



Oliver Passon
Thomas Zügge
Johannes Grebe-Ellis *Hrsg.*

Kohärenz im Unterricht der Elementarteilchenphysik

Tagungsband des Symposiums zur Didaktik
der Teilchenphysik, Wuppertal 2018



Springer Spektrum

Kohärenz im Unterricht der Elementarteilchenphysik

Oliver Passon · Thomas Zügge ·
Johannes Grebe-Ellis
(Hrsg.)

Kohärenz im Unterricht der Elementarteilchenphysik

Tagungsband des Symposiums zur
Didaktik der Teilchenphysik, Wuppertal
2018

 Springer Spektrum

Hrsg.

Oliver Passon
Fakultät für Mathematik und
Naturwissenschaften, AG Physik und ihre
Didaktik, Bergische Universität Wuppertal
Wuppertal, Deutschland

Thomas Zügge
Fakultät für Mathematik und
Naturwissenschaften, AG Physik und ihre
Didaktik, Bergische Universität Wuppertal
Wuppertal, Deutschland

Johannes Grebe-Ellis
Fakultät für Mathematik und
Naturwissenschaften, AG Physik und ihre
Didaktik, Bergische Universität Wuppertal
Wuppertal, Deutschland

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

ISBN 978-3-662-61606-2 ISBN 978-3-662-61607-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61607-9>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Lisa Edelhaeuser

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Wir freuen uns, mit diesem Band die Ergebnisse des Symposions „Kohärenz im Unterricht der Elementarteilchenphysik“ vorlegen zu können, das am 20. und 21. Oktober 2018 in Wuppertal stattgefunden hat. Der Anlass zu der Veranstaltung ergab sich aus einem zum Teil mehrjährigen, intensiven Austausch mit verschiedenen Akteuren auf dem Gebiet der Didaktik der Teilchenphysik. Ziel des Symposions, das von der Arbeitsgruppe *Physik und ihre Didaktik* der Bergischen Universität Wuppertal veranstaltet wurde, war eine Zusammenschau verschiedener fachlicher und fachdidaktischer Gesichtspunkte zu der Frage nach relevanten Inhalten für den schulischen Unterricht zur Elementarteilchenphysik.

Die Veranstaltung bildete zugleich einen Abschluss des Projekts „Elementarteilchenphysik kompetent und spannend unterrichten“, das als Teilprojekt der mit Mitteln des BMBF geförderten Maßnahmenlinie „Curriculare Weiterentwicklung“ des Projekts „Kohärenz in der Lehrerbildung“ (KoLBi) von 2015 bis 2018 an der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt wurde. Ein besonderes Merkmal der in diesem Rahmen durchgeführten Teilprojekte bestand in der Kooperation zwischen je einer Fachwissenschaft, der zugehörigen Fachdidaktik und den Bildungswissenschaften. Im Falle unseres Teilprojektes war das die experimentelle Teilchenphysik, vertreten durch die Kollegen Wolfgang Wagner und Christian Zeitnitz, die Fachdidaktik der Physik, vertreten durch Johannes Grebe-Ellis, Oliver Passon und den im Projekt promovierenden Mitarbeiter Thomas Zügge, sowie die Bildungswissenschaft, vertreten durch Cornelia Gräsel.

Ziel der Zusammenarbeit in diesem Kreis war die Entwicklung eines curricularen Vorschlags für den Unterricht der Elementarteilchenphysik, die Konzeption entsprechender Lehrangebote für Lehramtsstudierende sowie die Entwicklung und Durchführung von Lehrendenfortbildungen. Durch die Zusammenführung fachlicher, fachdidaktischer und bildungswissenschaftlicher Gesichtspunkte sollten Bausteine eines umfassend abgestimmten, oder, wie es im Titel des Gesamtprojekts anklingt, „kohärenten“ Aus- und Weiterbildungsangebotes geschaffen werden. Entscheidend für das in diesem Zusammenhang entstandene „Wuppertaler Curriculum“ war die Möglichkeit, sich mit Michael Kobel und weiteren Vertreterinnen und Vertretern vom Netzwerk Teilchenwelt sowie den Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe von Sascha Schmeling am CERN, namentlich Julia Woithe, austauschen zu können, die zum Teil bereits seit

vielen Jahren an einem Curriculum zur Teilchenphysik für die Schule gearbeitet haben.

Den Inhalt des vorliegenden Bandes bilden die Beiträge, die von den Beteiligten im Anschluss an das Symposium ausgearbeitet wurden. Die Diskussionen im Anschluss an die Vorträge wurden aufgezeichnet und von uns zusammengefasst. Sie sind jedem Beitrag als jeweils letztes Unterkapitel hinzugefügt.¹

Wie verschieden die Perspektiven sind, aus denen im Rahmen unseres Projekts argumentiert und gehört wurde, lässt sich vielleicht am besten anhand der Beiträge von Wolfgang Wagner (Kap. 1), Thomas Zügge (Kap. 4) und Oliver Passon (Kap. 5) erahnen. Einige unserer Auffassung nach relevante Perspektiven, die in unserem Projekt nicht durch Personen vertreten waren, kamen dankenswerterweise im Rahmen des Symposiums ebenfalls zu Wort. Eine theoretisch-physikalische Perspektive ergänzt Robert Harlander (Kap. 2), und Brigitte Falkenburg behandelt die Frage nach dem Bildungswert der Elementarteilchenphysik aus einer philosophischen Perspektive (Kap. 3).

Um dem Leser die Orientierung zu erleichtern und den Zusammenhang der Kapitel untereinander anzudeuten, wird der Inhalt der Beiträge im Folgenden kurz skizziert.

Den Auftakt macht in Kap. 1 der Beitrag von Prof. Dr. Wolfgang Wagner (Wuppertal), der nicht nur aus der Perspektive des experimentellen Teilchenphysikers auf den Gegenstand blickt, sondern als Mitglied der Projektleitung den Entwicklungsprozess des „Wuppertaler Curriculums“ mitgestaltet und aktiv begleitet hat. Die Frage nach „Quarks und Feynman-Diagrammen: Basiswissen im Schulunterricht?“ beantwortet er somit auch vor dem Hintergrund der intensiven didaktischen Diskussionen, die in den letzten Jahren in der Projektgruppe geführt wurden. Sein Beitrag ist ein ausdrückliches Plädoyer für die Einbeziehung der Teilchenphysik in den Schulunterricht; die aktive Nutzung von Feynman-Diagrammen als Werkzeug der Darstellung wird von ihm ausdrücklich empfohlen.

Der Beitrag des theoretischen Physikers Prof. Dr. Robert Harlander (Aachen) über die „Erzeugung und Vernichtung von Teilchen“ in Kap. 2 weicht von seinem Symposiumsbeitrag ab und stellt im Kern eine knappe Einführung in die konzeptionellen Grundlagen der Quantenfeldtheorie dar. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Symbolsprache der Feynman-Diagramme, deren Ursprung und Bedeutung genauer diskutiert werden. Der Anhang dieses Beitrages beinhaltet Überlegungen zu den Konzepten „Intuition“, „Analogien“ sowie „Begrifflichkeiten“. Die Gedanken des Autors beziehen sich dabei explizit auf die Diskussionen, die auf der Tagung geführt wurden.

¹Lediglich für die didaktischen Impulse wurde von diesem Vorgehen abgewichen. Deren Diskussion ist (gemeinsam mit der Abschlussdiskussion) in Kap. 9 dokumentiert.

In Kap. 3 unternimmt die Wissenschaftsphilosophin und Physikerin Prof. Dr. Dr. Brigitte Falkenburg (Dortmund) eine philosophische Analyse der Astroteilchenphysik. Hier kommt es zu einer faszinierenden Blickumkehr im Vergleich zu den Beiträgen von Wagner und Harlander. Während in der dort behandelten beschleunigerbasierten Teilchenphysik (vereinfacht ausgedrückt) bekannte Anfangszustände der Materie verwendet werden, um bisher unbekannte Zustände im Detektor zu entdecken, misst man in der Astroteilchenphysik bekannte Endzustände, um auf unbekannte Quellen zu schließen.

Der Beitrag von Thomas Zügge (Wuppertal) in Kap. 4 nähert sich dem Gegenstand aus der Perspektive der Bildungswissenschaften. Ausgehend von einer Definition des Bildungsbegriffs versucht er, zentrale und bildende Inhalte für den Unterricht der Elementarteilchenphysik zu identifizieren. Dabei benennt er nicht nur fachsystematische Bezüge, sondern verweist auch auf die Lebenswelt der Lernenden als Stifter von Bildungsanlässen für den Unterricht.

In Kap. 5 thematisiert Dr. Oliver Passon (Wuppertal) ein kurioses Spannungsverhältnis in der Didaktik der modernen Physik, das sich im Titel seines Beitrags: „Mystifizierung der Quantenmechanik und Trivialisierung der Teilchenphysik“ andeutet. Der Beitrag beschreibt diesen Sachverhalt, ordnet ihn lerntheoretisch ein und macht Vorschläge für eine vermittelnde Position.

Am zweiten Tag des Symposions standen explizit didaktische Fragen im Vordergrund. Den Auftakt machte Prof. Dr. Michael Kobel (Dresden), der in Kap. 6 zusammen mit Philipp Lindenau die curriculare Basis des Netzwerkes Teilchenwelt vorstellt. In der langjährigen Arbeit zu Inhalten der Teilchenphysik ist dort der Gesichtspunkt von Symmetrie und Erhaltungssätzen immer mehr in den Vordergrund gerückt, während der konkrete Teilcheninhalt des Standardmodells nur eine untergeordnete Rolle spielt. Angemerkt sei, dass die „Basiskonzepte des Standardmodells“, die im Titel dieses Beitrags erwähnt werden, nicht mit den „Basiskonzepten“ der Bildungsstandards Physik verwechselt werden dürfen.

Im Kap. 7 gibt Julia Woithe (zusammen mit Jochen Kuhn, Andreas Müller und Sascha Schmeling als Koautoren) einen Überblick über die vielfältigen Aktivitäten des Lernlabors „S’Cool LAB“ am europäischen Forschungszentrum für Teilchenphysik (CERN). Daneben werden erste Ergebnisse der fachdidaktischen Begleitforschung präsentiert.

Im Kap. 8 stellen Thomas Zügge und Oliver Passon mit dem „Wuppertaler Curriculum der Teilchenphysik“ das vorläufige Arbeitsergebnis des bereits mehrfach erwähnten KoLBi-Projekts an der Uni Wuppertal vor. In vier „Bausteinen“ wird hier eine fachsystematische Gliederung vorgeschlagen, die durch didaktische Impulse aus der Entwicklungspsychologie und Lehr-Lerntheorie informiert ist. Gleichzeitig wird versucht, verbreitete trivialisierende Narrative der Teilchenphysik zu vermeiden.

Die Herausgeber bedanken sich bei den Autorinnen und Autoren für ihre Mitarbeit an diesem Band und bei Dr. Lisa Edelhäuser und Stefanie Adam vom Springer Verlag für die geduldige und angenehme Zusammenarbeit. Wir wünschen dem Buch interessierte Leserinnen und Leser und diesen eine anregende Lektüre!

Wuppertal
im Februar 2020

Oliver Passon
Thomas Zügge
Johannes Grebe-Ellis

Die Teilnehmenden

Stefan Brackertz (Uni Köln)
Brigitte Falkenburg (TU Dortmund)
Johannes Grebe-Ellis (BU Wuppertal)
Georg Haehn (Kompetenzteam Bergisch Land)
Robert Harlander (RWTH Aachen)
Ulrich Heinen (BU Wuppertal)
Stefan Heusler (WWU Münster)
Michael Kobel (TU Dresden)
Philipp Lindenau (TU Dresden)
Oliver Passon (BU Wuppertal)
Andreas Schulz (Uni Köln)
Wolfgang Wagner (BU Wuppertal)
Daniel Wickeroth (Uni Köln)
Julia Woithe (CERN, TU Kaiserslautern)
Thomas Zügge (BU Wuppertal)

Inhaltsverzeichnis

Teil I Fachliche Perspektiven

1 Quarks und Feynman-Diagramme: Basiswissen im Schulunterricht?	3
Wolfgang Wagner	
1.1 Vor- und Nachteile der Elementarteilchenphysik im Schulunterricht	4
1.2 Quarks im Physikunterricht. Aber wie?	5
1.3 Feynman-Diagramme im Schulunterricht?	7
1.4 Zusammenfassung	9
1.5 Diskussion zum Vortrag von Wolfgang Wagner	10
Literatur	11
2 Erzeugung und Vernichtung von Teilchen	13
Robert Harlander	
2.1 Einführung und Motivation	13
2.2 Quantenmechanik	16
2.3 Quantenfeldtheorie und Feynman-Diagramme	20
2.4 Zusammenfassung	30
2.5 Anhang	31
3 Teilchen und Wellen als kosmische Boten: Eine philosophische Analyse	37
Brigitte Falkenburg	
3.1 Zur Entstehung der Astroteilchenphysik	38
3.2 Botenteilchen	40
3.3 Teilchen oder Wellen?	42
3.4 Methoden der Astroteilchenphysik	45
3.5 Zum Wirklichkeitsverständnis der Astroteilchenphysik	49
3.6 Multi-Messenger-Astrophysik	50
3.7 Diskussion zum Vortrag von Brigitte Falkenburg	51
Literatur	53

4	Mit moderner Physik zum mündigen Bürger?	55
	Thomas Zügge	
4.1	Zum Bildungsauftrag des Physikunterrichts	56
4.2	Bildungswert der Elementarteilchenphysik	61
4.3	Eine entwicklungssensible Ergänzung.	64
4.4	Zusammenführung und Impulse für den Unterricht der Elementarteilchenphysik	72
4.5	Diskussion zum Vortrag von Thomas Zügge	72
	Literatur.	76
5	Mystifizierung der Quantenmechanik und Trivialisierung der Teilchenphysik	79
	Oliver Passon	
5.1	Ein kurzer Blick auf die spezielle Relativitätstheorie	80
5.2	Präkonzepte und Konzeptwechsel	80
5.3	Mystifizierung der Quantenmechanik	81
5.4	Trivialisierung der Teilchenphysik.	84
5.5	Zusammenfassung und Ausblick	86
5.6	Diskussion zum Vortrag von Oliver Passon	87
	Literatur.	89
 Teil II Didaktische Impulse		
6	Eine anschlussfähige Begriffsbildung der Basiskonzepte des Standardmodells für die Schule	93
	Michael Kobel und Philipp Lindenau	
6.1	Einleitung und Motivation	93
6.2	Die Basiskonzepte des Standardmodells	95
6.3	Zusammenfassung und Schlussbemerkungen	105
	Literatur.	105
7	Hands-on- & Minds-on- Teilchenphysikexperimente im CERN-Schülerlabor S’Cool LAB	107
	Julia Woithe, Jochen Kuhn, Andreas Müller und Sascha Schmeling	
7.1	Das Schülerlabor S’Cool LAB am CERN – Geschichte und Motivation	108
7.2	Didaktisches Design der S’Cool LAB-Workshops	109
7.3	A Hands-on Tour Through Particle Physics on a Small Budget	117
7.4	Zusammenfassung	118
	Literatur.	118
8	Das Wuppertaler Curriculum der Elementarteilchenphysik	121
	Thomas Zügge und Oliver Passon	
8.1	Grundlagen des Wuppertaler Curriculums.	122
8.2	Die vier Bausteine	124
8.3	Zusammenfassung	140
	Literatur.	141

9 Diskussion der didaktischen Impulse und Abschlussdiskussion	143
Oliver Passon und Thomas Zügge	
9.1 Diskussion zu den didaktischen Impulsen	143
9.2 Abschlussdiskussion	147

Herausgeber- und Autorenverzeichnis

Herausgeber

Oliver Passon Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland

Thomas Zügge Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland

Johannes Grebe-Ellis Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland

Autorenverzeichnis

Brigitte Falkenburg Technische Universität Dortmund, Dortmund, Deutschland

Robert Harlander RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Michael Kobel Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Jochen Kuhn TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, Deutschland

Philipp Lindenau Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Andreas Müller Université de Genève, Geneva, Schweiz

Oliver Passon Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland

Sascha Schmeling CERN, Education, Communication, and Outreach Group, Geneva, Schweiz

Wolfgang Wagner Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland

Julia Woithe CERN, Education, Communication, and Outreach Group, Geneva, Schweiz; TU Kaiserslautern, Kaiserslautern, Deutschland

Thomas Zügge Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland

Teil I
Fachliche Perspektiven



Quarks und Feynman-Diagramme: Basiswissen im Schulunterricht?

1

Wolfgang Wagner

Inhaltsverzeichnis

1.1	Vor- und Nachteile der Elementarteilchenphysik im Schulunterricht	4
1.2	Quarks im Physikunterricht. Aber wie?	5
1.3	Feynman-Diagramme im Schulunterricht?	7
1.4	Zusammenfassung	9
1.5	Diskussion zum Vortrag von Wolfgang Wagner	10

Im Rahmen der Erarbeitung eines Wuppertaler Vorschlags für ein Curriculum der Elementarteilchenphysik in der gymnasialen Oberstufe wurde intensiv darüber diskutiert, anhand welcher Inhalte sich das Gebiet der Elementarteilchenphysik am besten erschließen lässt. Zwei Fragen standen in diesem Prozess besonders im Fokus der Diskussion:

1. In welcher Weise sollen die Quarks im Unterricht eingeführt werden?
2. Sollen Feynman-Diagramme im Unterricht behandelt werden oder nicht?

Diese beiden konkreten curricularen Fragen werden im vorliegenden Beitrag eingehend erörtert. Es ist jedoch lohnenswert, zuvor einen breiteren Kontext für die Diskussion herzustellen, indem das Für und Wider der Behandlung der Elementarteilchenphysik im Schulunterricht im Allgemeinen betrachtet wird.

W. Wagner (✉)

Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, Experimentelle Teilchenphysik,
Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Deutschland
E-Mail: wagner@uni-wuppertal.de

1.1 Vor- und Nachteile der Elementarteilchenphysik im Schulunterricht

Die Beschränkung auf einige wenige Unterrichtsstunden – im Wuppertaler Curriculum werden vier Doppelstunden zugrunde gelegt – stellt eine prägende Rahmenbedingung für die Behandlung der Elementarteilchenphysik im Schulunterricht dar. Es muss folglich in der beschränkten Zeit um die Vermittlung fundamentaler Konzepte der Elementarteilchenphysik gehen. Womit sich die Frage stellt, welche Inhalte diesen fundamentalen Charakter aufweisen und somit als Basiswissen Teil eines schulischen Curriculums sein sollten. Eine weitere wichtige Randbedingung im Schulunterricht sind die begrenzten mathematischen Kenntnisse der Schülerinnen und Schüler. Der mögliche Kompetenzerwerb ist auch von dieser Seite her eingeschränkt.

Aus den beiden angesprochenen Einschränkungen lassen sich Argumente gegen die Behandlung der Elementarteilchenphysik im Unterricht ableiten. Durch die Hinzunahme eines weiteren Themenfeldes wird Unterrichtszeit gebunden, die ansonsten für andere wichtige Themen der modernen Physik genutzt werden kann. Dazu gehören vor allem die Quantenmechanik und die Kernphysik. Es erscheint auf den ersten Blick sinnvoller, diese Themen ausführlicher und intensiver zu behandeln, als dies möglich ist, wenn die Elementarteilchenphysik ebenfalls abgedeckt werden muss. Die Komplexität der Elementarteilchenphysik kann zudem in der kurzen zur Verfügung stehenden Unterrichtszeit nicht abgebildet werden, vor allem, weil den Schülerinnen und Schülern die dafür notwendigen mathematischen Kenntnisse fehlen. Insofern besteht die Gefahr, dass nur Halbwissen verbreitet wird und Missverständnisse entstehen, die im schlimmsten Fall sogar bereits richtig Gelerntes gefährden. Dies kann z. B. den Dualismus von Teilchen- und Wellenbild betreffen, der im Unterricht der Quantenmechanik etabliert wird und der durch die in vielen Unterrichtsmaterialien anzutreffende Darstellung von Elementarteilchen als bunte Kugeln wieder in Frage gestellt wird.

Auf der anderen Seite spricht eine Vielzahl von Argumenten für die Behandlung der Elementarteilchenphysik im Schulunterricht. Die Struktur der Materie sollte in Grundzügen auf dem aktuellen Stand des Wissens behandelt werden. Die Struktur des Atomkerns als ein Objekt, das aus Protonen und Neutronen besteht, wird im Physik- und im Chemieunterricht angesprochen. Es wäre falsch, wenn die Schülerinnen und Schüler die Schule in der Annahme verlassen, dass Protonen und Neutronen Elementarteilchen, d. h. strukturlose Objekte, sind.

Ein weiteres Argument für die Aufnahme der Elementarteilchenphysik in den Schulunterricht ergibt sich daraus, dass Begriffe und Phänomene aus der Elementarteilchenphysik häufig in gesellschaftlichen Kontexten, in der Literatur, der Publizistik oder in Kinofilmen aufgegriffen und umgedeutet werden. Ein Beispiel dafür ist der Begriff „Antimaterie“. In dem Buch *Angels & Demons* (deutscher Titel: *Illuminati*) des amerikanischen Autors Dan Brown (2000) und dem nach dem Buch gedrehten Kinofilm (Sony Pictures 2009), geht es darum, dass der Vatikan durch einen Geheimbund mit einer Antimateriebombe bedroht wird. Schülerinnen und Schüler sollten in der Lage sein, derartige Adaptionen dem relevanten wissenschaftlichen

Kontext zuzuordnen und gegebenenfalls durch weitere Recherche richtig einzuordnen. In diesem Sinne gehört ein Basiswissen über Elementarteilchen zur heutigen Allgemeinbildung.

Das Argument, dass die Behandlung der Kernphysik in der Oberstufe durch die Hinzunahme der Elementarteilchenphysik ins Curriculum des Unterrichts geschwächt wird, greift zu kurz. Dem Autor erscheint es vielmehr wichtiger, Elementarteilchenphysik zu unterrichten als Kernphysik, denn die Phänomene der Kernphysik ergeben sich aus der Elementarteilchenphysik und nicht umgekehrt. Die starke Kernkraft, die Protonen und Neutronen im Kern zusammenbindet, ist nur eine Restwechselwirkung der fundamentalen starken Wechselwirkung zwischen den Quarks. Die phänomenologisch motivierten Modelle der Kernphysik lassen sich von der Elementarteilchenphysik ausgehend besser motivieren und qualitativ verstehen. Ein solches Beispiel ist das Tröpfchenmodell zur Beschreibung der Bindungsenergie von Atomkernen und die ihm zugrunde liegende Nächste-Nachbar-Wechselwirkung zwischen Nukleonen. Ein Lehrbuch für die Hochschule, das weitgehend dieser Logik folgt und die Teilchenphysik vor der Kernphysik behandelt, ist z. B. das von (Povh et al. 2006).

Auch im Hinblick auf die Quantenmechanik sollte die Bedeutung der Elementarteilchenphysik nicht unterschätzt werden. In der (nicht-relativistischen) Quantenmechanik werden Kraftfelder und Potenziale klassisch als Kontinuum behandelt. Die Elementarteilchenphysik zeichnet jedoch eine einheitliche Behandlung von Teilchen und Feldern aus. Teilchen werden als quantisierte Anregungszustände der Materie- und Kraftfelder mit definiertem Impuls beschrieben. Dementsprechend spricht man nicht mehr von Kräften, sondern von Wechselwirkungen, die durch den Austausch von Teilchen vermittelt werden. Die quantisierten Zustände der Kraftfelder werden als Wechselwirkungsteilchen bezeichnet. In diesem Sinne stellt die Elementarteilchenphysik eine Erweiterung der Quantenmechanik dar und führt neue, allgemeinere Konzepte und Fachbegriffe ein. Diesen Punkt den Schülerinnen und Schülern näherzubringen, sollte ein Grundanliegen des Unterrichts der Elementarteilchenphysik sein.

Ein weiterer Pluspunkt der Behandlung der Elementarteilchenphysik im Unterricht liegt in der Möglichkeit, Bezüge zur aktuellen Forschung herzustellen, z. B. durch Verweis auf die Forschung am Large Hadron Collider des CERN. In diesem Zusammenhang kann deutlich gemacht werden, dass Forschung ein nie abgeschlossener Prozess ist.

Insgesamt betrachtet überwiegen aus Sicht des Autors die Argumente für eine Aufnahme der Elementarteilchenphysik in das Curriculum des Physikunterrichts in der Schule.

1.2 Quarks im Physikunterricht. Aber wie?

Grundsätzlich sind zwei verschiedene Zugänge zur Einführung von Quarks im Unterricht möglich. Ein Zugang nutzt das statische Quarkmodell und knüpft historisch an die Überlegungen Murray Gell-Manns an (Gell-Mann 1964). Quarks werden