhängige Aspekte beim Verständnis/ der Interpretation *mentaler Modelle* beschreiben. Damit ergeben sich bei der Kombination der beiden Faktoren mit jeweils hoher und niedriger Ausprägung vier verschiedene Typen, nach denen das Verständnis eines *mentalen Modells* beschrieben werden kann: Der nicht entwickelte Verständnistyp, der Architektur-Verständnistyp, der duale Verständnistyp, der funktionale Verständnistyp:

1. *Der nicht-entwickelte Verständnistyp (Typ I):* Das *mentale Modell* wird weder als gestaltpreu noch als funktionalitätstreu angesehen. Es wird höchstens deklaratives oder prozedurales Wissen genannt, ohne dieses tiefer zu durchdringen. Das *mentale Modell* wird damit nur als ein bedeutungsloses Reizmuster verstanden. Beispielaussage zu diesem Typen: „Das macht man halt so/ Das ist halt so.“
2. *Der Architektur-Verständnistyp (Typ II):* Das *mentale Modell* wird primär als gestaltpreu gesehen. Das *mentale Modell* wird nicht oder nur gering als funktionalitätstreu verstanden. Dies äußert sich darin, dass das *mentale Modell* statisch ist oder die Funktionalität unwichtig erscheint. Beispielaussage zu diesem Typen: „Das ändert sein Aussehen, ich weiß aber nicht, wieso. Das habe ich schonmal so gesehen, aber ich weiß nicht, wie das funktioniert.“
3. *Der duale Verständnistyp (Typ III):* Das *mentale Modell* wird sowohl als gestaltpreu als auch funktionalitätstreu gesehen. Fälle sind bekannt, in denen für je die *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* ein eigenes *mentales Modell* besteht. Das *mentale Modell* wird dabei als Replikat der Realität – als realitätstreu im Zusammenspiel von *Gestalt* und *Funktionalität* – gesehen. Beispielaussage zu diesem Typen: „Das ist so wie X, nur im Kleinen/Großen.“
4. *Der funktionale Verständnistyp (Typ IV):* Das *mentale Modell* wird primär als funktionalitätstreu gesehen. Das *mentale Modell* wird dabei nur als Träger von *Funktionalität* gesehen und die *Gestalt* ist nebensächlich. Beispielaussage zu diesem Typen: „Ich weiß, dass das nicht so aussieht, aber es hilft mir, Dinge vorherzusagen.“

Aus den erhobenen Daten war festzustellen, dass die meisten der Probanden einen funktionalen oder dualen Verständnistyp besaßen. Einzig bei den Lehrpersonen an der Hochschule und den Lehrpersonen in der Schule, die Physik oder Chemie unterrichten, war ein im Durchschnitt häufigeres Aufkommen des funktionalen Verständnistypen festzustellen.

In Kapitel 4 wurden *mentale Modelle* und das Modellverständnis der Quantenphysik an einigen exemplarischen Fällen näher unter den Aspekten *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* betrachtet. Dabei ist zu bemerken, dass die exemplarisch ausgewählten Forscher Heisenberg, Rutherford, Bohr und Thomson eher die Züge eines Typ IV des (mentalen) Modellverständnisses vorzogen. Es fand sich aber auch eine „Thomsonsche“ Philosophie, die Gestaltbildung als wichtigen Zwischenschritt zu neuen Modellvorstellungen ansieht. Auch wurden einige eigene Modelle haptisch-visueller Natur vorgestellt und an ihnen die beiden Faktoren *Gestalt* und *Funktionalität* erläutert. Damit wurde eine neue Möglichkeit gegeben, quantenmechanischen Ideen in Gestaltform als Hilfen den Lernenden darzubieten und gleichzeitig eine direkte Modellkritik unter den beiden Gesichtspunkten zu geben.

Da die Modellierung mittels der Dimensionen *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue* sowie der vier Verständnistypen nur im Rahmen des Modellverständnisses in der Physik und im Zusammenhang mit *mentalen Modellen* der Atomhülle (und dem Magnetismus) durchgeführt wurde, blieb die Frage nach Verallgemeinerung dieses Modells. Um deshalb festzustellen, ob

sich Charakteristiken der vier Typen auch in der Literatur zu *mentalen Modellen* der Physik im Allgemeinen, der Biologie und der Chemie so oder in vergleichbarer Ausführung finden, wurde in Kapitel 5 eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Es konnten sehr viele solcher Fälle in der betreffenden Fachliteratur gefunden werden – obwohl es in den jeweiligen Studien nicht explizit um diese Charakteristiken ging. Dabei scheinen diese Charakteristiken meist am stärksten in den Interviewausschnitten der jeweiligen Studien durch. In der Chemie ist sogar schon eine eigene Typisierung zum Verständnis von Stoffumwandlungen getätigt worden, die starke Parallelen zu den empirisch erhobenen Verständnistypen aufweisen. In der Biologie wurden bei der Erforschung *mentaler Modelle* häufig sehr junge Probanden befragt und im Zuge dessen wurden oft Parallelen zu den Verständnistypen I und II gefunden. Eine Besonderheit der Biologie war hier, dass auch die Experten im Vergleich zu den anderen Fachrichtungen neben der *Funktionalitätstreue* expliziter die *Gestaltstreue mentaler Modelle* als wichtig empfanden.

Auch das von unter anderem TREAGUST et al. (2002) oft beobachtete Phänomen, dass Lernende (mentale) Modelle als skalierte Replikat der Realität in *Gestalt* und *Funktionalität* sehen, ist immer wieder in den verschiedensten Disziplinen zu finden und wird oft als Problematik für einen Transfer angesehen. Auf allgemeinerer Ebene – in der Entwicklungspsychologie und der Neurologie – sind starke Parallelen zu den vier Verständnistypen zu finden. Vor allem ist es schließlich möglich gewesen, eventuelle neurologische Ursachen aufzuführen.

Nach ausführlicher Sichtung der betreffenden Literatur komme ich daher zu folgendem Schluss:

Zusammenfassung des Literaturvergleichs

Aufgrund der großen Ähnlichkeit vieler Forschungsergebnisse verschiedenster Disziplinen werte ich die beiden Faktoren *Gestaltstreue* und *Funktionalitätstreue* als verallgemeinerbar auf das Verständnis anderer *mentaler Modelle* jenseits der Quantenphysik.

Die Beschreibung des Verständnisses/ der Interpretation/ der Wahrnehmung *mentaler Modelle* unter Verwendung der Begriffe nach den Definitionen in dieser Arbeit mittels der Faktoren *Gestaltstreue* und *Funktionalitätstreue* ist also zumindest aus theoretischer Perspektive ein vielversprechendes Unterfangen. Es ist allerdings auch anzumerken, dass durch diese Beschreibung eine Vielzahl weiterer Forschungsfragen und Implikationen erwachsen. Abschließend werden daher im letzten Kapitel einige dieser Fragen und Implikationen diskutiert.

7 Ausblick

Die empirische Extraktion von vier Typen, die Arten des Verständnisses eines *mentalen Modells* beschreiben, wirft zwingend die Frage auf, ob es einen typischen Ablauf bei der Entwicklung dieses Verständnisses gibt. Die Einordnung der Typen in I bis IV suggeriert diese Entwicklung bereits gewollt und im Vergleich mit ähnlichen Theorien ist sie ebenfalls zu finden. So sind Parallelen zu den Typen II bis IV bei GROSSLIGHT et al. (1991) zu betonen, die diesen implizit als je tieferes Verständnis mittels sukzessiver Reihenfolge zuschreiben. Auch in der Zusammenfassung von Kernideen im Zusammenhang mit *mentalen Modellen* von GRECA und MOREIRA (2000) finden sich als gängige Prozesse das Vorstellen (*envisioning*) und das Simulieren (*running*), ebenso wie in ähnlichem Maße bei AEBLI (1968). Dabei sind dies Schritte, die einen Übergang eines nichtentwickelten Verständnisses zu einem Architekturverständnis bzw. eines Architekturverständnisses zu einem dualen Verständnis nacheinander beschreiben. Es ist also auf jeden Fall belegbar, dass viele in dieser Arbeit zusammengefassten Ideen sich gut mit anderen Befunden vereinbaren lassen. In einem gewissen Rahmen scheint eine sukzessive Entwicklung mentaler Modellverständnisse vom Typen I zum Typen IV hin also eine adäquate Beschreibung zu liefern, auch wenn bei weitem noch nicht klar ist, ob sie *immer* so geschieht. Es ist des Weiteren festzuhalten, dass zu diesem Thema mehr empirische Datenerhebungen vollzogen werden müssen, um diese Hypothese weiter zu überprüfen und zu untersuchen, inwieweit und wann sie zutrifft.

Unter der Annahme, dass Entwicklungen von einem Typen zum nächsten erfolgt, kann ein Versuch unternommen werden, die Entwicklungsschritte zu benennen. Eine Möglichkeit ist die folgende Reihenfolge (siehe auch **Abb. 27**):

1. Erhöhung der *Gestalttreue* („Gestaltbildung“)
2. Erhöhung der *Funktionalitätstreue* („Herausbildung des dualen Typs“)
3. Verminderung der *Gestalttreue* („Abstraktion“)

Zwar muss noch eine genauere Untersuchung dieser Schritte erfolgen, jedoch finden sich auch für diese Prozesse schon viele Entsprechungen in der Literatur. So sprechen GRECA und MOREIRA als erste Voraussetzung für die Bildung eines *mentalen Modells* von der Gestaltbildung, ähnlich wie es auch AEBLI (1968) tut. In der Arbeit von DONOVAN und HAEUSLER (2015) findet sich dieser Schritt ebenfalls als sie versuchten, „*big ideas*“ wie Atome und Moleküle in der Grundschule zu lehren: Sie fanden, dass in Entwicklung aus dem deklarativen Wissen der Lernenden in ihren Gruppen häufig mindestens eine Gestaltbildung erfolgte. Auch der Schritt der Erhöhung der *Funktionalitätstreue* lässt sich in einigen Studien finden, vor allem zur Evolution. Dort ist häufig eine Modifikation von *Gestalttreue* zur *Funktionalitätstreue* zu beobachten (EVANS, 2000). Der letzte Schritt – der Schritt der Abstraktion, der Verknüpfung mehrerer „Wissensinseln“ durch unterliegende *Funktionalität* und eventueller Übertrag auf neue *Gestalten* (Transfer) – ist hingegen der als kognitiv am schwierigsten angesehene und findet - wenn überhaupt - erst in höherem Alter statt (z.B. DISSA, 1988; PIAGET, 1951; ZARKADIS, PAPAGEORGIU & STAMOVLASIS, 2017). Auch zeigt sich ein solches Verständnis meist bei Experten (siehe auch Kapitel 5).

Eine noch zu klärende Frage ist auch, was passiert, wenn die *Funktionalität* nicht mehr ausreicht. Diese pragmatisch orientierte Problematik ist schon von JOHNSON-LAIRD (1983) als Merkmal eines *mentalen Modells* angeführt worden – die stetige Anpassung an neue Informationen. Angenommen zum Beispiel, dass das Planetenmodell als Typ IV oder Typ III ausgeprägt ist. Das bedeutet etwa, dass die Sprünge und die Kreisbewegungen der Elektronen als funktionale Beschreibungen aufgefasst werden. Was geschieht nun aber, wenn dies nicht mehr als adäquat empfunden wird, weil z.B. gelernt wird, dass Elektronen Welleneigenschaften haben? Mit solch einer Problematik beschäftigte sich unter anderem CAREY (2009). In ihrer Forschung beleuchtete sie vor allem, was geschieht, wenn eine *Funktionalität* in einer bestimmten Situation nicht ausreicht. Sie beschreibt dabei, dass sich in solchen Situationen die *Funktionalität* modifiziert und der Lernprozess von Neuem mit dieser neuen *Funktionalität* beginnt. Diese Problematik beschreibt sie mittels eines Bootstrappingprozesses, der eine Erweiterung der *mentalen Modelle* und eine Differenzierung ermöglicht.

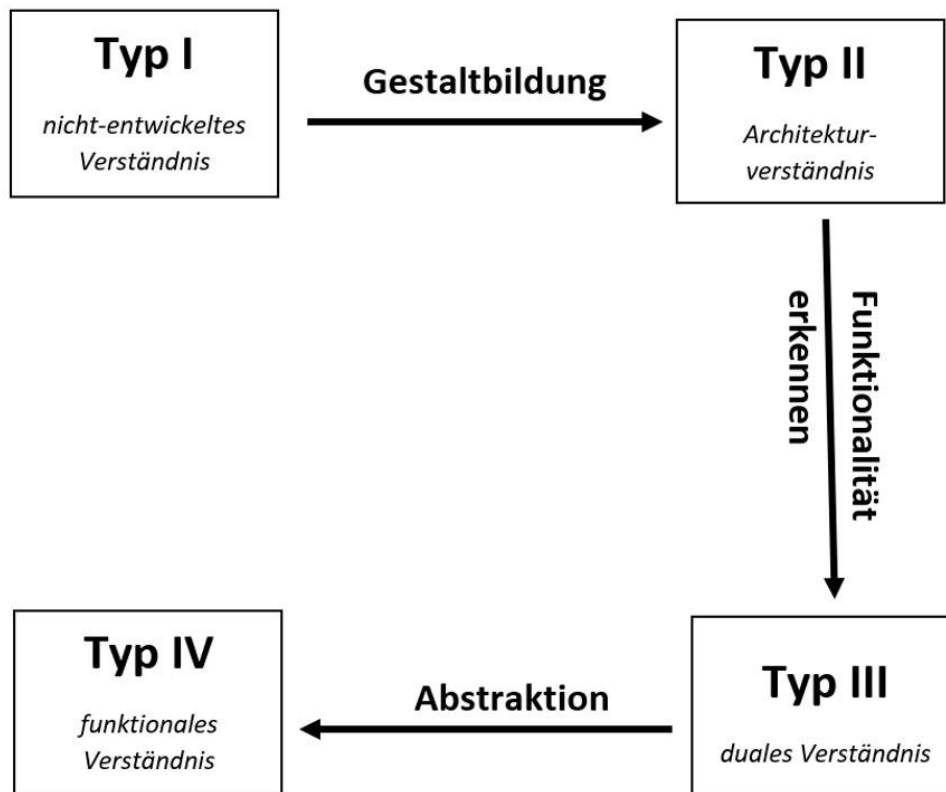


Abb. 27. Hypothetisches Modell der progressiven Verständnisentwicklung durch die Typen I-IV *mentaler Modelle*. Zunächst ist noch kein bedeutungsvolles *mentales Modell* vorhanden, bzw. ein neues Reizmuster wird entdeckt/konfrontiert/imitiert (Typ I). Durch Gestaltbildung wird dann das noch Unbekannte fassbar und anschaulich nahe gemacht und ein Architekturmodell-Typ entsteht (II). Eine *Funktionalität* wird eingebunden und erkundet und der duale Typ entsteht (Typ III). Durch Abstraktion „löst“ sich schließlich die *Funktionalität* von der *Gestalt* und wird transferierbar (Typ IV).

Auch liegt diesem Bootstrappingprozesses nach CAREYS Studien und Ideen ein Satz grundlegender, erblich bedingter MAP(*motivation, action and perception*)-Schemata zugrunde (vgl. auch PETERSON, 1999; HORST, 2016; WILSON, 2002; als ein Beispiel sei das Kindchenschema gegeben, vgl. z.B. ALLEY, 1983), was eine Differenzierung von PIAGETS eher groben Aussagen zu diesem Thema ist. SHTULMAN und VALCARCEL (2012) konnten dazu zeigen, dass die je älteren mentalen Modellformen immer noch vorhanden sind und auf sie aufgebaut wird – sie also nicht ersetzt, sondern nur modifiziert werden.

Wenn das *mentale Modell* einen Großteil der wahrgenommenen *Funktionalitätstreue* verliert, steht also eine Problematik im Raum: Eine neue zufriedenstellende Funktionalität muss nun entwickelt oder entdeckt und in das *mentale Modell* integriert werden. Hierbei gibt es theoretisch zwei denkbare Möglichkeiten (siehe auch **Abb. 28.**):

- (1) Die *Gestalt* wird modifiziert und präzisiert, so dass wieder *Gestalt-* und *Funktionalitätstreue* enthalten sind. (Modifikation des *mentalen Modells*, *conceptual enhancement*)
- (2) Die *Gestalt* wird aufgegeben, ein komplett neues *mentales Modell* entwickelt sich bzw. ein *mentales Modell*, welches für eine adäquate *Funktionalität* bereits existiert, wird anstelle des alten Modells verwendet. (Aufgabe des *mentalen Modells*, *conceptual change*)

Beim Beispiel des *mentalen Modells* eines Atoms lässt sich jeder dieser Fälle in Studien finden: Beim Herstellen des Zusammenhangs von Wellenvorstellungen mit Elektronen wird diesen im Atom häufig eine Sinusbewegung ähnlich des deBroglie Modells entwickelt (z.B. BORMANN, 1986, siehe auch **Abb. 28.**). Dabei wird die *Gestalt* nahezu komplett beibehalten, nur die *Funktionalität* ändert sich bzw. erweitert sich. Auch der andere Fall ist häufig dokumentiert: Das Orbitalmodell entwickelt sich als neues *mentales Modell* (PETRI & NIEDDERER, 1998). Dies wirft allerdings eine Vielzahl weiterer Fragen auf: Ist es eher so, dass Modelle aufgegeben werden oder werden sie eher modifiziert und präzisiert? Aus der Psychologie ist bekannt, dass Modifikationen eines Weltbildes weniger anstrengend sind als fundamentale Änderungen (vgl. PETERSON, 1999), was laut Theorie die erstere Möglichkeit (1) wahrscheinlicher - aber nicht sicher - macht. Nichtsdestotrotz müssen weitere Studien zu diesem Thema konzipiert und durchgeführt werden, um diese Hypothese zu testen. Auch stellt sich die Frage, ob es für Typ III oder IV jeweils leichter ist, das Modell aufzugeben oder zu modifizieren und präzisieren, weshalb auch an dieser Stelle gründlicher geforscht werden muss. Zusammenfassend zeichnet sich anhand der in Kapitel 5 untersuchten Literatur im Zusammenhang mit den Typen eine grobe Modellierung des Verständnisprozesses ab (siehe **Abb. 27.** und **28.**), die allerdings an dieser Stelle noch eher theoretisch ist. Es sei aber angemerkt, dass gängiges, erprobtes Vorgehen beim Anleiten von Verständnisprozessen wie Konzeptwechsel, Anknüpfungen, Umdeutungen und Konfrontationen (DUI, 2007, S.587-595) mit diesem Theorierahmen konsistent ist und diese Aspekte theoretische Hilfen bei den einzelnen Prozessschritten sind.

Die Frage nach dem Alter im Zusammenhang mit der Entwicklung *mentaler Modelle* und ihrer Interpretation steht nach der Analyse der Literatur zu gängigen Konzepten (Kapitel 5) noch im Raum. Es können mehrere grobe Aussagen bereits getroffen werden, jedoch bleibt vieles an dieser Stelle ebenfalls noch Hypothese. Der Typ I von Verständnis eines *mentalen Modells* lässt sich charakteristisch bis in sehr junge Altersstufen (3 Jahre, EVANS, 2000) nachweisen. Über Zeiträume vorher ist nicht viel dokumentiert, vor allem, weil der Spracherwerb meist

noch nicht weit genug fortgeschritten ist. Auch das andere Ende des Spektrums ist zu fassen: Als rein funktional verstandene *mentale Modelle* finden sich eher im Jugendalter oder später, wobei die meisten in dieser Arbeit aufgeführten Fälle sich auf Personen höherer Altersstufen beziehen: Die Verfasser des Hauptteils an Literatur zu Schülervorstellungen zeigen in den Formulierungen, welche sie in ihren Artikeln als „richtige“ Auffassungen darstellen, starke Anzeichen dieses Typen und sie nennen ihn meist als favorisierten Typen des Verständnisses *mentaler Modelle* (siehe Kapitel 5).

Über die Typen II und III ist es dagegen schwieriger, Genaueres zu vermuten. Zwar gab es Fälle, in denen Typ II-Modellverständnisse bei eher jüngeren Kindern häufiger anzutreffen waren, allerdings scheint der Übergang von Typ II zu Typ III oft schnell zu erfolgen und die in Kapitel 5 betrachteten Studien lassen an mehreren Stellen keine nähere Differenzierung der beiden Typen zu. Dies ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass die Studien, die zur Recherche hinzugezogen wurden, oftmals nicht gezielt diesen Aspekt untersuchten, da andere Forschungsziele bei den Erhebungen verfolgt wurden. In diesem Sinne ist es auf jeden Fall notwendig, noch weitere Untersuchungen in den vielfältigen Themengebieten durchzuführen, die hier als Beispiele angeführt wurden. Auch die Entwicklung eines Fragenkatalogs, der auf verschiedene Konzepte anpassbar ist und in den verschiedenen Fächern genutzt werden könnte, ist eine Möglichkeit, zu testen, inwieweit die Modellierung der Interpretation *mentaler Modelle* mittels der Verständnistypen I-IV eine gute Beschreibung liefert.

Auch bleibt fraglich, wie weit sich das Verständnis *mentaler Modelle* überhaupt entwickeln kann. Vor allem domänenspezifische Entwicklungen *mentaler Modelle* machen es schwierig, allgemeingültige Aussagen treffen zu können (CAREY, 2009; SIEGLER, 2007) – die Entwicklungsstufe des Verständnisses *mentaler Modelle* in verschiedenen Domänen zeichnet sich in der Literatur als voneinander teils unabhängig ab. Daher scheint eine weitere Untersuchung der Verständnisdimensionen *mentaler Modelle* in verschiedenen Fächern zur gleichen Zeit angebracht, um genauere Erkenntnisse über eventuelle Domänenspezialisierungen zu erhalten. So könnten zum Beispiel Probanden zusätzlich zu den bereits verwendeten Frageitems (F1-F15) solche bekommen, die z.B. ein Konzept aus der Biologie abdecken. In einem solchen Fall wäre es sicherlich eine Untersuchung wert, ob eine allgemeine *Funktionalitätstreue* und *Gestalttreue* als Cluster festgestellt wird oder jeweils eine gesonderte Ausprägung in den verschiedenen Domänen die bessere Beschreibung liefert.

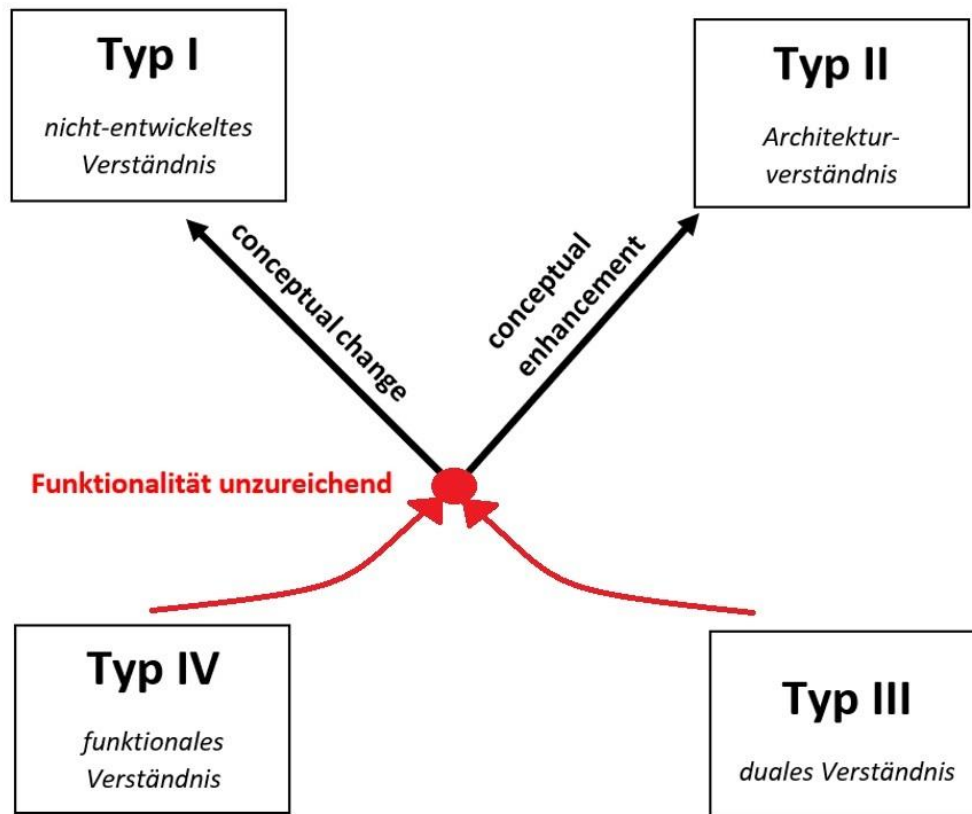


Abb. 28. Wenn das *mentale Modell* keine passende *Funktionalität* vorweist, können hypothetisch zwei Dinge geschehen: Die *Funktionalität* wird modifiziert bzw. präzisiert und damit auch die *Gestalt* (*conceptual enhancement*) oder das *mentale Modell* wird aufgegeben und ein neues entsteht (*conceptual change*).

Auch die Übergänge der verschiedenen Typen selbst bedürfen auf jeden Fall einer genaueren Untersuchung. Es ist zum Beispiel in einem ersten Schritt zu klären, durch welche Mechanismen die Empfindung der *Gestalttreue* erhöht wird. Zwar gibt es in der Theorie einige Ansätze, die darauf hinweisen, dass diese Gestaltbildung (im Sinne von modalen Mustern) *mentaler Modelle* auf Basis von instinktiven oder imitierten Handlungsmustern ausgehend erfolgt (PIAGET, 1959; WILSON, 2002; CAREY, 2009; GLENBERG, 2010; PETERSON, 2013), allerdings sind weitere detailreichere Untersuchungen in der Didaktik durchzuführen, die diesen häufig beobachteten Mechanismus näher beschreiben.

Ein besonderes Augenmerk muss hier auch auf den letzten Schritt gelegt werden - auf den Übergang vom dualen Typ (Typ III) zum funktionalen Typ (Typ IV) eines mentalen Modellverständnisses. Da die Empfindung der *Gestalttreue* in diesem Schritt theoretisch abnimmt und sich damit eine Loslösung von der *Gestalt* vollzieht, ist die Beschreibung dieses Prozesses als „Abstraktion“ gewählt. Es ist erforschenswert, ob erst mit diesem Schritt die Fähigkeit des Transfers der im *mentalen Modell* kodierten Idee ermöglicht wird. Auch zu untersuchen ist, inwieweit es bei diesem Prozess hilft, andere *mentale Modelle*, die dieselben wichtigen Funktionen wie die zu abstrahierenden enthalten, zur Abstraktionshilfe bewusst hinzuzuziehen (bzw. hinzuzugeben). Eventuell gibt dabei auch eine Zuhilfenahme *mentaler*

Modelle, welche durch Reizmuster anderer Modalitäten kodiert sind, eine mögliche Förderung des Abstraktionsprozesses. Des Weiteren zeigt die Analyse der Vielzahl an Studien zu Schülervorstellungen in Kapitel 2.2 und 5, dass in den meisten Fällen der funktionale Typ eines *mental*en *Modells* – und damit der Schritt der Abstraktion - erst gar nicht erreicht wird. Dies könnte eventuell mit der häufig beobachteten Fragmentierung von Wissen während des Lernprozesses übereinstimmen: Häufig wird beobachtet, dass in „Inseln“ gelernt wird, die aber nicht in einem Gesamtrahmen verbunden sind. Dabei sind die „Inseln“ nach DISESSA (1988, siehe auch DISESSA, 2017) kleine situationale Fragmente: Lernende haben für verschiedene Situationen funktionale Beschreibungen, die sie isoliert voneinander abrufen. Je mehr die Inseln in einen konzeptuellen Rahmen gegossen werden, desto tiefer ist das Verständnis nach der Theorie zu *knowledge in pieces*.

Eine weitere Frage, welche sich im Rahmen der Klassifizierung *mentaler Modelle* durch die vier Typen ergibt, ist die Frage nach der Vollständigkeit der Typisierung: Gibt es noch andere Dimensionen neben *Gestalttreue* und *Funktionalitätstreue*, die zu einer vollständigen Klassifizierung des Verständnisses *mentaler Modelle* notwendig sind? Zwar scheint die Beschreibung mittels der Typen I bis IV in Hinsicht auf die Arbeitsdefinition eines *mental*en *Modells*, die in Kapitel 2 herausgearbeitet wurde, die groben Aspekte abzudecken, doch dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Arbeitsdefinition teils aus den Untersuchungsergebnissen erwuchs. Es ist daher nicht ausgeschlossen, dass noch andere wichtige Faktoren eine Rolle bei der Beschreibung und Klassifizierung des Verständnisses *mentaler Modelle* spielen.

Die in dieser Arbeit dargestellte Forschung zum Verständnis *mentaler Modelle* bietet neben einer zusammenfassenden Beschreibung von Lernprozessen auf kognitionspsychologischer Ebene sicherlich auch viele neue Ansätze zur tieferen Analyse dieser Prozesse. Die hier gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass wir zurzeit noch eher am Anfang der Erforschung von Verständnisprozessen stehen.

8 Literaturverzeichnis

ABDO, K., & TABER, T. S. (2009). Learners' Mental Models of the Particle Nature of Matter: A Study of 16-year-old Swedish science students. In *International Journal of Science Education*, **31**(6), 757–786.

AEBLI, H. (1968). *Psychologische Didaktik* (3. Auflage). Stuttgart: Klett.

ALBANESE, A., & VICENTINI, M. (1997). Why do we believe that an atom is colourless? Reflections about the teaching of the particle model. In *Science and Education*, **6**(3), 251-261.

ALLEY, T. R. (1983). Infantile head shape as an elicitor of adult protection. In: *Merrill-Palmer Quarterly*, **29**(4), 411–427.

AMIN, T. G., SMITH, C., & WISER, M. (2014). Student Conceptions and Conceptual Change: Three Overlapping Phases of Research. In N. Lederman & S. Abell (Hrsg.): *Handbook of Research in Science Education*. New York: Routledge. Vol. II. Chapter: 4

ANDERSSON, B., & RENSTRÖM, L. (1981) *Oxidation of steel-wool*. Göteborg: University of Göteborg, Department of Education. (Report ELEVPERSPEKTIV, Nr 7)

ANDERSSON, B., & RENSTRÖM, L. (1983). *How Swedish pupils, age 12-15, explain the copperpipe problem*. EKNA-group, Department of Education and Educational Research, University of Goteborg. Box 1010, S-431 26 Molndal, Sweden.

ANDERSSON, B. (1986), Pupils' explanations of some aspects of chemical reactions. In *Science Education*, **70**, 549-563.

ANDERSSON, B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations. In *Studies in Science Education*, **18**, 53-85.

ANDRADE, E. N. da C. (1964). *Rutherford and the nature of the atom*. New York: Doubleday.

AULT, C. R., NOVAK, J. D., & GOWIN, D. B. (1985). Constructing vee maps for clinical interviews on molecule concepts. In *Science Education*, **68**(4), 441-462.

AVRIN, J. (2012). Knots on a Torus: A model of the Elementary particles. In *Symmetry*, **4**, 39–115.

BÄUERLE, H. G., & HARREIS, H. (1980). Wissen und Vorstellungen von VHS-Hörern über ausgewählte Themen aus dem Bereich der Atomphysik/ Kernphysik. In *Lernzielorientierter Unterricht*, **3**, 1ff.

BANET, E., & AYUSO, G. E. (2003). Teaching of biological inheritance and evolution of living beings in secondary school. In *International Journal of Science Education*, **25**, 373–407.

- BARKER, V. (1994). *A longitudinal study of 16 - 18 year old students' understanding of basic chemical ideas*. New York: University of York. Dissertation.
- BAYER, H.-J. (1985). Schülervorstellungen über das Atom in der Sekundarstufe II. In Mikelskis, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie*. Kiel: Leuchtturm. 265-267.
- BAYER, H.-J. (1986). Schülervorstellungen beim Übergang vom Bohrschen zum wellenmechanischen Modell. In Kuhn, W. (Hrsg.): *Vorträge der DPG, Gießen 1986*, 249-256.
- BETHGE, T. (1988a). Empirische Untersuchungen über Schülervorstellungen zur Quantenphysik. In Kuhn, W. (Hrsg.): *Vorträge der DPG, Gießen 1988*, 249-254.
- BETHGE, T. (1988b). *Aspekte des Schülervorverständnisses zu grundlegenden Begriffen der Atomphysik. Eine empirische Untersuchung in der Sekundarstufe II*. Bremen: Universität Bremen. Dissertation.
- BIDELL, T. R., & FISCHER, K. W. (1992). Beyond the stage debate: Action, structure, and variability in Piagetian theory and research. In R. Sternberg & C. Berg (Hrsg.): *Intellectual development*. New York: Cambridge University Press. 100-140.
- BIRBAUMER N., & SCHMIDT R. F. (2006). Kognitive Funktionen und Denken. In Schmidt F., Schaible H. G. (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie. Springer-Lehrbuch*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- BISHOP, B. A., & ANDERSON, C. W. (1990). Student conceptions of natural selection and its role in evolution. In *Journal of Research in Science Teaching*, **27**, 415–427.
- BIZZO, N. M. V. (1994). From down house landlord to Brazilian high school students: What has happened to evolutionary knowledge on the way. In *Journal of Research in Science Teaching*, **31**, 537–556.
- BOGEN, J. E., & GAZZANIGA, M. S. (1965). Cerebral commissurotomy in man — minor hemisphere dominance for certain visuospatial functions. In *Journal of Neurosurgery*, **23**, 394–399.
- BOHR, N. (1913a). On the Constitution of Atoms and Molecules, Part I. In *Philosophical Magazine*, **26**, 1–25.
- BOHR, N. (1913b). On the Constitution of Atoms and Molecules, Part II Systems Containing Only a Single Nucleus. In *Philosophical Magazine*, **26**, 476–502.
- BOHR, N. (1913c). On the Constitution of Atoms and Molecules, Part III Systems containing several nuclei. In *Philosophical Magazine*, **26**, 857–875.
- BORGES, A. T., & GILBERT, J. K. (1998). Models of magnetism. In *International Journal of Science Education*, **20**(3), 361-378.

- BORMANN, M. (1986). Das Schülervorverständnis zu Elektronen. In Kuhn, W. (Hrsg.): *Vorträge der DPG, Gießen 1986*, 227-232.
- BORN, M. (1926). Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. In *Zeitschrift für Physik*, **37**(12), 863-867.
- BORST, G., & KOSSLYN, S. M. (2008). Visual mental imagery and visual perception: structural equivalence revealed by scanning processes. In *Memory & Cognition*, **36**(4), 849-862.
- BORTZ, J. (1999). *Statistik für Sozialwissenschaftler* (5. Auflage). Berlin: Springer.
- BOUJEMAA, A., PIERRE, C., SABAH, S., SALAHEDDINE, K., JAMAL, C., & ABDELLATIF, C. (2010). University students' conceptions about the concept of gene: Interest of historical approach. In *US-China Education Review*, **7**(2), 9-15.
- BRADBURY, B., WALDFOGEL, J. & WASHBROOK, E. (2019). Income-Related Gaps in Early Child Cognitive Development: Why Are They Larger in the United States Than in the United Kingdom, Australia, and Canada? In *Demography*, **56**, 367-390.
- BROOKES, D. T., & ETKINA, E. (2007). Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning. In *Physical Review Physics Education Research*, **3**, 010105.
- BÜHNER, M. (2011). *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (3. Auflage). Halbergmoos: Pearson.
- BURGE, T. (2009). Five theses on de re states and attitudes. In Almog J. & Leonardi P. (Hrsg.): *The Philosophy of David Kaplan*. Oxford, UK: Oxford University Press. 246–324.
- CAO, Y., & BRIZUELA, B. M. (2016). High school students' representations and understandings of the electric field in use of arrow diagrams. In *Physical Review Physics Education Research*, **12**(2), 020102.
- CAREY, S. (2009). *The Origin of Concepts*. Oxford: Oxford University Press.
- CHADWICK, J. (1932). Possible Existence of a Neutron. In *Nature*, **129**, 312.
- CHARLET-BREHELIN D. (1998). *Contribution à l'enseignement -apprentissage du concept d'atome au college*. Montpellier: Université Montpellier II. Dissertation.
- CLEFF, T. (2015). *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, SPSS und STATA* (3. Auflage). Wiesbaden: Gabler.
- COMPTON, A. H. (1923). A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements. In *Physical Review*, **21**(5), 483–502

- COKELEZ, A., & DUMON, A. (2005). Atom and molecule: upper secondary school French students' representations in long-term memory. In *Chemistry Education Research and Practice*, **6**(3), 119-135.
- COKELEZ, A. (2012). Junior High School Students' Ideas about the Shape and Size of the Atom. In *Research in Science Education*, **42**(4), 1-14.
- CRAIK, K. (1943). *The Nature of Exploration*. Cambridge: Cambridge University Press.
- CROSSLAND, J. (2017): Optimal Learning in Schools - Theoretical Evidence: Part 2 Updating Piaget. In *School Science Review*, **98**(364), 77-83.
- DAGHER, Z. R., & BOUJAOUDE, S. (1997). Scientific views and religious beliefs of college students: The case of biological evolution. In *Journal of Research in Science Teaching*, **34**, 429–445.
- DANGUR, V., AVARGIL, S., PESKIN, U., & DORI, J. Y. (2014). Learning quantum chemistry via a visual-conceptual approach: students' bidirectional textual and visual understanding. In *Chemistry Education Research and Practice*, **15**, 297-310.
- DEMASTES, S. S., SETTLAGE, J., & GOOD, R. (1995). Students' conceptions of natural selection and its role in evolution: Cases of replication and comparison. In *Journal of Research in Science Teaching*, **32**(5), 535-550.
- DERMAN, A., KOÇAK, N., & EILKS, I. (2019). Insights into Components of Prospective Science Teachers' Mental Models and Their Preferred Visual Representations of Atoms. In *Education Sciences*, **9**(2), 154-182.
- DJANETTE, B., & FOUAD, C. (2014). Determination of university students' misconceptions about light using concept maps. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **152**, 582-589.
- DIKMENLI, M., CARDAK, O., & KIRAY, S. A. (2011). Science Student Teachers' Ideas about the 'Gene' Concept. In: *Procedia Social and Behavioral Sciences*, **15**, 2609–2613.
- DISESSA, A. A. (1988): Knowledge in pieces. In G. Forman, P.B. Pufall (Hrsg.): *Constructivism in the computer age*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- DISESSA, A. A. (2017). A Friendly Introduction to “Knowledge in Pieces”. Modeling Types of Knowledge and Their Roles in Learning. In G. Kaiser, H. Forgasz, M. Graven, A. Kuzniak, E. Simmt, B. Xu (Hrsg.): *Invited lectures from the 13th International Congress on Mathematical Education*. New York NY: Springer Berlin Heidelberg (ICME-13 Monographs). 65–84.
- DONOVAN, J., & HAEUSLER, C. (2015). Developing scientific literacy: Introducing primary aged children to atomic-molecular theory. In E. de Silva (Hrsg.), *Cases on research-based teaching methods in science education*. Hershey, PA: IGI Global. 30-63.

- DONOVAN, J., HAEUSLER, C., & VENNVILLE, G. (2015). Making Meaning with Models. In *International Journal of Multidisciplinary Research*, **2**(2), 1-18.
- DREYFUS, A., & JUNGWIRTH, E. (1988) The cell concept of 10th graders: curricular expectations and reality, In *International Journal of Science Education*, **10**(2), 221-229.
- DREYFUS, A., & JUNGWIRTH, E. (1989). The pupil and the living cell: a taxonomy of dysfunctional ideas about an abstract idea. In *Journal of Biological Education*, **23**(1), 49-55.
- DRIVER, R., & EASLEY, J. A. (1978). Pupils and paradigms: A review of literature related to concept development in adolescent science students. In *Studies in Science Education*, **5**, 61-84.
- DUIT, R. (2007). Alltagsvorstellungen und Physik lernen. In E. Kircher, R. Girwidz, & P. Häußler (Hrsg.): *Physikdidaktik – Theorie und Praxis*. Berlin: Springer. 581-606.
- DUTKE, S. (1994). Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens. Kognitionspsychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie. In M. Frese & H. Oberquelle (Hrsg.): *Arbeit und Technik: Praxisorientierte Beiträge aus Psychologie und Informatik*, Bd. 4. Göttingen: Verlag für angewandte Psychologie.
- DZIUBAN, C. D., & SHIRKEY, E. C. (1974). When is a correlation matrix appropriate for factor analysis? Some decision rules. In *Psychological Bulletin*, **81**(6), 358-361.
- EATON, J., HARDING, T., & ANDERSON, C.W. (1985). *Light: A teaching module Institute for Research on Teaching*. East Lansing, Michigan: Michigan State University.
- EINSTEIN, A. (1905). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. In *Annalen der Physik*, **322**(8), 549–560.
- ENGELHARDT, P., & WIESNER, H. (1986). Unterricht über Quantenphysik – Anspruch und Realität. Zum Stand der Schülerkenntnisse in der Quantenmechanik. In: Kuhn, W. (Hrsg.): *Vorträge der DPG, Gießen 1986*, 237ff.
- EVANS, E. M. (2000). The emergence of beliefs about the origins of species in school-age children. In *Merrill-Palmer Quarterly: A Journal of Developmental Psychology*, **46**, 221–254.
- EVANS, E. M. (2005) Teaching and learning about evolution. In J. Diamond (Hrsg.): *The virus and the whale: Explore evolution in creatures small and large*. Arlington, VA: NSTA Press.
- EVANS, E. M. (2008). Conceptual change and evolutionary biology: A developmental analysis. In: S. Vosniadou (Hrsg.): *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY: Routledge. 263-294.

EVANS, E. M., MULL, M., & POLING, D. (2001). Confronting the existential questions: Children's understanding of death and origins. In *Biennial Meeting of the Society for Research In Child Development*, Minneapolis, MN.

EVE, A. S. (1939). *Rutherford*. New York: Macmillan.

FEDELE, B., MICHELINI, M., & STEFANEL A. (2005). 5-10 year old pupils explore magnetic phenomena in Cognitive Laboratory (CLOE). In: Pint, R., Couso, D. (Hrsg.): *Cresiks*. Udine: University of Udine. Kapitel 2.1.

FENNER, A. (2013). *Schülervorstellungen zur Evolutionstheorie, Konzeption und Evaluation von Unterricht zur Anpassung durch Selektion*. Gießen: Justus-Liebig-Universität. Dissertation.

FERRARI, M., & CHI, M. T. H. (1998). The nature of naive explanations of natural selection. In *International Journal of Science Education*, **20**(10), 1231–1256.

FIELD, A. P. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics: And sex and drugs and rock 'n' roll* (4. Auflage). Los Angeles: Sage.

FISCHER, E. P. (2012). *Niels Bohr – Physiker und Philosoph des Atomzeitalters*. München: Siedler.

FISCHER, K. W., & BIDELE, T. R. (2006). Dynamic development of action and thought. In R. M. Lerner (Hrsg.): *Handbook of child psychology. Vol 1: Theoretical models of human development* (6. Auflage). New York: Wiley. 313-399.

FIXIONE, M., & LIETO, A. (2013). Representing Non Classical Concepts in Formal Ontologies: Prototypes and Exemplars. In Lai, C., Semeraro, G. & Vargiu, E. (Hrsg.): *New Challenges in Distributed Information Filtering and Retrieval*. Berlin/ Heidelberg: Springer.

FLORES, F., TOVAR, M. E. & GALLEGOS, L. (2003) Representation of the cell and its processes in high school students: An integrated view. In *International Journal of Science Education*, **25**(2), 269-286.

FONLUPT P. (2003). Perception and judgement of physical causality involve different brain structures. In *Cognitive Brain Research*, **17**, 248–254.

FORJAN, M., & Sliško, J. (2014). Simplifications and Idealizations in High School Physics in Mechanics: A Study Of Slovenian Curriculum And Textbooks. In *European Journal of Physics Education*, **5**(3), 20-31.

FRERICHS, V. (1999). *Schülervorstellungen und wissenschaftliche Vorstellungen zu den Strukturen und Prozessen der Vererbung – ein Beitrag zur Didaktischen Rekonstruktion*. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.

FRISCH, O. R. (1972). *The nature of matter*. London: Thames and Hudson.

- FYTTAS, G. KOMIS, V., & RAVANIS, K. (2013). Ninth grade students' mental representations of the refraction of light: didactic implications. In *Revista Mexicana de Fisica E*, **59**(2), 133–139.
- GALILI, I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. In *International Journal of Science Education*, **18**, 847–868.
- GALILI, I., & HAZAN, A. (2000). Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. In *International Journal of Science Education*, **22**(1), 57-88.
- GAZZANIGA, M. (2005). Forty-five years of split-brain research and still going strong. In *Nature Reviews Neuroscience*, **6**(8), 653-659.
- GELMAN, S. A. (2003). *The essential child: Origins of essentialism in everyday thought*. Oxford: Oxford University Press.
- GENTNER, D., & STEVENS, A. L. (1984). *Mental models*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- GENTNER, D., & MARKMAN, A. B. (1997). Structure Mapping in Analogy and Similarity. In *American Psychologist*, **52**(1), 45-56.
- GERICKE, N. M., & HAGBERG, M. (2007). Definition of historical models of gene function and their relation to students' understanding of genetics. In *Science & Education*, **16**, 849-881.
- GERICKE, N. (2008). *Multiple models in genetics - The depiction of gene function in upper secondary textbooks and its influence on students' understanding*. Karlstad: Karlstad University Studies.
- GERSTEIN, M. B., BRUCE C., ROZOWSKY J. S., ZHENG D., DU J., KORBEL J. O., EMANUELSSON O., ZHANG Z. D., WEISSMAN S., & SNYDER M. (2010). What is a gene, post-ENCODE? History and updated definition. In *Genome Research*, **17**(6), 669-681.
- GIBSON, J. J. (1966). *The Senses Considered as Perceptual Systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- GIBSON, J. J. (1977). The theory of affordances. In Shaw, R. & Bransford, J. (Hrsgs.): *Perceiving, Acting, and Knowing: Toward an Ecological Psychology*. Hillsdale NJ: Erlbaum.
- GIBSON, J. J. (1979). *An ecological approach to visual perception*. New York: Lawrence Erlbaum.
- GILBERT, J. K., Osborne R.J., & Fensham P.J. (1982). Children's science and its consequences for Teaching. In *Science Education*, **66**, 623-633.
- GILBERT, J. K., & Swift D. J. (1985). Towards a Lakatosian analysis of the Piagetian and the alternative conceptions research programs. In *Science Education*, **69**, 681-696.
- GLENBERG, A. M. (2010). Embodiment as a unifying perspective for psychology. In *Wires Cognitive Science*, **1**(4), 586-596.

GÖRITZ, G., & WIESNER, H. (1984). Wie verstehen die Schüler die Probleme der Quantenmechanik? In *Praxis der Naturwissenschaften – Physik*, **33**(3), 90-92.

GOLDBERG, F. M., & MCDERMOTT, L. C. (1986). Student difficulties in understanding image formation by a plane mirror. In *The Physics Teacher*, **24**, 472-480.

GOODGLASS, H., HYDE M. R., & BLUMSTEIN, S. (1969). Frequency, picturability and availability of nouns in aphasia. In *Cortex*, **5**(2), 104-119.

GORSUCH, R. L. (1983). *Factor analysis* (2. Auflage). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

GRECA, I. M., & MOREIRA, M. A. (1997). The kinds of mental representations - models, propositions and images - used by college physics students regarding the concept of field. In *International Journal of Science Education*, **19**(6), 711-724.

GRECA, I. M., & MOREIRA, M. A. (2000). Mental models, conceptual models, and modelling. In *International Journal of Science Education*, **22**(1), 1-11.

GRECA, I. M., & FREIRE, O. (2003). Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics? In *Science & Education*, **12**(5-6), 541–557.

GRIFFITHS, A. K. & PRESTON, K. R. (1992). Grade-12 Students' Misconceptions Relating to Fundamental Characteristics of Atoms and Molecules. In *Journal of Research in Science Teaching*, **29**(6), 611-628.

GROSSLIGHT, L., UNGER, C., JAY, E., & SMITH, C. (1991). Understanding models and their use in science: conceptions of middle and high school students and experts. In *Journal of Research in Science Teaching*, **28**(9), 799–822.

GRUSCHE, S. (2016). Präkonzepte zur Projektion eines unscharfen Bildes mit einer Linse. In *PhyDid B - Tagungsband der DPG-Frühjahrstagung (Didaktik der Physik)*.

GUESNE, E., SERE, M. G., & TIBERGHEN, A. (1983). Investigations on childrens' conceptions in physics: Which method for which result? In H. Helm and J.D. Novak. (Hrsg.). *Proceedings of an International Seminar on Miconceptions in Science and Mathematics*. Cornell University, Ithaca, New York, 420–426.

GUISASOLA, J., ALMUD, J. M., & ZUBIMEND, J. L. (2004). Difficulties in Learning the Introductory Magnetic Field Theory in the First Years of University. In *Science Education*, **88**, 443–464.

- HALPERN, A. R., ZATORRE R. J. (1999). When that tune runs through your head: A PET investigation of auditory imagery for familiar melodies. In *Cerebral Cortex*, **9**, 697–704.
- HARRISON, A. G., & TREAGUST, D. F. (1996). Secondary Students' Mental Models of Atoms and Molecules: Implications for Teaching Chemistry. In *Science Education*, **80**(5), 509-534.
- HARTAS, D. (2010). *Educational research and inquiry: Qualitative and quantitative approaches*. London, New York: Continuum.
- HAŞILOĞLU, M. A., & EMİNOĞLU, S. (2017). Identifying Cell-related Misconceptions among Fifth Graders and Removing Misconceptions Using a Microscope. In *Universal Journal of Educational Research*, **5**(12B), 42-50
- HEILBRONN, J.L. (2003). *Ernest Rutherford and the Explosion of Atoms*. New York: Oxford University Press.
- HEISENBERG, W. (1969/2015). *Der Teil und das Ganze* (ungekürzte Taschenbuchausgabe, 12. Auflage). München/Berlin: Piper.
- HEMPHILL, J.F. (2003). Interpreting the Magnitudes of Correlation Coefficients. In *American Psychologist*, **58**(1), 78-79.
- HESSE, III, J. J., ANDERSON, C. W. (1992). Students' Conceptions of Chemical Change. In: *Journal of Research in Science Teaching*, **29**(3), 277-299.
- HEUSLER, S., & UBBEN, M. (2019a). A Haptic Model for the Quantum Phase of Fermions and Bosons in Hilbert space Based on Knot Theory. In *Symmetry*, **11**(3), 426-436.
- HEUSLER, S., & UBBEN, M. (2019b). A Haptic Model of Entanglement, Gauge Symmetries and Minimal Interaction Based on Knot Theory. In *Symmetry*, **11**(11), 1399ff.
- HEUSLER, S., & UBBEN, M. (2018). Modeling spin. In *European Journal of Physics*, **39**(6), 065405.
- HEYWOOD, D. S. (2005). Primary trainee teachers' learning and teaching about light: Some pedagogic implications for initial teacher training. In *International Journal of Science Teaching*, **27**(12), 1447–75.
- HORST, S. (2016). *Cognitive Pluralism*. Cambridge: The MIT Press.
- HUBBER, P. (2006). Year 12 students' mental models of the nature of light. In *Research in Science Education*, **36**, 419-439.
- INHELDER, B., & PIAGET, J. (1958). *The growth of logical thinking from childhood to adolescence*. New York: Basic Books.

- IRESON, G. (1999). A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena. In *European Journal of Physics*, **20**, 193-199.
- IRESON, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. In *Physics Education*, **35**, 15-21.
- JOHNSTON, I. D., CRAWFORD, K., & FLETCHER, P. R. (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics. In *International Journal of Science Education*, **20**, 427-446.
- JOHNSON-LAIRD, P. N. (1983). *Mental Models: Towards a cognitive science of language, inferences, and consciousness*. Cambridge: Cambridge University Press.
- JONES, N. A., ROSS, H., LYNAM, T., PEREZ, P., & LEITCH, A. (2011). Mental models: an interdisciplinary synthesis of theory and methods. In *Ecology and Society*, **16**(1), 46-58.
- KALKANIS, G., HADZIDAKI, P., & STAVROU, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. In *Science Education*, **87**, 257-280.
- KAUS, C., SALINGA, C., BOROWSKI, A., & HEINKE, H. (2012). Fehlvorstellungen zur Optik entgegenwirken. In *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, **65**(7), 401-407.
- KAWALKAR, A. & VIJAPURKAR, J. (2009). What Do Cells Really Look Like? Children's Resistance to Accepting a 3-D Model. In *Proceedings of epiSTEME*, **3**, 187-193.
- KE, J. L., MONK, M., & DUSCHL, R. (2005). Learning introductory quantum physics: sensorimotor experiences and mental models. In *International Journal of Science Education*, **27**, 1571-1594.
- KIKAS, E. (2004). Teachers' conceptions and misconceptions concerning three natural phenomena. In *Journal of Research in Science Teaching*, **41**(5), 432-448.
- KNOTE, H. (1975). Zur Atomvorstellung bei 13-15jährigen. In *Der Physikunterricht*, **9**(4), 86ff.
- KOSSLYN, S. M., GANIS, G., & THOMPSON, W. L. (2001). Neural foundations of imagery. In *Nature Reviews. Neuroscience*, **2**(9), 635-642.
- KRIJTENBURG-LEWERISSA, K., POL, H. J., BRINKMAN, A., & JOOLINGEN, W. R. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. In *Physical Review Physics Education Research*, **13**, 010109.
- KÜBLBECK, J., & MÜLLER, R. (2002). *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder und Experimente*. Köln: Aulis.
- KUHN, T. S. (1970). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.

- LEVIN, D. T., MOMEN, N., DRIVDAHL IV, S. B., & SIMONS, D. J. (2000). Change Blindness Blindness: The Metacognitive Error of Overestimating Change-detection Ability. In *Visual Cognition*, **7**(1-3), 397-412.
- LEVY, J., TREVARTHEN, C., & SPERRY, R. W. (1972). Perception of bilateral chimeric figures following hemispheric deconnection. In *Brain*, **95**, 61-78.
- LEVY, J., & TREVARTHEN, C. (1976). Metacognition of Hemispheric Function in Human Split-Brain Patients. In *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **2**(3), 299-312.
- LEVY-AGRESTI, J., & SPERRY, R. W. (1968). Differential perceptual capacities in major and minor hemispheres. In *Proceedings of the U.S. National Academy of Sciences*, **61**, 1151ff.
- LEWIS, J., LEACH, J., & WOOD-ROBINSON, C. (2000). All in the genes? – young peoples understanding of the nature of genes. In *Biologie-Lernen mit Alltagsvorstellungen. Unterricht Biologie*, **329**, 24-34.
- LICHTFELDT, M. (1992). *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht*. Essen: Westarp Wissenschaften.
- LORENTZ, H. A. (1897). Ueber den Einfluss magnetischer Kräfte auf die Emission des Lichtes. In *Annalen der Physik*, **299**, 278–284.
- MAAROUF, A., & BENYAMNA, S. (1997). La construction des sciences physiques par les représentations et les erreurs: cas des phénomènes magnétiques. In *Didaskalia*, **11**, 103–120.
- MASSHADI, A., & WOOLNOUGH, B. (1999). Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities. In *European Journal of Physics*, **20**, 511-516.
- MAYER, R. E. (2001). *Multimedia Learning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MEHEUT, M., SALTIEL, E., & TIBERGHEN, A. (1983). *Students' conceptions about combustion (11-12 years old)*. L.I.R.E.S.P.T., Université Paris VII, Tour 23-5kme Ctage, 2, place Jussieu, F-75221 Paris Cedex 05, France.
- MCEVILLE, T. (2002). *The shape of ancient thought: comparative studies in Greek and Indian philosophies*. New York: Allworth Press.
- MCKAGAN, S. B., PERKINS, K. K., & WIEMAN, C. E. (2008a). Why we should teach the Bohr model and how to teach it effectively. In *Physical Review Physics Education Research*, **4**, 010103.
- MCKAGAN, S. B., PERKINS, K. K., & WIEMAN, C. E. (2008b). Deeper look at student learning of quantum mechanics: The case of tunneling. In *Physical Review Physics Education Research*, **4**, 020103.

- MÖHRING, W., & SCHLÜTZ, D. (2013). *Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft*. Wiesbaden: Springer VS.
- MÜLLER, R., & WIESNER H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. In *American Journal of Physics*, **70**, 200ff.
- MÜLLER, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule*. Berlin: Logos.
- MÜNSTER, G. (2010). *Quantentheorie*. Berlin/ New York: De Gruyter.
- MUTHIRAPARAMPIL, S. T. (2012). *Misconceptions in Electrostatics among learners at university entry point: a South African case study*. Walter Sisulu University. Masterarbeit.
- NAGAOKA, H. (1904) LV. Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity. In *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **7**(41), 445-455.
- NAKHLEH, M.B. & SAMARAPUNGAN, A. (1999). Elementary school children's beliefs about matter. In *Journal of Research in Science Teaching*, **36**, 777–805.
- NEBES, R. D. (1971). Superiority of the minor hemisphere in commissurotomed man for the perception of part-whole relationships. In *Cortex*, **7**, 333-349.
- NEWTON, I. (1672). A Letter of Mr. Isaac Newton ... containing his New Theory about Light and Colors. In *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **80**, 3075–3087.
- NORMAN, D. A. (1983). Some observations on Mental Models. In D. Gentner, A.L. Stevens, (Hrsg.): *Mental Models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 7-14.
- OLSEN, R. V. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. In *International Journal of Science Education*, **24**, 565-574.
- ORNSTEIN, L. S., & BURGER, H. C. (1924). Strahlungsgesetz und Intensität von Mehrfachlinien. In *Zeitschrift für Physik*, **24**, 41-47.
- PAIVIO, A. (1971): *Imagery and verbal processes*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- PANKSEPP, J. (1998). *Affective Neuroscience*. New York: Oxford.
- PAPAGEORGIOU, G., MARKOS, A., & ZARKADIS, N. (2016). Students' representations of the atomic structure - the effect of some individual differences in particular task contexts. In *Chemistry Education Research and Practice*, **17**(1), 209-219.
- PAPAPHOTIS, G., & TSAPARLIS, G., (2008). Conceptual versus algorithmic learning in high school chemistry: the case of basic quantum chemical concepts, Part 2. Students' common errors, misconceptions and difficulties in understanding. In *Chemistry Education Research and Practice*, **9**, 332–340.

PARK, E. J. (2006). *Student perception and conceptual development as represented by student mental models of atomic structure*. Ohio: Ohio State University. Dissertation.

PARK, E. J., & LIGHT, G. (2009). Identifying Atomic Structure as a Threshold Concept: Student mental models and troublesomeness. In *International Journal of Science Education*, **31**(2), 233-258.

PAVESE, C. (2019). The psychological reality of practical representation. In *Philosophical Psychology*, **32**(5), 784-821.

PETERSON, J. B. (1999). *Maps of meaning: the architecture of belief*. New York: Routledge.

PETERSON, J. B. (2013). Three forms of meaning and the management of complexity. In K. D. Markman, T. Proulx, M. J. Lindberg, K. D. Markman, T. Proulx, & M. J. Lindberg (Hrsg.): *The psychology of meaning*. Washington, DC: American Psychological Association. 17-48.

PETRI, J. (1996). *Der Lernpfad eines Schülers in der Atomphysik - Eine Fallstudie in der Sekundarstufe II*. Aachen: Mainz. Dissertation.

PETRI, J., & NIEDDERER, H. (1998). A learning pathway in highschool level quantum atomic physics. In *International Journal of Science Education*, **20**, 1075-1088.

PFUNDT, H. (1982). Pre-instructional conceptions about substances and transformation of substances. In W. Jung, H. Pfundt and C. V. Rhöneck (Hrsg.): *Problems concerning students' representation of physics and chemistry knowledge. Proceedings of a workshop*. Ludwigsburg: Pädagogische Hochschule. 320-341.

PIAGET, J. (1951). *Play, dreams and imitation in childhood*. London und New York: Routledge.

PLATO (2016). *Timaios*. Berliner Ausgabe, 4. Auflage. Berlin: Holzinger.

PLUTA, W. J., CHINN, C., & DUNCAN, G. R. (2011). Learners' Epistemic Criteria for Good Scientific Models. In *Journal of Research in Science Teaching*, **48**(5), 486-511.

POSNER, J., STRIKE, K., HEWSON, P., & GERTZOG, W. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. In *Science Education*, **66**, 211-227.

PUSCH, A., & BRUNS, C. (2018). Von der Idee zum Produkt - Experimente aus dem 3D-Drucker. In *Mathematisch naturwissenschaftlicher Unterricht*, **71**(1), 14-19.

REIF, F., & ALLEN, S. (1992). Cognition for interpreting scientific concepts: A study of acceleration. In *Cognition and Instruction*, **9**, 1-44.

- REIF, F. (1995). Understanding and teaching important scientific thought processes. In *Journal of Science Education and Technology*, **4**, 261-282.
- ROLAND, E. A. E. (2009). *An Exploratory Study of High School Students' Conceptions of Atomic and Cellular Structure and Relationships between Atoms and Cells*. Kentucky: University of Kentucky Doctoral Dissertations. Paper 701.
- ROSER, M. E., FUGELSANG, J. A., DUNBAR, K. N., CORBALLIS, P. M., & GAZZANIGA, M. S. (2005). Dissociating processes supporting causal perception and causal inference in the brain. In *Neuropsychology*, **19**(5), 591-602.
- RUTHERFORD, E. (1920). Nuclear constitutions of atoms. In *Proceedings of the Royal Society, Series A*, **97**, 374-400.
- SAĞLAM, M., & MILLAR, R. (2006). Upper High School Students' Understanding of Electromagnetism. In *International Journal of Science Education*, **28**(5), 543-566.
- SAKA, A., CERRAH, L., AKDENİZ, A. R., & AYAS, A. (2006). A Cross-Age Study of the Understanding Three Genetic Concepts: How Do They Image the Gene, DNA and Chromosome? In *Journal of Science Education and Technology*, **15**, 192-202.
- SAMAPURGAVAN, A., & WIERS, R. W. (1997). Children's Thoughts on the Origin of Species: A Study of Explanatory Coherence In *Cognitive Science*, **21** (2), 147-177.
- SHECKER, H. (1985). *Das Schülervorverständnis zur Mechanik*. Bremen: Universität Bremen. Dissertation.
- SHECKER, H., WILHELM, T., HOPF, M., & DUIT, R. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Berlin: Springer.
- SCHRÖDINGER, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem I. In *Annalen der Physik*, **79**, 361–376.
- SEEL, N. M. (2017). Model-based learning: a synthesis of theory and research. In *Educational Technology Research and Development*, **65**, 931–966.
- SEWELL, A. (2002). Cells and Atoms – Are They Related?. In *Australian Science Teachers' Journal*, **48**(2), 26-30.
- SHOLLUM, B. (1982). Reactions. In: R. Osborne, P. Freyberg, & R. Tasker (Hrsg.): *Toward changing children's ideas: Selected working papers from the action-research phase (Section 9)*. Auckland: Science Centre, Secondary Teachers College.
- SHTULMAN, A., & VALCARCEL, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. In *Cognition*, **124**, 209–215.

- SIEGLER, R. S. (2007). Cognitive variability. In *Developmental Science*, **10**(1), 104-109.
- SIMONS, D. J., & CHABRIS C. F. (1999). Gorillas in our midst: sustained inattentional blindness for dynamic events. In *Perception*, **28**, 1059-1074.
- SPERRY, R. W., GAZZANIGA, M. S., & BOGEN, J. E. (1969). Interhemispheric relationships: The neocortical commissures; syndromes of hemisphere disconnection. In P. J. Vinken & G. W. Bruyn (Hrsg.): *Handbook of clinical neurology (Vol. 4)*. Amsterdam: North-Holland.
- SPSS 25 (2017). *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0*. IBM Corp. Armonk, NY: IBM Corp.
- STEAD, B. F., & OSBORNE, R. J. (1980). Exploring students concepts of light. In *Australian Science Teachers Journal*, **26**(3), 84-90.
- SWANSON, L.W. (2012). *Brain architecture*. New York: Oxford University Press.
- TABACHNICK, B. G., & FIDELL, L. S. (2004). *Using multivariate statistics (3. Auflage)*. New York: HarperCollins.
- TABER, K. S. (2004). Learning quanta: Barriers to stimulating transitions in student understanding of orbital ideas. In *Science Education*, **89**, 94-116.
- TALANQUER, V. (2009). On cognitive constraints and learning progressions: The case of 'structure of matter'. In *International Journal of Science Education*, **31**(15), 2123-2136.
- TAMBO, E. M. Z., MUKARO, J. P., & MAHASO, J. (2003). Some misconceptions on cell structure and function held by A-level Biology students: Implications for curricular development. In *Zimbabwe Journal of Educational Research*, **15**(2), 122-131.
- TAYLOR, C.C.W. (1999). *The atomists, Leucippus and Democritus: fragments, a text and translation with a commentary by C.C.W. Taylor*. Toronto: University of Toronto Press Incorporated. 157-158.
- THOMSON, J. J. (1903). LXXXIV. The magnetic properties of systems of corpuscles describing circular orbits. In *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **6**(36), 673-693.
- TÖRNKVIST, S., PETERSSON, K.-A., & TRANSTRÖMER, G. (1993). Confusion by representation: On student's comprehension of the electric field concept. In *American Journal of Physics*, **61**, 335-338.
- TOULMIN, S. (1972). *Human understanding*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- TREAGUST, D.; CHITTLEBOROUGH, G., & MAMIALA, T. (2002). Students' understanding of the role of scientific models in learning science. In *International Journal of Science Education*, **24**, 357-368.

- TÜMAY, H. (2016). Reconsidering learning difficulties and misconceptions in chemistry: emergence in chemistry and its implications for chemical education. In *Chemistry Education Research and Practice*, **17**, 229-245.
- UBBEN, M., & HEUSLER, S. (2018). A haptic model of vibration modes in spherical geometry and its application in atomic physics, nuclear physics and beyond. In *European Journal of Physics*, **39**(4), 045404.
- UBBEN, M., & HEUSLER, S. (2019a). Modelle in der Atomphysik aus Lehrersicht. In C. Maurer (Hrsg.): *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe - Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Kiel 2018*. 476-479.
- UBBEN, M. S., & HEUSLER, S. (2019b). Gestalt and Functionality as independent dimensions of mental models in science. In *Research in Science Education*, <https://doi.org/10.1007/s11165-019-09892-y>.
- URDAN, T. C. (2010). *Statistics in Plain English* (3. Auflage). New York: Routledge.
- VENVILLE, G. J., TREAGUST, D. F. (1998). Exploring conceptual change in genetics using a multidimensional interpretive framework. In *Journal of Research in Science Teaching*, **35**(9), 1031-1055.
- VILLARDITA, C., GRIOLI, S. & QUATTROPANI, M. C. (1988). Concreteness/abstractness of stimulus-words and semantic clustering in right brain-damaged patients. In *Cortex*, **24**, 563-571.
- VOSNIADOU, S., & ORTONY, A. (1989). *Similarity and Analogical Reasoning*. New York: Cambridge University Press.
- WATTS, D. M. (1983a). Some alternative views of energy. In *Physics Education*, **18**, 213-217.
- WATTS, D. M. (1983b). A study of schoolchildren's alternative frameworks of the concept of force. In *European Journal of Science Education*, **5**, 217-230.
- WILSON, M. (2002). Six views of embodied cognition. In *Psychonomic Bulletin & Review*, **9**(4), 625-636.
- WITTMANN, M. C., MORGAN, J. T., & BAO, L. (2005). Addressing student models of energy loss in quantum tunnelling. In *European Journal of Physics*, **26**, 939ff.
- YARROCH, W. L. (1985). Student understanding of chemical equation balancing. In *Journal of Research in Science Teaching*, **5**, 449-459.
- ZWICK, W. R., & VELICER, W. F. (1986). Comparison of five rules for determining the number of components to retain. In *Psychological Bulletin*, **99**(3), 432-442.

ZARKADIS, N., PAPAGEORGIOU, G., & STAMOVLASIS, D. (2017). Studying the consistency between and within the student mental models for atomic structure. In *Chemistry Education Research and Practice*, **18**, 893-902.

Onlinequellen

IBIX (2018, November 30). *Are Magnetic Field Lines Real?* Abgerufen 4.Juli 2019, von <https://www.physicsforums.com/insights/are-magnetic-field-lines-real/>

MINISTERIUM FÜR SCHULE & WEITERBILDUNG DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2019, November 30). *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen – Biologie*. Abgerufen 30. November 2019, von https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/146/gym8_biologie.pdf

SOUTHWEST HIGH SCHOOL (2010). *Physics Misconceptions*. Abgerufen 4.Juli 2019, von https://southwest.mpls.k12.mn.us/uploads/physics_misconceptions.pdf

ANHANG

Anhang

Anhang A – Faktorladungen

Faktor-/Item- nummer	Item	Mittelwert (sd)	%			Ladungen ²	
			Stimme nicht zu ³ (1,2)	Stimme zu ⁴ (3,4)	Weiß nicht	Faktor 1 (GT)	Faktor 2 (FT)
GT/1	Elektronen in der Atomhülle bewegen sich auf bestimmten Bahnen mit hoher Geschwindigkeit um den Kern.	2.50 (1.05)	47	50	3	.49	
GT/2	Physikalische Modelle zeigen etwas Reales in anschaulicher Größe.	2.55 (.87)	41	54	5	.46	
GT/3	Ein Elektron in der Atomhülle befindet sich zu jedem Zeitpunkt an genau einem Punkt.	1.71 (.85)	80	15	5	.43	
GT/4	Ein physikalisches Modell sollte eine exakte Nachahmung sein.	2.07 (.77)	71	24	5	.42	
GT/5	Ein magnetischer Stoff besteht neben Atomen und Molekülen zusätzlich aus winzigen Magneten (Elementarmagneten).	2.08 (.98)	58	28	14	.31	
FT/1	Mögliche Aufenthaltsorte eines Elektrons in der Atomhülle werden durch sein Orbital beschrieben.	3.38 (.68)	6	84	10		.50
FT/2	Bei jedem Teil eines physikalischen Modells sollte ersichtlich sein, was er darstellt.	3.14 (.66)	11	84	5		.44
FT/3	Ein physikalisches Modell beschreibt, was das Reale macht.	3.00 (.71)	18	76	6		.33
FT/4	Elektronen in der Atomhülle sind Ladungswolken, die den Kern umgeben.	3.20 (.79)	14	83	3		.31
FT/5 (GT6)	Die Bewegung eines Elektrons in der Atomhülle lässt sich niemals genau bestimmen.	3.30 (.76)	13	80	7	-.35	.43

Table 4: Die Faktoren "Gestalttreue" (GT) und Funktionalitätstreue (FT), wie sie durch die Items GT/1-6 und FT/1-5 beschrieben werden. Die Ladungen zeigen, wie viel der latenten Konstrukte FT und GT durch die Items beschrieben werden kann. Auch gegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen (sd) der Items sowie der Prozentanteil der Zustimmung und Ablehnung der Aussagen durch die Teilnehmenden (N=3108).

¹ GT (Gestalttreue); FT (Funktionalitätstreue)

² Ladungen geringer als .30 wurden unterdrückt

³ Stimme nicht zu = Stimme überhaupt nicht zu und Stimme nicht zu

⁴ Stimme zu = Stimme vollkommen zu und stimme zu

Aus: UBBEN und HEUSLER, 2019b (übersetzt)

Anhang B – Beschreibung der Schritte der Fragebogenvalidierung

In den Items zur Atomhülle (F1 bis F8) wurde aus Gründen der höheren Präzision und der Einheitlichkeit der Items der Wortlaut „im Atom“ durch den genaueren Wortlaut „in der Atomhülle“ ersetzt. Auch in den Fragen zu Modellvorstellungen (F11 bis F15) wurde eine Begrifflichkeit ausgeschärft: so ist im finalen Fragebogen anstelle der Formulierung „a model“ die Formulierung „ein physikalisches Modell“ zu finden, da so die Art des betrachteten Modells besser auf die zu untersuchenden Modellvorstellungen im Rahmen der Physik angepasst wird. Neben diesen beiden generellen Modifikationen und der Übersetzung der englischen Items ins Deutsche (F11 bis F15) wurden auch einzelne Änderungen an den Items durchgeführt, die im Großteil während des Validierungsprozesses als schwierig verständlich angemerkt wurden. Items, die ohne Kommentare der Validierenden direkt übernommen wurden, sind folgend nicht erneut diskutiert.

Zunächst einmal wurde die Formulierung in F1 so abgeändert, dass nicht mehr auf die Kreisbewegung verwiesen wird, da diese Information im Validierungsprozess öfter als überflüssig angemerkt wurde. Die Formulierung F2 wurde ebenfalls verkürzt und das Adjektiv „verschmierte“ nach Kommentaren im Validierungsprozess entfernt. Item F4 wurde zusätzlich eingebaut, um auch den Aspekt des reinen Fachwissens abzuprüfen. Das Item wurde im Validierungsprozess als verständlich empfunden. Das Item F5 ist eine modifizierte Form von Item F3, wobei die „bestimmten Bahnen“ durch „wirre, zufällige Bahnen“ ersetzt wurden. Dies geschah, da in mehreren Studien (siehe Kapitel 2.3) die Vorstellung aufgedeckt wurde, dass einige Lernende eine Bahnvorstellung so mit dem Orbitalmodell zu einem Hybridmodell vermischen; dabei glauben sie, dass in den Orbitalen Elektronen wirr und zufällig „herumwuseln“. Das Item F6 lehnt sich zwar an die Items von MÜLLER (2003) zum Verständnis der Unschärferelation an, allerdings wird in diesem Fall die Unschärferelation direkt am Beispiel des Elektrons in der Atomhülle abgefragt, wobei das ähnlichste Item von MÜLLER (2003) „Man kann den Elektronen im Atom im Allgemeinen keine Bahn zuordnen.“ ist. Das Item wurde von den Probanden im Validierungsprozess als verständlich empfunden. Das Item F7 wurde neu für den Test erstellt und soll testen, inwieweit Orbitale als Repräsentanten für das Konzept der Wahrscheinlichkeitsverteilung angesehen werden. Das Item wurde von den Probanden im Validierungsprozess als verständlich empfunden, es ist allerdings in der Auswertung zu sehen, ob es sich bei den Antworten auf diese Frage auf deklaratives Wissen handelt oder ob wirklich ein mentales Modell hinter dieser Aussage steht. Auch gab es mehrere Probanden, die den Begriff „Orbital“ nicht kannten. Dieser Begriff wurde allerdings beibehalten, da er als wichtiges Fachwort angesehen wurde; trotzdem wurde diese Information bei der Auswertung berücksichtigt und die Korrelation zwischen F7 und F2 – die nahezu das Gleiche testen – wurde bei der Entscheidung hinzugezogen, ob das Item in die Endanalyse mit einfließt. Aufgrund der hohen Korrelation der beiden wurde das Item aber schließlich verworfen. Das letzte Item zu Atomvorstellungen beschäftigt sich erneut mit der Unschärferelation am Beispiel der Elektronenbewegung und lehnt sich dabei an das gleiche Item an wie F6. Auch F8 wurde MÜLLERS Items entlehnt, wurde jedoch allgemeiner formuliert. Die finale Version des Items wurde von den Probanden im Validierungsprozess als verständlich empfunden.

ANHANG

Die beiden Items für den Magnetismus wurden im Zuge einer Untersuchung zu Vorstellungen im Bereich des Magnetismus entwickelt. Dabei soll Item F9 die Vorstellung testen, dass nur Eisen, Kobalt und Nickel auf Magnete reagieren, also der Ferromagnetismus die einzig existierende Form von Magnetismus ist. Das zweite Item, F10, sollte testen, in wie weit Personen der Überzeugung sind, dass wirklich kleine Magnete zusätzlich zu Atomen und Molekülen im Stoff vorhanden sind, also dass das Elementarmagnetmodell wortwörtlich genommen wird. Beide Items (F9 & F10) wurden nach dem Validierungsprozess für verständlich empfunden. Beide Items waren zunächst nicht darauf ausgelegt, mit den anderen zusammen ausgewertet zu werden, da sie ein anderes Themengebiet abdeckten als die Quantenphysik, allerdings erwies sich dies am Ende als sehr fruchtbar für die Interpretation der Ergebnisse (siehe Kapitel 3).

Item F11 wurde dem Item ER/13 aus TREAGUST et al.s SUMS entlehnt, wobei die Übersetzung einigen Vereinfachungen unterlaufen ist, da im Validierungsprozess das Item häufig als „zu kompliziert“ empfunden wurde. Die finale Version des Items wurde von den Probanden im Validierungsprozess als verständlich empfunden. Neben der Übersetzung gab es keine Veränderungen an Item F12 im Gegensatz zu seinem Original aus dem SUMS von TREAGUST et al. (ER/9). Genau so war es auch bei Item F14, welche neben der Übersetzung von TREAGUST et al.s ER/13 keine weiteren Modifikationen erfuhr. Die Übersetzung in Item F13 dagegen wurde nach dem 2. Validierungsschritt abgeändert, da häufiger die Anmerkung genannt wurde, der Satz sei zu kompliziert und die Übersetzung von ER/12 damit nicht passend. Die finale Version des Items wurde von den Probanden im Validierungsprozess als verständlich empfunden. Schließlich wurde bei Item F15 neben der Übersetzung aus ER/15 noch so abgeändert, dass nur danach gefragt wird, was ein physikalisches Modell macht und nicht gleichzeitig, wie es aussieht. Dies wurde so durchgeführt, weil ansonsten die Möglichkeit genommen wird, aus den beiden Komponenten *Aussehen* und *Funktion* herauszulesen, welcher die Probanden primär zustimmen oder nicht zustimmen. Das Aussehen wurde nicht extra in ein neues Item eingeführt, da schon genug Aussagen zum Aussehen im entwickelten Instrument zu finden sind und die Itemanzahl so klein wie möglich gehalten werden sollte, da möglichst viele Personen die Umfrage abschließen sollten, wofür die Wahrscheinlichkeit bei größerer Itemanzahl sinkt.

Anhang C - Andere Probanden

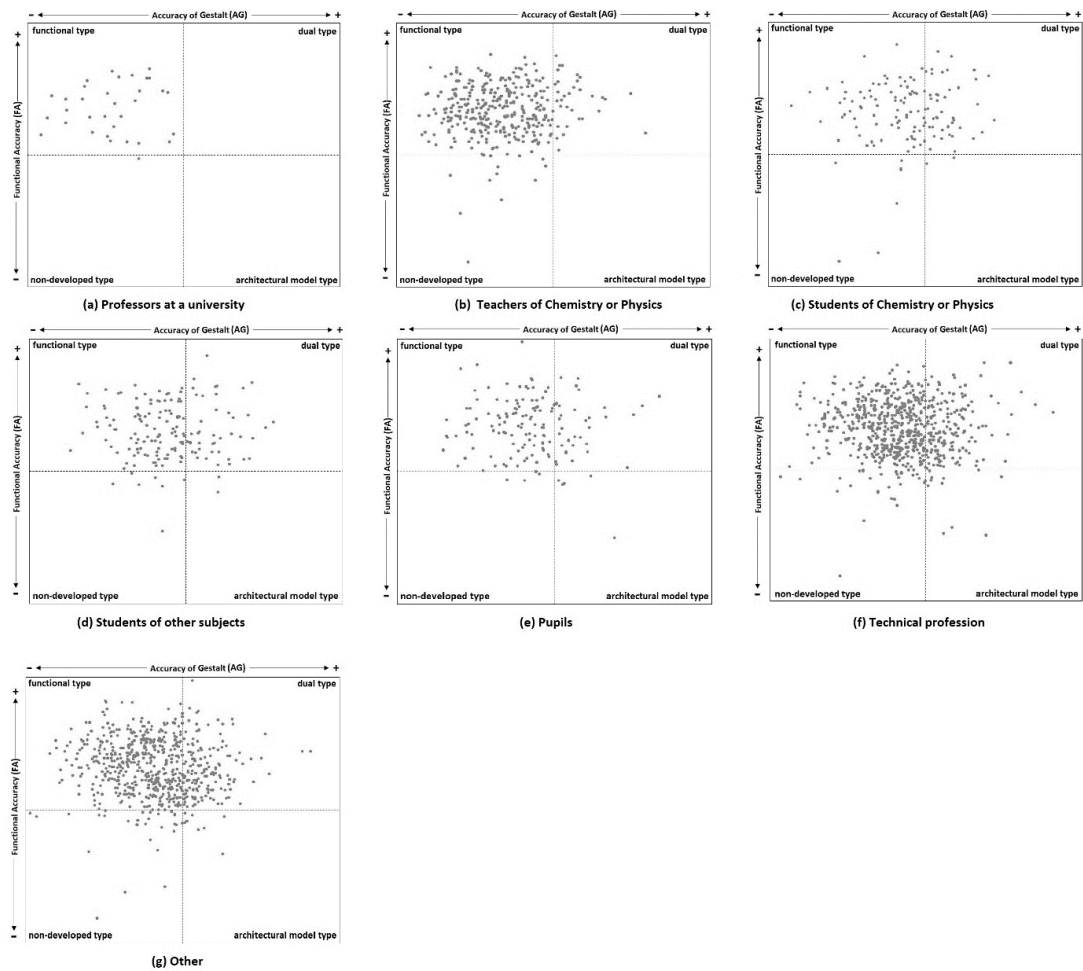


Abb. A. Verteilung der Teilnehmenden an der Onlineumfrage zu Modellvorstellungen. Die Staffellung der Kategorien wurde auf Beruflichen Professionsgrad in Physik und Chemie orientiert, wobei auch technische Berufe als eigene Kategorie gewählt wurden, da hier praktische Physik vermehrte Anwendung findet (aus: UBBEN & HEUSLER, 2019b).

Bisher erschienene Bände der Reihe „*Studien zum Physik- und Chemielernen*“

ISSN 1614-8967 (vormals *Studien zum Physiklernen* ISSN 1435-5280)

- 1 Helmut Fischler, Jochen Peuckert (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie
ISBN 978-3-89722-256-4 40.50 EUR
- 2 Anja Schoster: Bedeutungsentwicklungsprozesse beim Lösen algorithmischer Physikaufgaben. *Eine Fallstudie zu Lernprozessen von Schülern im Physiknachhilfeunterricht während der Bearbeitung algorithmischer Physikaufgaben*
ISBN 978-3-89722-045-4 40.50 EUR
- 3 Claudia von Aufschnaiter: Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-89722-143-7 40.50 EUR
- 4 Susanne Haerberlen: Lernprozesse im Unterricht mit Wasserstromkreisen. *Eine Fallstudie in der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-89722-172-7 40.50 EUR
- 5 Kerstin Haller: Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. *Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-242-7 40.50 EUR
- 6 Michaela Horstendahl: Motivationale Orientierungen im Physikunterricht
ISBN 978-3-89722-227-4 50.00 EUR
- 7 Stefan Deylitz: Lernergebnisse in der Quanten-Atomphysik. *Evaluation des Bremer Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-89722-291-5 40.50 EUR
- 8 Lorenz Hucke: Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums
ISBN 978-3-89722-316-5 50.00 EUR
- 9 Heike Theyßen: Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. *Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*
ISBN 978-3-89722-334-9 40.50 EUR
- 10 Annette Schick: Der Einfluß von Interesse und anderen selbstbezogenen Kognitionen auf Handlungen im Physikunterricht. *Fallstudien zu Interessenhandlungen im Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-380-6 40.50 EUR
- 11 Roland Berger: Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik. *Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-445-2 40.50 EUR

- 12 Johannes Werner: Vom Licht zum Atom. *Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*
ISBN 978-3-89722-471-1 40.50 EUR
- 13 Florian Sander: Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum. *Eine empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum*
ISBN 978-3-89722-482-7 40.50 EUR
- 14 Jörn Gerdes: Der Begriff der physikalischen Kompetenz. *Zur Validierung eines Konstruktes*
ISBN 978-3-89722-510-7 40.50 EUR
- 15 Malte Meyer-Arndt: Interaktionen im Physikpraktikum zwischen Studierenden und Betreuern. *Feldstudie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-541-1 40.50 EUR
- 16 Dietmar Höttecke: Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. *Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*
ISBN 978-3-89722-607-4 40.50 EUR
- 17 Gil Gabriel Mavanga: Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums. *Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland*
ISBN 978-3-89722-721-7 40.50 EUR
- 18 Meike Ute Zastrow: Interaktive Experimentieranleitungen. *Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Experimentieren mit Messgeräten im Physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-802-3 40.50 EUR
- 19 Gunnar Friege: Wissen und Problemlösen. *Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs*
ISBN 978-3-89722-809-2 40.50 EUR
- 20 Erich Starauschek: Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie*
ISBN 978-3-89722-823-8 40.50 EUR
- 21 Roland Paatz: Charakteristika analogiebasierten Denkens. *Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich*
ISBN 978-3-89722-944-0 40.50 EUR
- 22 Silke Mikelskis-Seifert: Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. *Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen*
ISBN 978-3-8325-0013-9 40.50 EUR
- 23 Brunhild Landwehr: Distanzen von Lehrkräften und Studierenden des Sachunterrichts zur Physik. *Eine qualitativ-empirische Studie zu den Ursachen*
ISBN 978-3-8325-0044-3 40.50 EUR

- 24 Lydia Murmann: Physiklernen zu Licht, Schatten und Sehen. *Eine phänomenografische Untersuchung in der Primarstufe*
ISBN 978-3-8325-0060-3 40.50 EUR
- 25 Thorsten Bell: Strukturprinzipien der Selbstregulation. *Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-0134-1 40.50 EUR
- 26 Rainer Müller: Quantenphysik in der Schule
ISBN 978-3-8325-0186-0 40.50 EUR
- 27 Jutta Roth: Bedeutungsentwicklungsprozesse von Physikerinnen und Physikern in den Dimensionen Komplexität, Zeit und Inhalt
ISBN 978-3-8325-0183-9 40.50 EUR
- 28 Andreas Saniter: Spezifika der Verhaltensmuster fortgeschrittener Studierender der Physik
ISBN 978-3-8325-0292-8 40.50 EUR
- 29 Thomas Weber: Kumulatives Lernen im Physikunterricht. *Eine vergleichende Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik*
ISBN 978-3-8325-0316-1 40.50 EUR
- 30 Markus Rehm: Über die Chancen und Grenzen moralischer Erziehung im naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-0368-0 40.50 EUR
- 31 Marion Budde: Lernwirkungen in der Quanten-Atom-Physik. *Fallstudien über Resonanzen zwischen Lernangeboten und SchülerInnen-Vorstellungen*
ISBN 978-3-8325-0483-0 40.50 EUR
- 32 Thomas Reyer: Oberflächenmerkmale und Tiefenstrukturen im Unterricht. *Exemplarische Analysen im Physikunterricht der gymnasialen Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-0488-5 40.50 EUR
- 33 Christoph Thomas Müller: Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0543-1 40.50 EUR
- 34 Gabriela Jonas-Ahrend: Physiklehrvorstellungen zum Experiment im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0576-9 40.50 EUR
- 35 Dimitrios Stavrou: Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nicht-linearen Dynamik. *Didaktische Analyse und Lernprozesse*
ISBN 978-3-8325-0609-4 40.50 EUR
- 36 Katrin Engeln: Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken
ISBN 978-3-8325-0689-6 40.50 EUR
- 37 Susann Hartmann: Erklärungsvielfalt
ISBN 978-3-8325-0730-5 40.50 EUR

- 38 Knut Neumann: Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker
ISBN 978-3-8325-0762-6 40.50 EUR
- 39 Michael Späth: Kontextbedingungen für Physikunterricht an der Hauptschule. *Möglichkeiten und Ansatzpunkte für einen fachübergreifenden, handlungsorientierten und berufsorientierten Unterricht*
ISBN 978-3-8325-0827-2 40.50 EUR
- 40 Jörg Hirsch: Interesse, Handlungen und situatives Erleben von Schülerinnen und Schülern beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-8325-0875-3 40.50 EUR
- 41 Monika Hüther: Evaluation einer hypermedialen Lernumgebung zum Thema Gasgesetze. *Eine Studie im Rahmen des Physikpraktikums für Studierende der Medizin*
ISBN 978-3-8325-0911-8 40.50 EUR
- 42 Maike Tesch: Das Experiment im Physikunterricht. *Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-0975-0 40.50 EUR
- 43 Nina Nicolai: Skriptgeleitete Eltern-Kind-Interaktion bei Chemiehausaufgaben. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Säure-Base*
ISBN 978-3-8325-1013-8 40.50 EUR
- 44 Antje Leisner: Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-1020-6 40.50 EUR
- 45 Stefan Rumann: Evaluation einer Interventionsstudie zur Säure-Base-Thematik
ISBN 978-3-8325-1027-5 40.50 EUR
- 46 Thomas Wilhelm: Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung – mit CD-ROM
ISBN 978-3-8325-1046-6 45.50 EUR
- 47 Andrea Maier-Richter: Computerunterstütztes Lernen mit Lösungsbeispielen in der Chemie. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Löslichkeit*
ISBN 978-3-8325-1046-6 40.50 EUR
- 48 Jochen Peuckert: Stabilität und Ausprägung kognitiver Strukturen zum Atombegriff
ISBN 978-3-8325-1104-3 40.50 EUR
- 49 Maik Walpuski: Optimierung von experimenteller Kleingruppenarbeit durch Strukturierungshilfen und Feedback
ISBN 978-3-8325-1184-5 40.50 EUR
- 50 Helmut Fischler, Christiane S. Reiners (Hrsg.): Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-1225-5 34.90 EUR
- 51 Claudia Eysel: Interdisziplinäres Lehren und Lernen in der Lehrerbildung. *Eine empirische Studie zum Kompetenzerwerb in einer komplexen Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1238-5 40.50 EUR

- 52 Johannes Günther: Lehrerfortbildung über die Natur der Naturwissenschaften. *Studien über das Wissenschaftsverständnis von Grundschullehrkräften*
ISBN 978-3-8325-1287-3 40.50 EUR
- 53 Christoph Neugebauer: Lernen mit Simulationen und der Einfluss auf das Problemlösen in der Physik
ISBN 978-3-8325-1300-9 40.50 EUR
- 54 Andreas Schnirch: Gendergerechte Interessen- und Motivationsförderung im Kontext naturwissenschaftlicher Grundbildung. *Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer multimedial unterstützten Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1334-4 40.50 EUR
- 55 Hilde Köster: Freies Explorieren und Experimentieren. *Eine Untersuchung zur selbstbestimmten Gewinnung von Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen im Sachunterricht*
ISBN 978-3-8325-1348-1 40.50 EUR
- 56 Eva Heran-Dörr: Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung zur Förderung der physikdidaktischen Kompetenz von Sachunterrichtslehrkräften
ISBN 978-3-8325-1377-1 40.50 EUR
- 57 Agnes Szabone Varnai: Unterstützung des Problemlösens in Physik durch den Einsatz von Simulationen und die Vorgabe eines strukturierten Kooperationsformats
ISBN 978-3-8325-1403-7 40.50 EUR
- 58 Johannes Rethfeld: Aufgabenbasierte Lernprozesse in selbstorganisationsoffenem Unterricht der Sekundarstufe I zum Themengebiet ELEKTROSTATIK. *Eine Feldstudie in vier 10. Klassen zu einer kartenbasierten Lernumgebung mit Aufgaben aus der Elektrostatik*
ISBN 978-3-8325-1416-7 40.50 EUR
- 59 Christian Henke: Experimentell-naturwissenschaftliche Arbeitsweisen in der Oberstufe. *Untersuchung am Beispiel des HIGHSEA-Projekts in Bremerhaven*
ISBN 978-3-8325-1515-7 40.50 EUR
- 60 Lutz Kasper: Diskursiv-narrative Elemente für den Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer multimedialen Lernumgebung zum Erdmagnetismus*
ISBN 978-3-8325-1537-9 40.50 EUR
- 61 Thorid Rabe: Textgestaltung und Aufforderung zu Selbsterklärungen beim Physiklernen mit Multimedia
ISBN 978-3-8325-1539-3 40.50 EUR
- 62 Ina Glemnitz: Vertikale Vernetzung im Chemieunterricht. *Ein Vergleich von traditionellem Unterricht mit Unterricht nach Chemie im Kontext*
ISBN 978-3-8325-1628-4 40.50 EUR
- 63 Erik Einhaus: Schülerkompetenzen im Bereich Wärmelehre. *Entwicklung eines Testinstruments zur Überprüfung und Weiterentwicklung eines normativen Modells fachbezogener Kompetenzen*
ISBN 978-3-8325-1630-7 40.50 EUR

- 64 Jasmin Neuroth: Concept Mapping als Lernstrategie. *Eine Interventionsstudie zum Chemielernen aus Texten*
ISBN 978-3-8325-1659-8 40.50 EUR
- 65 Hans Gerd Hegeler-Burkhart: Zur Kommunikation von Hauptschülerinnen und Hauptschülern in einem handlungsorientierten und fächerübergreifenden Unterricht mit physikalischen und technischen Inhalten
ISBN 978-3-8325-1667-3 40.50 EUR
- 66 Karsten Rincke: Sprachentwicklung und Fachlernen im Mechanikunterricht. *Sprache und Kommunikation bei der Einführung in den Kraftbegriff*
ISBN 978-3-8325-1699-4 40.50 EUR
- 67 Nina Strehle: Das Ion im Chemieunterricht. *Alternative Schülervorstellungen und curriculare Konsequenzen*
ISBN 978-3-8325-1710-6 40.50 EUR
- 68 Martin Hopf: Problemorientierte Schülerexperimente
ISBN 978-3-8325-1711-3 40.50 EUR
- 69 Anne Beerenwinkel: Fostering conceptual change in chemistry classes using expository texts
ISBN 978-3-8325-1721-2 40.50 EUR
- 70 Roland Berger: Das Gruppenpuzzle im Physikunterricht der Sekundarstufe II. *Eine empirische Untersuchung auf der Grundlage der Selbstbestimmungstheorie der Motivation*
ISBN 978-3-8325-1732-8 40.50 EUR
- 71 Giuseppe Colicchia: Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie. *Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten*
ISBN 978-3-8325-1746-5 40.50 EUR
- 72 Sandra Winheller: Geschlechtsspezifische Auswirkungen der Lehrer-Schüler-Interaktion im Chemieanfangsunterricht
ISBN 978-3-8325-1757-1 40.50 EUR
- 73 Isabel Wahser: Training von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen zur Unterstützung experimenteller Kleingruppenarbeit im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-1815-8 40.50 EUR
- 74 Claus Brell: Lernmedien und Lernerfolg - reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht. *Empirische Untersuchungen in achten Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE*
ISBN 978-3-8325-1829-5 40.50 EUR
- 75 Rainer Wackermann: Überprüfung der Wirksamkeit eines Basismodell-Trainings für Physiklehrer
ISBN 978-3-8325-1882-0 40.50 EUR
- 76 Oliver Tepner: Effektivität von Aufgaben im Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-1919-3 40.50 EUR

- 77 Claudia Geyer: Museums- und Science-Center-Besuche im naturwissenschaftlichen Unterricht aus einer motivationalen Perspektive. *Die Sicht von Lehrkräften und Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-1922-3 40.50 EUR
- 78 Tobias Leonhard: Professionalisierung in der Lehrerbildung. *Eine explorative Studie zur Entwicklung professioneller Kompetenzen in der Lehrererstausbildung*
ISBN 978-3-8325-1924-7 40.50 EUR
- 79 Alexander Kauertz: Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben
ISBN 978-3-8325-1925-4 40.50 EUR
- 80 Regina Hübinger: Schüler auf Weltreise. *Entwicklung und Evaluation von Lehr-/Lernmaterialien zur Förderung experimentell-naturwissenschaftlicher Kompetenzen für die Jahrgangsstufen 5 und 6*
ISBN 978-3-8325-1932-2 40.50 EUR
- 81 Christine Waltner: Physik lernen im Deutschen Museum
ISBN 978-3-8325-1933-9 40.50 EUR
- 82 Torsten Fischer: Handlungsmuster von Physiklehrkräften beim Einsatz neuer Medien. *Fallstudien zur Unterrichtspraxis*
ISBN 978-3-8325-1948-3 42.00 EUR
- 83 Corinna Kieren: Chemiehausaufgaben in der Sekundarstufe I des Gymnasiums. *Fragebogenerhebung zur gegenwärtigen Praxis und Entwicklung eines optimierten Hausaufgabendesigns im Themenbereich Säure-Base*
978-3-8325-1975-9 37.00 EUR
- 84 Marco Thiele: Modelle der Thermohalinen Zirkulation im Unterricht. *Eine empirische Studie zur Förderung des Modellverständnisses*
ISBN 978-3-8325-1982-7 40.50 EUR
- 85 Bernd Zinn: Physik lernen, um Physik zu lehren. *Eine Möglichkeit für interessanteren Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-1995-7 39.50 EUR
- 86 Esther Klaes: Außerschulische Lernorte im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Die Perspektive der Lehrkraft*
ISBN 978-3-8325-2006-9 43.00 EUR
- 87 Marita Schmidt: Kompetenzmodellierung und -diagnostik im Themengebiet Energie der Sekundarstufe I. *Entwicklung und Erprobung eines Testinventars*
ISBN 978-3-8325-2024-3 37.00 EUR
- 88 Gudrun Franke-Braun: Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. *Ein Aufgabenformat zur Förderung der sachbezogenen Kommunikation und Lernleistung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-2026-7 38.00 EUR
- 89 Silke Klos: Kompetenzförderung im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. *Der Einfluss eines integrierten Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-8325-2133-2 37.00 EUR

- 90 Ulrike Elisabeth Burkard: Quantenphysik in der Schule. *Bestandsaufnahme, Perspektiven und Weiterentwicklungsmöglichkeiten durch die Implementation eines Medienservers*
ISBN 978-3-8325-2215-5 43.00 EUR
- 91 Ulrike Gromadecki: Argumente in physikalischen Kontexten. *Welche Geltungsgründe halten Physikanfänger für überzeugend?*
ISBN 978-3-8325-2250-6 41.50 EUR
- 92 Jürgen Bruns: Auf dem Weg zur Förderung naturwissenschaftsspezifischer Vorstellungen von zukünftigen Chemie-Lehrenden
ISBN 978-3-8325-2257-5 43.50 EUR
- 93 Cornelius Marsch: Räumliche Atomvorstellung. *Entwicklung und Erprobung eines Unterrichtskonzeptes mit Hilfe des Computers*
ISBN 978-3-8325-2293-3 82.50 EUR
- 94 Maja Brückmann: Sachstrukturen im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2272-8 39.50 EUR
- 95 Sabine Fechner: Effects of Context-oriented Learning on Student Interest and Achievement in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-2343-5 36.50 EUR
- 96 Clemens Nagel: eLearning im Physikalischen Anfängerpraktikum
ISBN 978-3-8325-2355-8 39.50 EUR
- 97 Josef Riese: Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-2376-3 39.00 EUR
- 98 Sascha Bernholt: Kompetenzmodellierung in der Chemie. *Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*
ISBN 978-3-8325-2447-0 40.00 EUR
- 99 Holger Christoph Stawitz: Auswirkung unterschiedlicher Aufgabenprofile auf die Schülerleistung. *Vergleich von Naturwissenschafts- und Problemlöseaufgaben der PISA 2003-Studie*
ISBN 978-3-8325-2451-7 37.50 EUR
- 100 Hans Ernst Fischer, Elke Sumfleth (Hrsg.): nwu-essen – 10 Jahre Essener Forschung zum naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-3331-1 40.00 EUR
- 101 Hendrik Härtig: Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests
ISBN 978-3-8325-2512-5 34.00 EUR
- 102 Thomas Grüß-Niehaus: Zum Verständnis des Löslichkeitskonzeptes im Chemieunterricht. *Der Effekt von Methoden progressiver und kollaborativer Reflexion*
ISBN 978-3-8325-2537-8 40.50 EUR

- 103 Patrick Bronner: Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons
ISBN 978-3-8325-2540-8 36.00 EUR
- 104 Adrian Voßkühler: Blickbewegungsmessung an Versuchsaufbauten. *Studien zur Wahrnehmung, Verarbeitung und Usability von physikbezogenen Experimenten am Bildschirm und in der Realität*
ISBN 978-3-8325-2548-4 47.50 EUR
- 105 Verena Tobias: Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. *Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen*
ISBN 978-3-8325-2558-3 54.00 EUR
- 106 Christian Rogge: Entwicklung physikalischer Konzepte in aufgabenbasierten Lernumgebungen
ISBN 978-3-8325-2574-3 45.00 EUR
- 107 Mathias Ropohl: Modellierung von Schülerkompetenzen im Basiskonzept Chemische Reaktion. *Entwicklung und Analyse von Testaufgaben*
ISBN 978-3-8325-2609-2 36.50 EUR
- 108 Christoph Kulgemeyer: Physikalische Kommunikationskompetenz. *Modellierung und Diagnostik*
ISBN 978-3-8325-2674-0 44.50 EUR
- 109 Jennifer Olszewski: The Impact of Physics Teachers' Pedagogical Content Knowledge on Teacher Actions and Student Outcomes
ISBN 978-3-8325-2680-1 33.50 EUR
- 110 Annika Ohle: Primary School Teachers' Content Knowledge in Physics and its Impact on Teaching and Students' Achievement
ISBN 978-3-8325-2684-9 36.50 EUR
- 111 Susanne Mannel: Assessing scientific inquiry. *Development and evaluation of a test for the low-performing stage*
ISBN 978-3-8325-2761-7 40.00 EUR
- 112 Michael Plomer: Physik physiologisch passend praktiziert. *Eine Studie zur Lernwirksamkeit von traditionellen und adressatenspezifischen Physikpraktika für die Physiologie*
ISBN 978-3-8325-2804-1 34.50 EUR
- 113 Alexandra Schulz: Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. *Eine Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2817-1 40.00 EUR
- 114 Franz Boczianowski: Eine empirische Untersuchung zu Vektoren im Physikunterricht der Mittelstufe
ISBN 978-3-8325-2843-0 39.50 EUR
- 115 Maria Ploog: Internetbasiertes Lernen durch Textproduktion im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-2853-9 39.50 EUR

- 116 Anja Dhein: Lernen in Explorier- und Experimentiersituationen. *Eine explorative Studie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen bei Kindern im Alter zwischen 4 und 6 Jahren*
ISBN 978-3-8325-2859-1 45.50 EUR
- 117 Irene Neumann: Beyond Physics Content Knowledge. *Modeling Competence Regarding Nature of Scientific Inquiry and Nature of Scientific Knowledge*
ISBN 978-3-8325-2880-5 37.00 EUR
- 118 Markus Emden: Prozessorientierte Leistungsmessung des naturwissenschaftlich-experimentellen Arbeitens. *Eine vergleichende Studie zu Diagnoseinstrumenten zu Beginn der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-8325-2867-6 38.00 EUR
- 119 Birgit Hofmann: Analyse von Blickbewegungen von Schülern beim Lesen von physikbezogenen Texten mit Bildern. *Eye Tracking als Methodenwerkzeug in der physikdidaktischen Forschung*
ISBN 978-3-8325-2925-3 59.00 EUR
- 120 Rebecca Knobloch: Analyse der fachinhaltlichen Qualität von Schüleräußerungen und deren Einfluss auf den Lernerfolg. *Eine Videostudie zu kooperativer Kleingruppenarbeit*
ISBN 978-3-8325-3006-8 36.50 EUR
- 121 Julia Hostenbach: Entwicklung und Prüfung eines Modells zur Beschreibung der Bewertungskompetenz im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3013-6 38.00 EUR
- 122 Anna Windt: Naturwissenschaftliches Experimentieren im Elementarbereich. *Evaluation verschiedener Lernsituationen*
ISBN 978-3-8325-3020-4 43.50 EUR
- 123 Eva Kölbach: Kontexteinflüsse beim Lernen mit Lösungsbeispielen
ISBN 978-3-8325-3025-9 38.50 EUR
- 124 Anna Lau: Passung und vertikale Vernetzung im Chemie- und Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3021-1 36.00 EUR
- 125 Jan Lamprecht: Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz. *Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasien im Fach Physik*
ISBN 978-3-8325-3035-8 38.50 EUR
- 126 Ulrike Böhm: Förderung von Verstehensprozessen unter Einsatz von Modellen
ISBN 978-3-8325-3042-6 41.00 EUR
- 127 Sabrina Dollny: Entwicklung und Evaluation eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-3046-4 37.00 EUR
- 128 Monika Zimmermann: Naturwissenschaftliche Bildung im Kindergarten. *Eine integrative Längsschnittstudie zur Kompetenzentwicklung von Erzieherinnen*
ISBN 978-3-8325-3053-2 54.00 EUR

- 129 Ulf Saballus: Über das Schlussfolgern von Schülerinnen und Schülern zu öffentlichen Kontroversen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund. *Eine Fallstudie*
ISBN 978-3-8325-3086-0 39.50 EUR
- 130 Olaf Krey: Zur Rolle der Mathematik in der Physik. *Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender*
ISBN 978-3-8325-3101-0 46.00 EUR
- 131 Angelika Wolf: Zusammenhänge zwischen der Eigenständigkeit im Physikunterricht, der Motivation, den Grundbedürfnissen und dem Lernerfolg von Schülern
ISBN 978-3-8325-3161-4 45.00 EUR
- 132 Johannes Börlin: Das Experiment als Lerngelegenheit. *Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR
- 133 Olaf Uhden: Mathematisches Denken im Physikunterricht. *Theorieentwicklung und Problemanalyse*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR
- 134 Christoph Gut: Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz. *Analyse eines large-scale Experimentiertests*
ISBN 978-3-8325-3213-0 40.00 EUR
- 135 Antonio Rueda: Lernen mit ExploMultimedial in kolumbianischen Schulen. *Analyse von kurzzeitigen Lernprozessen und der Motivation beim länderübergreifenden Einsatz einer deutschen computergestützten multimedialen Lernumgebung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3218-5 45.50 EUR
- 136 Krisztina Berger: Bilder, Animationen und Notizen. *Empirische Untersuchung zur Wirkung einfacher visueller Repräsentationen und Notizen auf den Wissenserwerb in der Optik*
ISBN 978-3-8325-3238-3 41.50 EUR
- 137 Antony Crossley: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher physikalischer Konzepte auf den Wissenserwerb in der Thermodynamik der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3275-8 40.00 EUR
- 138 Tobias Viering: Entwicklung physikalischer Kompetenz in der Sekundarstufe I. *Validierung eines Kompetenzentwicklungsmodells für das Energiekonzept im Bereich Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3277-2 37.00 EUR
- 139 Nico Schreiber: Diagnostik experimenteller Kompetenz. *Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells*
ISBN 978-3-8325-3284-0 39.00 EUR
- 140 Sarah Hundertmark: Einblicke in kollaborative Lernprozesse. *Eine Fallstudie zur reflektierenden Zusammenarbeit unterstützt durch die Methoden Concept Mapping und Lernbegleitbogen*
ISBN 978-3-8325-3251-2 43.00 EUR

- 141 Ronny Scherer: Analyse der Struktur, Messinvarianz und Ausprägung komplexer Problemlösekompetenz im Fach Chemie. *Eine Querschnittstudie in der Sekundarstufe I und am Übergang zur Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-3312-0 43.00 EUR
- 142 Patricia Heitmann: Bewertungskompetenz im Rahmen naturwissenschaftlicher Problemlöseprozesse. *Modellierung und Diagnose der Kompetenzen Bewertung und analytisches Problemlösen für das Fach Chemie*
ISBN 978-3-8325-3314-4 37.00 EUR
- 143 Jan Fleischhauer: Wissenschaftliches Argumentieren und Entwicklung von Konzepten beim Lernen von Physik
ISBN 978-3-8325-3325-0 35.00 EUR
- 144 Nermin Özcan: Zum Einfluss der Fachsprache auf die Leistung im Fach Chemie. *Eine Förderstudie zur Fachsprache im Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-3328-1 36.50 EUR
- 145 Helena van Vorst: Kontextmerkmale und ihr Einfluss auf das Schülerinteresse im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3321-2 38.50 EUR
- 146 Janine Cappell: Fachspezifische Diagnosekompetenz angehender Physiklehrkräfte in der ersten Ausbildungsphase
ISBN 978-3-8325-3356-4 38.50 EUR
- 147 Susanne Bley: Förderung von Transferprozessen im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3407-3 40.50 EUR
- 148 Cathrin Blaes: Die übungsgestützte Lehrerrepräsentation im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Effektivität*
ISBN 978-3-8325-3409-7 43.50 EUR
- 149 Julia Suckut: Die Wirksamkeit von piko-OWL als Lehrerfortbildung. Eine Evaluation zum Projekt *Physik im Kontext* in Fallstudien
ISBN 978-3-8325-3440-0 45.00 EUR
- 150 Alexandra Dorschu: Die Wirkung von Kontexten in Physikkompetenztestaufgaben
ISBN 978-3-8325-3446-2 37.00 EUR
- 151 Jochen Scheid: Multiple Repräsentationen, Verständnis physikalischer Experimente und kognitive Aktivierung: *Ein Beitrag zur Entwicklung der Aufgabenkultur*
ISBN 978-3-8325-3449-3 49.00 EUR
- 152 Tim Plasa: Die Wahrnehmung von Schülerlaboren und Schülerforschungszentren
ISBN 978-3-8325-3483-7 35.50 EUR
- 153 Felix Schoppmeier: Physikkompetenz in der gymnasialen Oberstufe. *Entwicklung und Validierung eines Kompetenzstrukturmodells für den Kompetenzbereich Umgang mit Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3502-5 36.00 EUR

- 154 Katharina Groß: Experimente alternativ dokumentieren. *Eine qualitative Studie zur Förderung der Diagnose- und Differenzierungskompetenz in der Chemielehrerbildung*
ISBN 978-3-8325-3508-7 43.50 EUR
- 155 Barbara Hank: Konzeptwandelprozesse im Anfangsunterricht Chemie. *Eine quasixperimentelle Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-3519-3 38.50 EUR
- 156 Katja Freyer: Zum Einfluss von Studieneingangsvoraussetzungen auf den Studienerfolg Erstsemesterstudierender im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3544-5 38.00 EUR
- 157 Alexander Rachel: Auswirkungen instruktionaler Hilfen bei der Einführung des (Ferro-)Magnetismus. *Eine Vergleichsstudie in der Primar- und Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-3548-3 43.50 EUR
- 158 Sebastian Ritter: Einfluss des Lerninhalts Nanogrößeneffekte auf Teilchen- und Teilchenmodellvorstellungen von Schülerinnen und Schülern
ISBN 978-3-8325-3558-2 36.00 EUR
- 159 Andrea Harbach: Problemorientierung und Vernetzung in kontextbasierten Lernaufgaben
ISBN 978-3-8325-3564-3 39.00 EUR
- 160 David Obst: Interaktive Tafeln im Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung*
ISBN 978-3-8325-3582-7 40.50 EUR
- 161 Sophie Kirschner: Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-3601-5 35.00 EUR
- 162 Katja Stief: Selbstregulationsprozesse und Hausaufgabenmotivation im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3631-2 34.00 EUR
- 163 Nicola Meschede: Professionelle Wahrnehmung der inhaltlichen Strukturierung im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Theoretische Beschreibung und empirische Erfassung*
ISBN 978-3-8325-3668-8 37.00 EUR
- 164 Johannes Maximilian Barth: Experimentieren im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. *Eine Rekonstruktion übergeordneter Einbettungsstrategien*
ISBN 978-3-8325-3681-7 39.00 EUR
- 165 Sandra Lein: Das Betriebspraktikum in der Lehrerbildung. *Eine Untersuchung zur Förderung der Wissenschafts- und Technikbildung im allgemeinbildenden Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3698-5 40.00 EUR
- 166 Veranika Maiseyenko: Modellbasiertes Experimentieren im Unterricht. *Praxistauglichkeit und Lernwirkungen*
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

- 167 Christoph Stolzenberger: Der Einfluss der didaktischen Lernumgebung auf das Erreichen geforderter Bildungsziele am Beispiel der W- und P-Seminare im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR
- 168 Pia Altenburger: Mehrebenenregressionsanalysen zum Physiklernen im Sachunterricht der Primarstufe. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie.*
ISBN 978-3-8325-3717-3 37.50 EUR
- 169 Nora Ferber: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung von Kompetenzentwicklung im Fach Chemie in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3727-2 39.50 EUR
- 170 Anita Stender: Unterrichtsplanung: Vom Wissen zum Handeln.
Theoretische Entwicklung und empirische Überprüfung des Transformationsmodells der Unterrichtsplanung
ISBN 978-3-8325-3750-0 41.50 EUR
- 171 Jenna Koenen: Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen
ISBN 978-3-8325-3785-2 43.00 EUR
- 172 Teresa Henning: Empirische Untersuchung kontextorientierter Lernumgebungen in der Hochschuldidaktik. *Entwicklung und Evaluation kontextorientierter Aufgaben in der Studieneingangsphase für Fach- und Nebenfachstudierende der Physik*
ISBN 978-3-8325-3801-9 43.00 EUR
- 173 Alexander Pusch: Fachspezifische Instrumente zur Diagnose und individuellen Förderung von Lehramtsstudierenden der Physik
ISBN 978-3-8325-3829-3 38.00 EUR
- 174 Christoph Vogelsang: Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. *Zusammenhangsanalysen zwischen Lehrerkompetenz und Lehrerperformanz*
ISBN 978-3-8325-3846-0 50.50 EUR
- 175 Ingo Brebeck: Selbstreguliertes Lernen in der Studieneingangsphase im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3859-0 37.00 EUR
- 176 Axel Eghtessad: Merkmale und Strukturen von Professionalisierungsprozessen in der ersten und zweiten Phase der Chemielehrerbildung. *Eine empirisch-qualitative Studie mit niedersächsischen Fachleiter_innen der Sekundarstufenlehrämter*
ISBN 978-3-8325-3861-3 45.00 EUR
- 177 Andreas Nehring: Wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen im Fach Chemie. Eine kompetenzorientierte Modell- und Testentwicklung für den Bereich der Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-3872-9 39.50 EUR
- 178 Maike Schmidt: Professionswissen von Sachunterrichtslehrkräften. Zusammenhangsanalyse zur Wirkung von Ausbildungshintergrund und Unterrichtserfahrung auf das fachspezifische Professionswissen im Unterrichtsinhalt „Verbrennung“
ISBN 978-3-8325-3907-8 38.50 EUR

- 179 Jan Winkelmann: Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3915-3 41.00 EUR
- 180 Iwen Kobow: Entwicklung und Validierung eines Testinstrumentes zur Erfassung der Kommunikationskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3927-6 34.50 EUR
- 181 Yvonne Gramzow: Fachdidaktisches Wissen von Lehramtsstudierenden im Fach Physik. Modellierung und Testkonstruktion
ISBN 978-3-8325-3931-3 42.50 EUR
- 182 Evelin Schröter: Entwicklung der Kompetenzerwartung durch Lösen physikalischer Aufgaben einer multimedialen Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-3975-7 54.50 EUR
- 183 Inga Kallweit: Effektivität des Einsatzes von Selbsteinschätzungsbögen im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Individuelle Förderung durch selbstreguliertes Lernen*
ISBN 978-3-8325-3965-8 44.00 EUR
- 184 Andrea Schumacher: Paving the way towards authentic chemistry teaching. *A contribution to teachers' professional development*
ISBN 978-3-8325-3976-4 48.50 EUR
- 185 David Woitkowski: Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung. *Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung*
ISBN 978-3-8325-3988-7 53.00 EUR
- 186 Marianne Korner: Cross-Age Peer Tutoring in Physik. *Evaluation einer Unterrichtsmethode*
ISBN 978-3-8325-3979-5 38.50 EUR
- 187 Simone Nakoinz: Untersuchung zur Verknüpfung submikroskopischer und makroskopischer Konzepte im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4057-9 38.50 EUR
- 188 Sandra Anus: Evaluation individueller Förderung im Chemieunterricht. *Adaptivität von Lerninhalten an das Vorwissen von Lernenden am Beispiel des Basiskonzeptes Chemische Reaktion*
ISBN 978-3-8325-4059-3 43.50 EUR
- 189 Thomas Roßbegalle: Fachdidaktische Entwicklungsforschung zum besseren Verständnis atmosphärischer Phänomene. *Treibhauseffekt, saurer Regen und stratosphärischer Ozonabbau als Kontexte zur Vermittlung von Basiskonzepten der Chemie*
ISBN 978-3-8325-4059-3 45.50 EUR
- 190 Kathrin Steckenmesser-Sander: Gemeinsamkeiten und Unterschiede physikbezogener Handlungs-, Denk- und Lernprozesse von Mädchen und Jungen
ISBN 978-3-8325-4066-1 38.50 EUR
- 191 Cornelia Geller: Lernprozessorientierte Sequenzierung des Physikunterrichts im Zusammenhang mit Fachwissenserwerb. *Eine Videostudie in Finnland, Deutschland und der Schweiz*
ISBN 978-3-8325-4082-1 35.50 EUR

- 192 Jan Hofmann: Untersuchung des Kompetenzaufbaus von Physiklehrkräften während einer Fortbildungsmaßnahme
ISBN 978-3-8325-4104-0 38.50 EUR
- 193 Andreas Dickhäuser: Chemiespezifischer Humor. *Theoriebildung, Materialentwicklung, Evaluation*
ISBN 978-3-8325-4108-8 37.00 EUR
- 194 Stefan Korte: Die Grenzen der Naturwissenschaft als Thema des Physikunterrichts
ISBN 978-3-8325-4112-5 57.50 EUR
- 195 Carolin Hülsmann: Kurswahlmotive im Fach Chemie. Eine Studie zum Wahlverhalten und Erfolg von Schülerinnen und Schülern in der gymnasialen Oberstufe
ISBN 978-3-8325-4144-6 49.00 EUR
- 196 Caroline Körbs: Mindeststandards im Fach Chemie am Ende der Pflichtschulzeit
ISBN 978-3-8325-4148-4 34.00 EUR
- 197 Andreas Vorholzer: Wie lassen sich Kompetenzen des experimentellen Denkens und Arbeitens fördern? *Eine empirische Untersuchung der Wirkung eines expliziten und eines impliziten Instruktionsansatzes*
ISBN 978-3-8325-4194-1 37.50 EUR
- 198 Anna Katharina Schmitt: Entwicklung und Evaluation einer Chemielehrerfortbildung zum Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-4228-3 39.50 EUR
- 199 Christian Maurer: Strukturierung von Lehr-Lern-Sequenzen
ISBN 978-3-8325-4247-4 36.50 EUR
- 200 Helmut Fischler, Elke Sumfleth (Hrsg.): Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik
ISBN 978-3-8325-4523-9 34.00 EUR
- 201 Simon Zander: Lehrerfortbildung zu Basismodellen und Zusammenhänge zum Fachwissen
ISBN 978-3-8325-4248-1 35.00 EUR
- 202 Kerstin Arndt: Experimentierkompetenz erfassen. *Analyse von Prozessen und Mustern am Beispiel von Lehramtsstudierenden der Chemie*
ISBN 978-3-8325-4266-5 45.00 EUR
- 203 Christian Lang: Kompetenzorientierung im Rahmen experimentalchemischer Praktika
ISBN 978-3-8325-4268-9 42.50 EUR
- 204 Eva Cauet: Testen wir relevantes Wissen? *Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten*
ISBN 978-3-8325-4276-4 39.50 EUR
- 205 Patrick Löffler: Modellanwendung in Problemlöseaufgaben. *Wie wirkt Kontext?*
ISBN 978-3-8325-4303-7 35.00 EUR

- 206 Carina Gehlen: Kompetenzstruktur naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4318-1 43.00 EUR
- 207 Lars Oettinghaus: Lehrerüberzeugungen und physikbezogenes Professionswissen. *Vergleich von Absolventinnen und Absolventen verschiedener Ausbildungswege im Physikreferendariat*
ISBN 978-3-8325-4319-8 38.50 EUR
- 208 Jennifer Petersen: Zum Einfluss des Merkmals Humor auf die Gesundheitsförderung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Eine Interventionsstudie zum Thema Sonnenschutz*
ISBN 978-3-8325-4348-8 40.00 EUR
- 209 Philipp Straube: Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-4351-8 35.50 EUR
- 210 Martin Dickmann: Messung von Experimentierfähigkeiten. *Validierungsstudien zur Qualität eines computerbasierten Testverfahrens*
ISBN 978-3-8325-4356-3 41.00 EUR
- 211 Markus Bohlmann: Science Education. Empirie, Kulturen und Mechanismen der Didaktik der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4377-8 44.00 EUR
- 212 Martin Draude: Die Kompetenz von Physiklehrkräften, Schwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-4382-2 37.50 EUR
- 213 Henning Rode: Prototypen evidenzbasierten Physikunterrichts. *Zwei empirische Studien zum Einsatz von Feedback und Blackboxes in der Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-4389-1 42.00 EUR
- 214 Jan-Henrik Kechel: Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren. *Eine qualitative Studie am Beispiel einer Experimentieraufgabe zum Hooke'schen Gesetz*
ISBN 978-3-8325-4392-1 55.00 EUR
- 215 Katharina Fricke: Classroom Management and its Impact on Lesson Outcomes in Physics. *A multi-perspective comparison of teaching practices in primary and secondary schools*
ISBN 978-3-8325-4394-5 40.00 EUR
- 216 Hannes Sander: Orientierungen von Jugendlichen beim Urteilen und Entscheiden in Kontexten nachhaltiger Entwicklung. *Eine rekonstruktive Perspektive auf Bewertungskompetenz in der Didaktik der Naturwissenschaft*
ISBN 978-3-8325-4434-8 46.00 EUR
- 217 Inka Haak: Maßnahmen zur Unterstützung kognitiver und metakognitiver Prozesse in der Studieneingangsphase. *Eine Design-Based-Research-Studie zum universitären Lernzentrum Physiktreff*
ISBN 978-3-8325-4437-9 46.50 EUR

- 218 Martina Brandenburger: Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik?
Eine Untersuchung mit Studierenden
ISBN 978-3-8325-4409-6 42.50 EUR
- 219 Corinna Helms: Entwicklung und Evaluation eines Trainings zur Verbesserung der Erklärqualität von Schülerinnen und Schülern im Gruppenpuzzle
ISBN 978-3-8325-4454-6 42.50 EUR
- 220 Viktoria Rath: Diagnostische Kompetenz von angehenden Physiklehrkräften. *Modellierung, Testinstrumentenentwicklung und Erhebung der Performanz bei der Diagnose von Schülervorstellungen in der Mechanik*
ISBN 978-3-8325-4456-0 42.50 EUR
- 221 Janne Krüger: Schülerperspektiven auf die zeitliche Entwicklung der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4457-7 45.50 EUR
- 222 Stefan Mutke: Das Professionswissen von Chemiereferendarinnen und -referendaren in Nordrhein-Westfalen. *Eine Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-4458-4 37.50 EUR
- 223 Sebastian Habig: Systematisch variierte Kontextaufgaben und ihr Einfluss auf kognitive und affektive Schülerfaktoren
ISBN 978-3-8325-4467-6 40.50 EUR
- 224 Sven Liepertz: Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften, dem sachstrukturellen Angebot des Unterrichts und der Schülerleistung
ISBN 978-3-8325-4480-5 34.00 EUR
- 225 Elina Platova: Optimierung eines Laborpraktikums durch kognitive Aktivierung
ISBN 978-3-8325-4481-2 39.00 EUR
- 226 Tim Reschke: Lese geschichten im Chemieunterricht der Sekundarstufe I zur Unterstützung von situationalem Interesse und Lernerfolg
ISBN 978-3-8325-4487-4 41.00 EUR
- 227 Lena Mareike Walper: Entwicklung der physikbezogenen Interessen und selbstbezogenen Kognitionen von Schülerinnen und Schülern in der Übergangsphase von der Primar- in die Sekundarstufe. *Eine Längsschnittanalyse vom vierten bis zum siebten Schuljahr*
ISBN 978-3-8325-4495-9 43.00 EUR
- 228 Stefan Anthofer: Förderung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehramtsstudierenden
ISBN 978-3-8325-4498-0 39.50 EUR
- 229 Marcel Bullinger: Handlungsorientiertes Physiklernen mit instruierten Selbsterklärungen in der Primarstufe. *Eine experimentelle Laborstudie*
ISBN 978-3-8325-4504-8 44.00 EUR
- 230 Thomas Amenda: Bedeutung fachlicher Elementarisierungen für das Verständnis der Kinematik
ISBN 978-3-8325-4531-4 43.50 EUR

- 231 Sabrina Milke: Beeinflusst *Priming* das Physiklernen?
Eine empirische Studie zum Dritten Newtonschen Axiom
ISBN 978-3-8325-4549-4 42.00 EUR
- 232 Corinna Erfmann: Ein anschaulicher Weg zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion. *Evaluation eines Unterrichtsvorschlags und Validierung eines Leistungsdiagnoseinstruments*
ISBN 978-3-8325-4550-5 49.50 EUR
- 233 Hanne Rautenstrauch: Erhebung des (Fach-)Sprachstandes bei Lehramtsstudierenden im Kontext des Faches Chemie
ISBN 978-3-8325-4556-7 40.50 EUR
- 234 Tobias Klug: Wirkung kontextorientierter physikalischer Praktikumsversuche auf Lernprozesse von Studierenden der Medizin
ISBN 978-3-8325-4558-1 37.00 EUR
- 235 Mareike Bohrmann: Zur Förderung des Verständnisses der Variablenkontrolle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht
ISBN 978-3-8325-4559-8 52.00 EUR
- 236 Anja Schödl: FALKO-Physik – Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik. *Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften*
ISBN 978-3-8325-4553-6 40.50 EUR
- 237 Hilda Scheuermann: Entwicklung und Evaluation von Unterstützungsmaßnahmen zur Förderung der Variablenkontrollstrategie beim Planen von Experimenten
ISBN 978-3-8325-4568-0 39.00 EUR
- 238 Christian G. Strippel: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung an chemischen Inhalten vermitteln. *Konzeption und empirische Untersuchung einer Ausstellung mit Experimentierstation*
ISBN 978-3-8325-4577-2 41.50 EUR
- 239 Sarah Rau: Durchführung von Sachunterricht im Vorbereitungsdienst. *Eine längsschnittliche, videobasierte Unterrichtsanalyse*
ISBN 978-3-8325-4579-6 46.00 EUR
- 240 Thomas Plotz: Lernprozesse zu nicht-sichtbarer Strahlung. *Empirische Untersuchungen in der Sekundarstufe 2*
ISBN 978-3-8325-4624-3 39.50 EUR
- 241 Wolfgang Aschauer: Elektrische und magnetische Felder. *Eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-4625-0 50.00 EUR
- 242 Anna Donhauser: Didaktisch rekonstruierte Materialwissenschaft. *Aufbau und Konzeption eines Schülerlabors für den Exzellenzcluster Engineering of Advanced Materials*
ISBN 978-3-8325-4636-6 39.00 EUR

- 243 Katrin Schüßler: Lernen mit Lösungsbeispielen im Chemieunterricht. *Einflüsse auf Lernerfolg, kognitive Belastung und Motivation*
ISBN 978-3-8325-4640-3 42.50 EUR
- 244 Timo Fleischer: Untersuchung der chemischen Fachsprache unter besonderer Berücksichtigung chemischer Repräsentationen
ISBN 978-3-8325-4642-7 46.50 EUR
- 245 Rosina Steininger: Concept Cartoons als Stimuli für Kleingruppendiskussionen im Chemieunterricht. *Beschreibung und Analyse einer komplexen Lerngelegenheit*
ISBN 978-3-8325-4647-2 39.00 EUR
- 246 Daniel Rehfeldt: Erfassung der Lehrqualität naturwissenschaftlicher Experimentalpraktika
ISBN 978-3-8325-4590-1 40.00 EUR
- 247 Sandra Puddu: Implementing Inquiry-based Learning in a Diverse Classroom: Investigating Strategies of Scaffolding and Students' Views of Scientific Inquiry
ISBN 978-3-8325-4591-8 35.50 EUR
- 248 Markus Bliersbach: Kreativität in der Chemie. *Erhebung und Förderung der Vorstellungen von Chemielehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4593-2 44.00 EUR
- 249 Lennart Kimpel: Aufgaben in der Allgemeinen Chemie. *Zum Zusammenspiel von chemischem Verständnis und Rechenfähigkeit*
ISBN 978-3-8325-4618-2 36.00 EUR
- 250 Louise Bindel: Effects of integrated learning: explicating a mathematical concept in inquiry-based science camps
ISBN 978-3-8325-4655-7 37.50 EUR
- 251 Michael Wenzel: Computereinsatz in Schule und Schülerlabor. *Einstellung von Physiklehrkräften zu Neuen Medien*
ISBN 978-3-8325-4659-5 38.50 EUR
- 252 Laura Muth: Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-4675-5 36.50 EUR
- 253 Annika Fricke: Interaktive Skripte im Physikalischen Praktikum. *Entwicklung und Evaluation von Hypermedien für die Nebenfachausbildung*
ISBN 978-3-8325-4676-2 41.00 EUR
- 254 Julia Haase: Selbstbestimmtes Lernen im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. *Eine empirische Interventionsstudie mit Fokus auf Feedback und Kompetenzerleben*
ISBN 978-3-8325-4685-4 38.50 EUR
- 255 Antje J. Heine: Was ist Theoretische Physik? *Eine wissenschaftstheoretische Betrachtung und Rekonstruktion von Vorstellungen von Studierenden und Dozenten über das Wesen der Theoretischen Physik*
ISBN 978-3-8325-4691-5 46.50 EUR

- 256 Claudia Meinhardt: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu Selbstwirksamkeitserwartungen von (angehenden) Physiklehrkräften in physikdidaktischen Handlungsfeldern
ISBN 978-3-8325-4712-7 47.00 EUR
- 257 Ann-Kathrin Schlüter: Professionalisierung angehender Chemielehrkräfte für einen Gemeinsamen Unterricht
ISBN 978-3-8325-4713-4 53.50 EUR
- 258 Stefan Richtberg: Elektronenbahnen in Feldern. Konzeption und Evaluation einer webbasierten Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-4723-3 49.00 EUR
- 259 Jan-Philipp Burde: Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells
ISBN 978-3-8325-4726-4 57.50 EUR
- 260 Frank Finkenberg: Flipped Classroom im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-4737-4 42.50 EUR
- 261 Florian Treisch: Die Entwicklung der Professionellen Unterrichtswahrnehmung im Lehr-Lern-Labor Seminar
ISBN 978-3-8325-4741-4 41.50 EUR
- 262 Desiree Mayr: Strukturiertheit des experimentellen naturwissenschaftlichen Problemlöseprozesses
ISBN 978-3-8325-4757-8 37.00 EUR
- 263 Katrin Weber: Entwicklung und Validierung einer Learning Progression für das Konzept der chemischen Reaktion in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4762-2 48.50 EUR
- 264 Hauke Bartels: Entwicklung und Bewertung eines performanznahen Videovignetten-tests zur Messung der Erklärfähigkeit von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-4804-9 37.00 EUR
- 265 Karl Marniok: Zum Wesen von Theorien und Gesetzen in der Chemie. *Begriffsanalyse und Förderung der Vorstellungen von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4805-6 42.00 EUR
- 266 Marisa Holzapfel: Fachspezifischer Humor als Methode in der Gesundheitsbildung im Übergang von der Primarstufe zur Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4808-7 50.00 EUR
- 267 Anna Stolz: Die Auswirkungen von Experimentiersituationen mit unterschiedlichem Öffnungsgrad auf Leistung und Motivation der Schülerinnen und Schüler
ISBN 978-3-8325-4781-3 38.00 EUR
- 268 Nina Ulrich: Interaktive Lernaufgaben in dem digitalen Schulbuch eChemBook. *Einfluss des Interaktivitätsgrads der Lernaufgaben und des Vorwissens der Lernenden auf den Lernerfolg*
ISBN 978-3-8325-4814-8 43.50 EUR

- 269 Kim-Alessandro Weber: Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. *Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt Photon mit Realexperimenten*
ISBN 978-3-8325-4792-9 55.00 EUR
- 270 Nina Skorsetz: Empathisierer und Systematisierer im Vorschulalter. *Eine Fragebogen- und Videostudie zur Motivation, sich mit Naturphänomenen zu beschäftigen*
ISBN 978-3-8325-4825-4 43.50 EUR
- 271 Franziska Kehne: Analyse des Transfers von kontextualisiert erworbenem Wissen im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4846-9 45.00 EUR
- 272 Markus Elsholz: Das akademische Selbstkonzept angehender Physiklehrkräfte als Teil ihrer professionellen Identität. *Dimensionalität und Veränderung während einer zentralen Praxisphase*
ISBN 978-3-8325-4857-5 37.50 EUR
- 273 Joachim Müller: Studienerfolg in der Physik. *Zusammenhang zwischen Modellierungskompetenz und Studienerfolg*
ISBN 978-3-8325-4859-9 35.00 EUR
- 274 Jennifer Dörscheln: Organische Leuchtdioden. *Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-4865-0 59.00 EUR
- 275 Stephanie Strelow: Beliefs von Studienanfängern des Kombi-Bachelors Physik über die Natur der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4881-0 40.50 EUR
- 276 Dennis Jaeger: Kognitive Belastung und aufgabenspezifische sowie personenspezifische Einflussfaktoren beim Lösen von Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-4928-2 50.50 EUR
- 277 Vanessa Fischer: Der Einfluss von Interesse und Motivation auf die Messung von Fach- und Bewertungskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4933-6 39.00 EUR
- 278 René Dohrmann: Professionsbezogene Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Veranstaltung. *Eine multimethodische Studie zu den professionsbezogenen Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Blockveranstaltung auf Studierende der Bachelorstudiengänge Lehramt Physik und Grundschulpädagogik (Sachunterricht)*
ISBN 978-3-8325-4958-9 40.00 EUR
- 279 Meike Bergs: Can We Make Them Use These Strategies? *Fostering Inquiry-Based Science Learning Skills with Physical and Virtual Experimentation Environments*
ISBN 978-3-8325-4962-6 39.50 EUR
- 280 Marie-Therese Hauerstein: Untersuchung zur Effektivität von Strukturierung und Binnendifferenzierung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Strukturierungshilfe Lernleiter*
ISBN 978-3-8325-4982-4 42.50 EUR

- 281 Verena Zucker: Erkennen und Beschreiben von formativem Assessment im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Entwicklung eines Instruments zur Erfassung von Teilfähigkeiten der professionellen Wahrnehmung von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4991-6 38.00 EUR
- 282 Victoria Telser: Erfassung und Förderung experimenteller Kompetenz von Lehrkräften im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4996-1 50.50 EUR
- 283 Kristine Tschirschky: Entwicklung und Evaluation eines gedächtnisorientierten Aufgabendesigns für Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-5002-8 42.50 EUR
- 284 Thomas Elert: Course Success in the Undergraduate General Chemistry Lab
ISBN 978-3-8325-5004-2 41.50 EUR
- 285 Britta Kalthoff: Explizit oder implizit? *Untersuchung der Lernwirksamkeit verschiedener fachmethodischer Instruktionen im Hinblick auf fachmethodische und fachinhaltliche Fähigkeiten von Sachunterrichtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-5013-4 37.50 EUR
- 286 Thomas Dickmann: Visuelles Modellverständnis und Studienerfolg in der Chemie. *Zwei Seiten einer Medaille*
ISBN 978-3-8325-5016-5 44.00 EUR
- 287 Markus Sebastian Feser: Physiklehrkräfte korrigieren Schülertexte. *Eine Explorationsstudie zur fachlich-konzeptuellen und sprachlichen Leistungsfeststellung und -beurteilung im Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-5020-2 49.00 EUR
- 288 Matylda Dudzinska: Lernen mit Beispielaufgaben und Feedback im Physikunterricht der Sekundarstufe 1. *Energieerhaltung zur Lösung von Aufgaben nutzen*
ISBN 978-3-8325-5025-7 47.00 EUR
- 289 Ines Sonnenschein: Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsprozesse Studierender im Labor
ISBN 978-3-8325-5033-2 52.00 EUR
- 290 Florian Simon: Der Einfluss von Betreuung und Betreuenden auf die Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen. *Eine Zusammenhangsanalyse von Betreuungsqualität, Betreuermerkmalen und Schülerlaborzielen sowie Replikationsstudie zur Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen*
ISBN 978-3-8325-5036-3 49.50 EUR
- 291 Marie-Annette Geyer: Physikalisch-mathematische Darstellungswechsel funktionaler Zusammenhänge. *Das Vorgehen von SchülerInnen der Sekundarstufe 1 und ihre Schwierigkeiten*
ISBN 978-3-8325-5047-9 46.50 EUR
- 292 Susanne Digel: Messung von Modellierungskompetenz in Physik. *Theoretische Herleitung und empirische Prüfung eines Kompetenzmodells physikspezifischer Modellierungskompetenz*
ISBN 978-3-8325-5055-4 41.00 EUR

- 293 Sönke Janssen: Angebots-Nutzungs-Prozesse eines Schülerlabors analysieren und gestalten. *Ein design-based research Projekt*
ISBN 978-3-8325-5065-3 57.50 EUR
- 294 Knut Wille: Der Productive Failure Ansatz als Beitrag zur Weiterentwicklung der Aufgabenkultur
ISBN 978-3-8325-5074-5 49.00 EUR
- 295 Lisanne Kraeva: Problemlösestrategien von Schülerinnen und Schülern diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5110-0 59.50 EUR
- 296 Jenny Lorentzen: Entwicklung und Evaluation eines Lernangebots im Lehramtsstudium Chemie zur Förderung von Vernetzungen innerhalb des fachbezogenen Professionswissens
ISBN 978-3-8325-5120-9 39.50 EUR
- 297 Micha Winkelmann: Lernprozesse in einem Schülerlabor unter Berücksichtigung individueller naturwissenschaftlicher Interessenstrukturen
ISBN 978-3-8325-5147-6 48.50 EUR
- 298 Carina Wöhlke: Entwicklung und Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung angehender Physiklehrkräfte
ISBN 978-3-8325-5149-0 43.00 EUR
- 299 Thomas Schubatzky: Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. *Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*
ISBN 978-3-8325-5159-9 50.50 EUR
- 300 Amany Annaggar: A Design Framework for Video Game-Based Gamification Elements to Assess Problem-solving Competence in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-5150-6 52.00 EUR
- 301 Alexander Engl: CHEMIE PUR – Unterrichten in der Natur: *Entwicklung und Evaluation eines kontextorientierten Unterrichtskonzepts im Bereich Outdoor Education zur Veränderung der Einstellung zu „Chemie und Natur“*
ISBN 978-3-8325-5174-2 59.00 EUR
- 302 Christin Marie Sajons: Kognitive und motivationale Dynamik in Schülerlaboren. *Kontextualisierung, Problemorientierung und Autonomieunterstützung der didaktischen Struktur analysieren und weiterentwickeln*
ISBN 978-3-8325-5155-1 56.00 EUR
- 303 Philipp Bitzenbauer: Quantenoptik an Schulen. *Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*
ISBN 978-3-8325-5123-0 59.00 EUR
- 304 Malte S. Ubben: Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik
ISBN 978-3-8325-5181-0 43.50 EUR
- 305 Wiebke Kuske-Janßen: Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8
ISBN 978-3-8325-5183-4 47.50 EUR

306 Kai Bliesmer: Physik der Küste für außerschulische Lernorte *Eine Didaktische Rekonstruktion*
ISBN 978-3-8325-5190-2 58.00 EUR

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN direkt online (<http://www.logos-verlag.de>) oder per Fax (030 - 42 85 10 92) beim Logos Verlag Berlin bestellt werden.

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Hans Niedderer, Helmut Fischler und Elke Sumfleth

Die Reihe umfasst inzwischen eine große Zahl von wissenschaftlichen Arbeiten aus vielen Arbeitsgruppen der Physik- und Chemiedidaktik und zeichnet damit ein gültiges Bild der empirischen physik- und chemiedidaktischen Forschung in Deutschland.

Die Herausgeber laden daher Interessenten zu neuen Beiträgen ein und bitten sie, sich im Bedarfsfall an den Logos-Verlag oder an ein Mitglied des Herausgeberteams zu wenden.

Kontaktadressen:

Prof. Dr. Hans Niedderer
Institut für Didaktik der Naturwissenschaften,
Abt. Physikdidaktik, FB Physik/Elektrotechnik,
Universität Bremen,
Postfach 33 04 40, 28334 Bremen
Tel. 0421-218 2484/4695, e-mail:
niedderer@physik.uni-bremen.de

Prof. Dr. Helmut Fischler
Didaktik der Physik, FB Physik, Freie Universität Berlin,
Arnimallee 14, 14195 Berlin
Tel. 030-838 56712/55966, e-mail:
fischler@physik.fu-berlin.de

Prof. Dr. Elke Sumfleth
Didaktik der Chemie,
Fachbereich Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen
Tel. 0201-183 3757/3761, e-mail:
elke.sumfleth@uni-essen.de

Verständnisprozesse sind zentraler Teil des Lernens und der Bildung. Beim Erlernen von Quantenphysik sind diese Prozesse jedoch oft durch klassische Vorstellungen blockiert. Zur genaueren Erörterung dieser Problematik wird eine Studie vorgestellt, die klassische und quantenphysikalische mentale Modelle von Lernenden erhebt und zu dem allgemeinen Modellverständnis in Beziehung setzt.

Die Datenerhebung erfolgte per Onlinefragebogen und deckt eine breite Probandengruppe ab, zu der neben Lernenden verschiedener Schul- und Hochschulformen auch Lehrerinnen und Lehrer sowie viele andere Berufsgruppen gehören. Die empirischen Daten weisen darauf hin, dass die jeweilige Gestalt und Funktionalität der mentalen Modelle unabhängig voneinander in Bezug auf ihre Realitätstreue interpretiert werden. Aus dieser Beschreibung werden vier Verständnistypen mentaler Modelle abgeleitet und in die derzeitige naturwissenschaftsdidaktische Erkenntnislage eingeordnet.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5181-0