

Vermittlung von Teilchenphysik: Outreach und Physikdidaktik im Gespräch

Dokumentation des gemeinsamen Workshops der
Fachverbände Teilchenphysik und Didaktik der Physik

Oliver Passon*, **Claudia Behnke⁺**, **Klaus Buschhüter[#]** und **Michael Kobel⁺**

*Bergische Universität Wuppertal, AG Physik und ihre Didaktik, Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal,

⁺TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik, Zellescher Weg 19, 01062 Dresden,

[#]Physik Moderator, Kompetenzteam Aachen, NRW

Korrespondenz passon@uni-wuppertal.de

Kurzfassung

Auf der DPG Frühjahrstagung in Aachen (25.-29. März 2019) haben die Fachverbände Teilchenphysik und Didaktik der Physik mit der Durchführung eines gemeinsamen Workshops zur Vermittlung der Teilchenphysik ein neues Format erprobt. Eingeleitet durch drei knappe Impulsreferate, die die Perspektiven „Outreach“ (Claudia Behnke), „Schule“ (Klaus Buschhüter) und „Fachdidaktik“ (Oliver Passon) vertreten haben, wurde eine moderierte Diskussion geführt. In diesem Beitrag stellen zunächst die Sprecher die Kernpunkte ihrer Referate dar, bevor die anschließende Diskussion auf Grundlage einer Audioaufzeichnung zusammengefasst wird.

1. Einleitung und Motivation

Die Elementarteilchenphysik (ETP) ist in mehreren Bundesländern Teil des Oberstufenlehrplans geworden. Dies stellt eine neue Herausforderung für die Fachdidaktik und Lehrendenbildung dar. Gleichzeitig gibt es eine jahrzehntelange Erfahrung im Outreach von Forschungseinrichtungen und Universitäten, Inhalte der Teilchenphysik für die interessierte Öffentlichkeit sowie Schülerinnen und Schüler aufzubereiten. Dies verspricht einen fruchtbaren Erfahrungsaustausch, wenn die verschiedenen Perspektiven der jeweiligen Akteure sowie die unterschiedlichen Ziele der Bildungsanstrengungen berücksichtigt werden. Eingeleitet durch drei knappe Impulsreferate aus „Outreach“ (Claudia Behnke), „Schule“ (Klaus Buschhüter) bzw. „Fachdidaktik“ (Oliver Passon) sollten im Rahmen einer moderierten Diskussion zusammen mit den Teilnehmern des Workshops die Potenziale einer Zusammenarbeit erörtert werden.

In Kapitel 2 fassen die Sprecher ihre Impulsreferate zusammen, bevor in Kapitel 3 auf der Grundlage einer Audioaufzeichnung die anschließende Diskussion dokumentiert wird. Es handelt sich dabei nicht um eine Transkription, sondern eine sinngemäße Zusammenfassung der Wortmeldungen. Jedoch wurde teilweise versucht, den sprachlichen Charakter der mündlichen Diskussion beizubehalten. Die jeweiligen Teilnehmer der Debatte hatten Gelegenheit, ihre Wortmeldungen zu redigieren. Abschließend ziehen wir ein Fazit (Kapitel 4).

2. Die Impulsreferate

2.1. Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht aus Sicht der Fachphysik und der Wissenschaftskommunikation (Claudia Behnke)

„Was ist das Standardmodell?“ - Aus Sicht der Teilchenphysik ist diese Frage leicht zu beantworten: Das Standardmodell ist die genaueste theoretische Beschreibung, die es momentan von unserem Universum gibt. Im Allgemeinen wird das Standardmodell mit Hilfe des Lagrange Formalismus dargestellt, der die fundamentalen Eigenschaften mathematisch elegant und korrekt darstellt.

Diese Darstellung ist für Schülerinnen und Schüler im Allgemeinen nicht begreifbar, da das mathematische Grundwissen noch nicht vorhanden ist. Somit werden Schülerinnen und Schüler im Schulunterricht immer nur Auszüge aus dem Standardmodell kennenlernen und es wird eine Art „Modell“ des Standardmodells gebildet. Unter der Beachtung der Verkürzung im Rahmen dieser Modellbildung [1] sollten die Hauptaspekte des Standardmodells für die Lernenden hervorgehoben werden. Diese Schwerpunkte setzt seit etwa 10 Jahren das Netzwerk Teilchenwelt in den *Masterclasses*, bei denen Schülerinnen und Schüler Datensätze aus Teilchenphysikexperimenten analysieren. Basierend auf diesen Erfahrungen wurde ein Zugang zur Teilchenphysik im Schulunterricht entwickelt, der beinahe ohne mathematische Hilfsmittel auskommt und dennoch Fehlvorstellungen vermeidet [2].

Die Basis des Standardmodells bilden fundamentale Symmetrien [3], aus denen weitere Eigenschaften direkt abgeleitet werden. Hierbei sollten besonders

die fundamentalen Wechselwirkungen sowie die Ladungen im Fokus liegen, da diese (mit Ausnahme der Gravitation) im Standardmodell direkt aus den Symmetrien folgen. Die Anzahl der vorhandenen Materieteilchen, wie sie in vielen Lehrbüchern aufgezählt werden, ist keine Konsequenz dieser fundamentalen Symmetriegruppen, sondern eine experimentelle Erkenntnis und bildet daher die eigentlichen Hauptaspekte nicht ab [2].

Durch Fokussierung auf Ladungen und Wechselwirkungen können die Lernenden an bereits bekannte Konzepte (z.B. Ladungserhaltung, Ladungsquantelung) anknüpfen. Die Übermittlung von elektromagnetischer Wechselwirkung durch das Photon als Botenteilchen ist den Schülerinnen und Schülern ebenfalls bekannt. Dieses Botenteilchen-Modell kann auf die anderen Wechselwirkungen übertragen werden und durch veränderte Eigenschaften jener Botenteilchen (z.B. Masse, Selbstwechselwirkung) helfen, die unterschiedlichen Reichweiten der fundamentalen Wechselwirkungen zu veranschaulichen [2].

Das Unterrichten des Standardmodells im Schulunterricht hilft zu verstehen, dass unsere Welt mit der einfachen Annahme fundamentaler Symmetrien äußerst präzise beschrieben werden kann. Hierbei sollte man den Lernenden nicht vorenthalten, dass sie im Schulunterricht immer nur ein Modell des Modells sehen werden und sie eine mathematisch exakte Darstellung im Studium erlernen werden.

2.2. Bemerkungen zur Elementarteilchenphysik in der Schule (Klaus Buschhüter)

Ungeachtet der Tatsache, dass die Lehrerschaft bezüglich der Sinnigkeit dieses (im Lehrplan neuen physikalischen) Themenfeldes tief gespalten ist, kann man unschwer aber auch von enormen Chancen hinsichtlich der Motivation für dieses Thema sprechen.

Sieht man von einigen wenigen Teilthemen der Quantenphysik ab, so erschien den Schülerinnen und Schülern Physik bisher extrem „logisch“, immer tief begründet und mit Formeln belegt. Alle Probleme wurden sehr tiefgehend und kritisch hinterfragend beantwortet. Genau diese dem Fach eigene Vorgehensweise kann sich dabei dann als problematisch erweisen, wenn die Notwendigkeit virtueller Teilchen nicht deutlich wird, Massenbilanzen unsinnig oder zurechtgelegt erscheinen. Beispielhaft wird das beim Betazerfall deutlich, den viele Lehrkräfte sicher als Anknüpfungspunkt wählen, wenn man den Blick auf die W-Bosonen richtet. Modelle und Bilder müssen her, um weg von der Unschärferelation die Probleme der Massenbilanzen und der Lebensdauern dieser neuen Teilchen bei solchen Prozessen anschaulich zu erklären. Das Mittel der Wahl ist die schlüssige Übertragung eines zuvor begründeten Photonenwolkenmodells auf die W- und Z-Bosonen. Die darauf aufbauend folgende Weltliniendarstellung von Elementarteilchen z.B. die ständige Wand-

lung von $u - d$ Quarks erzeugt eine höhere Akzeptanz der „begründeten Existenz“ virtueller Teilchen. Nun wird auch deutlich, dass sich das vorschnell erkannte Massenbilanzproblem ganz anders deuten lässt, denn die virtuellen Teilchen müssen nicht die Eigenschaften reeller Teilchen besitzen. Gerade hier ist der Wandlung von Teilcheneigenschaften durch die „Einwirkung“ von Wechselwirkungsteilchen besondere Beachtung zu schenken, um die Notwendigkeit von der Abkehr der Feldvorstellung zu verdeutlichen. Dabei zeigt die Erfahrung, dass die den Schülerinnen und Schülern bereits bekannten Photonen kaum als Austauschteilchen der elektromagnetischen Kraft wahrgenommen werden, eher erscheinen sie als eine Art „Währung“, um ihnen Energiebilanzen im Sinne der Bohrschen Energieniveaus stimmig erscheinen zu lassen. Hilfe bietet dabei die Deutung der Paarvernichtung von Photonen als Austauschprozess von Eigenschaften, wobei Energie- und Impulserhaltung eher als notwendige Bedingung erscheinen sollte statt Hauptfokus der Betrachtungen. Anschließend bereitet die Erklärung der für die Schüler neuen, starken Kraft zwischen den Quarks wenig Problem, denn es findet ersichtlich ein Austauschprozess statt (Farbänderung), den man über den so vollzogenen Gluonenaustausch einer Kraftwirkung zuschreiben kann.

Zum Abschluss bleibt das „Higgs-Teilchen“ als Vermittler von Masse extrem schwierig zu behandeln. Anekdotisch gedeutet, hat man in der Q1 mit viel Mühe den Äther mit Hilfe des Michelson Morley Experiments „abgeschafft“, um dann auf das den gesamten Raum durchsetzende Higgs-Feld zu stoßen.

2.3. Teilchenphysik und Konzeptwechsel – Anmerkungen zur Didaktik der ETP (Oliver Passon)

Es besteht breiter Konsens in der Lehr-Lern-Forschung, dass Lernprozesse nicht als reiner Zuegwin von „Wissensinhalten“ aufgefasst werden können, sondern vielmehr *Integrationsleistungen* in bestehende Wissenssysteme darstellen [4]. Vor allem in den Naturwissenschaften verfügen die Lernenden in der Regel über Vorwissen den Gegenstand betreffend – als „Präkonzepte“, „Schülervorstellungen“ oder „Alltagsvorstellungen“ bezeichnet (zur Illustration ein konkretes Beispiel aus dem Anfängerunterricht zur Wärmelehre: „Wolle wärmt“). In dem Umfang in dem diese Schülervorstellungen fachlich defizitär sind, zielt der Unterricht auf einen „Konzeptwechsel“ bzw. auf „Konzeptveränderung“ (in unserem Bsp.: „Wolle wärmt nicht (wie etwa die Sonne), sondern hemmt den Wärmetransport“). In einer klassisch gewordenen Arbeit haben Posner et al. 1982 [5] vier Schritte für eine erfolgreiche Konzeptveränderung identifiziert:

1. Es besteht Unzufriedenheit mit dem alten Konzept („dissatisfaction“).
2. Das neue Konzept ist verständlich („intelligible“).

3. Das neue Konzept ist glaubwürdig („plausible“).

4. Das neue Konzept ist fruchtbar bei der Deutung vieler Zusammenhänge („fruitful“).

Man erkennt die Geste: Das Sicherheit stiftende Präkonzept, das sich aus der erfolgreichen Bewältigung von Alltagssituationen gebildet hat, wird von den Lernenden nicht leichtfertig aufgegeben und der Lernprozess muss eine überzeugende Alternative anbieten.

Charakteristisch für didaktische Darstellungen der Teilchenphysik ist nun aber gerade die Anknüpfung an herkömmliche Erklärungsmuster. Gerne werden Quarks und Leptonen als Endpunkte der „Suche nach den kleinsten Bausteinen der Materie“ in eine Reihe mit Molekülen, Atomen und Atomkernen gestellt. Dabei wissen wir, dass diese „Aggregation“ nicht die Teil-Ganze Relation der modernen Physik darstellt. An ihre Stelle sind „Superposition“ und „Mischung“ getreten [6]. Bereits der schulische Unterricht der QM hat das Potential, den naiven Teilchenbegriff erfolgreich zu kompromittieren.

Folgt man hingegen dem Vorschlag des Netzwerk Teilchenwelt und stellt die Wechselwirkungen und Symmetrien (bzw. Erhaltungssätze) in den Mittelpunkt, droht eine andere Gefahr. Mit dem „Austauschteilchen“ begegnet einem zunächst wieder ein „Teilchen“, das klassische Assoziationen wecken kann. Vor allem die Veranschaulichung der Wechselwirkung mit Hilfe des Werfens von Bällen ist hoch problematisch. Ein solch mechanisches Modell insinuiert etwa eine raum-zeitliche Beschreibbarkeit der Vorgänge, die schon innerhalb der QM nicht mehr zulässig ist. Geht man zu einer elaborierteren Darstellung mithilfe von Feynman-Diagrammen über, ist die Gefahr ebenfalls beträchtlich. Als grafische Repräsentationen von Wahrscheinlichkeitsamplituden ist erst das Quadrat ihrer Summe einer physikalischen Deutung zugänglich. Auch hier gilt: Das einzelne Diagramm „erzählt“ keine „raum-zeitliche Geschichte“ über den physikalischen Vorgang (diese und weitere Kritikpunkte werden in [7] genauer untersucht).

Kehren wir nun zum Ausgangspunkt unserer Anmerkungen zurück, nämlich den Bedingungen für eine erfolgreiche Konzeptveränderung. Nach Posner et al. besteht die erste Bedingung in der Unzufriedenheit mit dem „alten Konzept“. Knüpft man jedoch konsequent (und fachlich fragwürdig) an hergebrachte Erklärungsstrategien an (klassische Teil-Ganze Relationen, mechanische Modelle) wird gerade keine Unzufriedenheit erzeugt. Aus diesem Grunde kann auch von einem (verständlichen, glaubwürdigen und fruchtbaren) „neuem Konzept“ nicht gesprochen werden.

Abschließend seien drei knappe Hinweise gegeben, wie der Unterricht der Teilchenphysik Posners Bedingungen für den Konzeptwechsel besser erfüllen könnte:

- Die Diskussion von „Teilchen-Erzeugung“ und „-Vernichtung“ kann den quantenmechanischen Teilchenbegriff in die Irritation führen.
- Wie in der QM sind auch in der Teilchenphysik die Vorhersagen für z. Bsp. Streuexperimente Wahrscheinlichkeitsaussagen, die keine Beschreibung von Einzelprozessen erlauben.
- Die Erläuterung von Feynman-Diagrammen kann ebenfalls an die QM anknüpfen, wenn man etwa die Analogie zum Doppelspaltexperiment ausnutzt. Auch dort werden die Amplituden erst addiert (d.h. die Beiträge von Spalt 1 und Spalt 2) und anschließend quadriert.

3. Die Diskussion

Die Diskussion beginnt mit der Rückfrage, in welchem Umfang und mit welcher Eindringtiefe die Quantenmechanik in der Schule behandelt werde. **Klaus Buschhüter** referiert knapp, dass der „Welle-Teilchen Dualismus“ trotz einiger Kritik von Fachphysikern in der Schulphysik immer noch sehr präsent sei. Daneben spiele die Diskussion von „Wahrscheinlichkeiten“ eine große Rolle sowie (mit Hilfe des Doppelspaltversuches) die Behandlung der Frage, in welchem Umfang das „Realitätskonzept“ in der Mikrophysik eine Einschränkung erführe.

Andreas Schulz (Uni Köln) bemerkt, dass der Welle-Teilchen Dualismus an dieser Stelle gar nicht so kritisch zu sehen sei. Das Austauschteilchen in diesem Sinne „dualistisch“ aufzufassen, würde etwa helfen, die Analogie zu Kraftfeldern herzustellen. Außerdem wäre ein Phänomen wie die Neutrino-Oszillationen eine teilchenphysikalisch relevante Anwendung dieses Konzepts. Im Ganzen hebt er hervor, dass, wie in der QM auch, in der ETP bloß Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden könnten.

Oliver Passon bemerkt an dieser Stelle, dass die Analogie zur QM sicherlich erwünscht sei – jedoch auch Alleinstellungsmerkmale der ETP vorliegen müssten, um ihre unterrichtliche Behandlung zu rechtfertigen.

Claudia Behnke nimmt Bezug auf den Vortrag von Passon, in dem behauptet wurde, die Sprech- und Denkweise von Austauschteilchen leite sich aus den inneren Linien von Feynman Diagrammen her. Sie betont, dass Austauschteilchen sich vielmehr aus den Propagatoren ableiteten. Eine naiv teilchenhafte Vorstellung sei jedoch problematisch und eventuell müsse das Material des Netzwerk Teilchenwelt an dieser Stelle noch überarbeitet werden. Frau Behnke hebt jedoch hervor, dass Symmetrien und Erhaltungssätze im Zentrum dieses Vorschlags stünden. Wenn diese Grundidee erfolgreich vermittelt werden könne, seien Ungenauigkeiten in der Darstellung vielleicht verzeihlich.

Stefan Heusler (Uni Münster) bemerkt, dass die ETP in der Schule lediglich einen Umfang von ca. sechs Schulstunden habe. Man müsse sich deshalb fragen, welche Inhalte überhaupt behandelt werden könnten. Vermutlich sei es deshalb sinnvoller, ein Meta-Thema wie die Modellbildung in das Zentrum zu rücken. Hier müssten Fachdidaktiker mutiger sein, um auch neue Modelle zu entwickeln.

Philipp Lindenau (TU Dresden) bemerkt an dieser Stelle, das man sich weniger auf die Zahl von bloß sechs Schulstunden zur ETP fokussieren sollte. Verschiedene Inhalte seien bereits früher zu integrieren, etwa der Beta-Zerfall in der Kernphysik, oder die Ladungserhaltung in der E-lehre. Dann könne sogar im Sinne eines Spiralcurriculums vorgegangen werden. Ebenfalls betont er (in Replik auf Passons Vortrag), dass es Irritationspotenzial auch bei bisherigen Darstellungen gebe. Etwa sei die beschränkte Reichweite von Wechselwirkungen oder die Paarerzeugung ohne klassische Analogie.

Klaus Buschhüter plädiert an dieser Stelle noch einmal ganz grundsätzlich für möglichst konkrete „Bilder“, die den Schülerinnen und Schülern angeboten werden sollten. Er gibt zu bedenken, dass die Schülerinnen und Schüler ohne solche Hilfen „abschalten“ würden – auch weil sie in ihrer konkreten Lebenssituation von der reinen Fachlichkeit „weniger ergriffen“ seien (Stichworte: „erwachsen werden“, „Pubertät abgeschlossen“).

Auch **Michael Kobel** betont die Rolle des „aha Erlebnis“, die etwa der Beta-Zerfall spielen kann, das es zur Entstehung von Teilchen komme, die es vorher nicht gegeben habe. Hier läge eine Möglichkeit, das Neue (im Sinne des Konzeptwechsels) zu betonen. Daraus ergebe sich allerdings unmittelbar die Frage nach dem „wie“. Das könne nicht einfach (etwa raum-zeitlich) beschrieben, sondern lediglich berechnet werden. Eine echte Schwierigkeit.

Thomas Zügge (Uni Wuppertal) greift eine Bemerkung von Buschhüter auf: Das Ende der Pubertät wäre doch gerade der Zeitpunkt, an dem die Affinität zum nicht-gegenständlichen Denken am größten sei! Die von Buschhüter erhobene Forderung nach „Bildern“ sei also unter Umständen sogar kontraproduktiv. Zügge merkt zudem an, dass die Frage was wichtig sei, bzw. wofür man Bilder brauche, einer Auswahl unterliege, die im Einzelfall begründet werden müsse. Die Lernenden hätten etwa auch die Gravitation kennen gelernt, ohne einen belastbaren Masse-Begriff zu besitzen. Auf die Einführung „virtueller Austauschpartner“ so sehr zu pochen erscheine ihm vor diesem Hintergrund nicht unmittelbar plausibel. Auf **Kobels** Rückfrage, ob dies als Plädoyer gegen virtuelle Teilchen aufzufassen sei, konkretisiert Zügge seinen Impuls. Seine Forderung sei zunächst nur, auch fachwissenschaftlich etablierte Sprechweisen auf den Prüfstand zu stellen.

Stefan Brackertz (Uni Köln) gibt mit dem Vorschlag, die Schule für einen Augenblick zu vergessen, der Debatte eine andere Wendung. Er bemerkt, dass doch auch fortgeschrittene Studierende mit all diesen Inhalten Schwierigkeiten hätten. Er vermutet, dass an dieser Stelle auch fachwissenschaftlicher Klärungsbedarf aufscheint. Brackertz vermutet, dass die Forscher ihre jeweiligen mentalen Modelle besäßen, sich in wissenschaftlichen Veröffentlichungen jedoch auf den mathematischen Formalismus zurückzögen. Er formuliert provokant: Der eigentliche Test für die fachliche Durchdringung bestünde darin, fortgeschrittenen Studierenden z. Bsp. den Begriff des virtuellen Teilchens ohne Formeln angemessen erklären zu können. Er erinnert in diesem Zusammenhang an eine Diskussion aus dem „Forum Studienreform“. Dort sei bemerkt worden, dass auf zwei Semester gekürzte Vorlesungen der theoretischen Physik für Lehramtsstudierende erfolgreich seien, obwohl gekürzte Vorlesungen *in der Regel* „nicht funktionierten“. Die Ursache für diese Ausnahme von der Regel bestünde vermutlich darin, dass die jeweiligen Lehrenden in einem langjährigen Prozess gelernt hätten, „Ständerwerk“ und „Gefache“ zu unterscheiden – und die erfolgreich gekürzten Vorlesungen sich eben auf die tragenden Begriffe beschränkten.

Claudia Behnke merkt dazu an, dass aus ihrer Sicht nur der Lagrangian des Standard Modells eine „korrekte fachliche Darstellung“ liefere. Alle Versuche der nicht-mathematischen Darstellung seien ohne eine modellhafte Verkürzung nicht möglich. **Stefan Brackertz** widerspricht: Das „nicht möglich“ sei vielleicht ein „noch nicht möglich“. Seiner Auffassung nach drücke sich hier also ein Defizit der bisherigen Beschreibung aus.

Michael Kobel widerspricht und möchte darin auch kein Defizit erkennen. Er bemerkt, dass gerade die abstrakten mathematischen Symmetrieforderungen zu experimentell bestätigten Vorhersagen führten.

Stefan Brackertz verteidigt sein Argument mit einem historischen Beispiel: Die Elektrodynamik Maxwells habe nach ihrer Erstveröffentlichung zahlreiche Reformulierungen erlebt, die auf eine bessere Verstehbarkeit zielten. Begriffe wie „Divergenz“ oder „Rotation“ wurden zu diesem Zwecke entwickelt. Vielleicht, so die Vermutung von Brackertz, stehe die Teilchenphysik am Beginn einer ähnlichen Entwicklung.

Frank Fiedler (Uni Mainz) fragt an, welche Rolle der Spin spiele bzw. spielen solle. Die Postulierung des Neutrinos beruhe schließlich auch auf einem Argument der Drehimpulserhaltung.

Klaus Buschhüter erläutert, dass der Eigendrehimpuls ein Stiefkind der Schulphysik sei und seine Behandlung im Unterricht häufig unterlassen würde.

Ein Teilnehmer der Diskussion schlägt vor, dass der fundamentale Unterschied zwischen Materieteilchen (Fermionen) und „Kraftteilchen“ (Bosonen) eine

Möglichkeit sei, den Spin einzuführen. Gerade die Unmöglichkeit einzelne Fermionen zu erzeugen (im Gegensatz etwa zu Photonen) würde auf diese Weise plausibel werden.

Stefan Heusler kommt auf den Modellbegriff zurück. Für den Spin lägen bereits Ansätze vor (auch von ihm selbst; siehe etwa [8]). Brackertz Vorschlag, in der ETP neue und bessere Modelle zu finden, unterstütze er ausdrücklich. Er bemerkt, dass die Feynman-Diagramme ja auch lediglich eine Übersetzung des Lagrangian des Standard Modells in eine Symbolsprache seien. Hier könne es weitere Übersetzungen geben und eine Aufgabe der Fachdidaktik sei es, diese zu entwickeln und empirisch zu untersuchen.

Frank Fiedler kommt auf die Frage zurück, wie in der ETP an die QM und Wellenoptik angeknüpft werden könne. Er stellt ein Experiment mit einem Doppelspalt zu Diskussion, bei dem ein Spalt teilweise geschwärzt wird (Transmission auf z. Bsp. 1% reduziert). Folgende Fragen stellten sich: Was passiert bei der Beleuchtung? Wie kann man den 2. Spalt „entdecken“? Dies sei analog zur Entdeckung von neuen Austauschteilchen und könne den Entdeckungsprozess in der Teilchenphysik nachvollziehbar machen.

Michael Kobel unterstützt diese Idee, sieht jedoch eine recht hohe Abstraktionsleistung darin, dass der zweite Räumliche Weg der Strahlung (der zweite „Reaktionskanal“ sozusagen) mit einem Austauschteilchen identifiziert werde.

An dieser Stelle reißt **Michael Kobel** einen anderen Themenkomplex an und stellt die Frage, worin eigentlich der Bildungswert der Teilchenphysik liege, und – damit zusammenhängend – ob sie zu Recht ein Inhalt des schulischen Physikcurriculums sei.

Andreas Schulz bemerkt, dass vor allem eine Betonung des Nichtwissens und der offenen Fragen hier eine große Rolle spielten.

Oliver Passon merkt an, dass mit diesem Argument jedoch *jede* aktuelle Forschung als schulischer Inhalt legitimiert werden könne. Dass man vor allem der ETP eine so wichtige Rolle zuschreibe, liege wohl auch an einer weit verbreiteten reduktionistischen Tendenz.

Thomas Zügge widerspricht Passon in Hinblick darauf, dass jede aktuelle Forschung derart legitimiert werden könne. Eine Besonderheit der ETP läge in ihrer Anwendungsferne. Die kurzschlüssige Begründung des Bildungswertes eines Gegenstandes über seine praktische Anwendung (etwa in der Technik) würde hier zum Glück nicht gelingen.

Frank Fiedler betont die Rolle der ETP als Anwendung und Vertiefung von Konzepten, die in der Quantenmechanik eingeführt wurden. Der große Bildungswert der QM läge darin, ein „neues Denken“ einzuüben. In diesem Sinne wäre die Behand-

lung der Teilchenphysik in der Schule sehr bedeutsam.

Claudia Behnke charakterisiert das Standardmodell der Teilchenphysik als die beste Beschreibung unseres Universums, die gleichzeitig aus konzeptionell einfachen Symmetrieforderungen abzuleiten sei.

Thomas Zügge merkt an, dass die Rolle von Symmetrien und Erhaltungsgrößen jedoch auch schon in anderen Bereichen der Physik zentral sei. Daraus ließe sich also kein Alleinstellungsmerkmal der ETP ableiten. Behnke gesteht dies zu. Jedoch wäre bedeutsam, dass dieses Prinzip einen so universellen Charakter habe.

Stefan Heusler merkt erneut an, dass ein besonderer Bildungswert der ETP auf der Metaebene der Modellbildung liege. **Oliver Passon** knüpft hier die Rückfrage an, an welcher Stelle der Unterricht, der vor allem auf fachliches Überblickswissen zur ETP ziele, eine solche Reflexion anregen könne. **Heusler** präzisiert seine Idee mit dem Beispiel der Antimaterie. Deren Postulierung habe zu verschiedenen Modellvorstellungen geführt (Stichwort: „Dirac-See“). Solche Prozesse sollten zum Gegenstand des Unterrichts werden.

Michael Kobel betont zudem die wichtige Funktion, die eine Darstellung aller vier fundamentalen Kräfte habe. Die Schülerinnen und Schüler könnten anschließend jeden Vorgang darauf befragen, welche Wechselwirkung an ihm beteiligt sei. Für die vorgebliche Beeinflussung des menschlichen Schicksals durch die Stellung von Planeten und Sternen, wie sie die Astrologie behauptete, wäre hier aber kein Platz.

Abschließend stimmen **Andreas Schulz** und **Michael Kobel** darin überein, dass die Präsentation der Physik als offenes und lebendiges Forschungsfeld, in dem noch vieles zu erforschen sei, von entscheidender Bedeutung sei.

4. Zusammenfassung und Fazit

Die Veranstaltung wurde von allen Teilnehmern und den Organisatoren Michael Kobel und Oliver Passon als sehr bereichernd erlebt. Der Dialog zwischen Fachdidaktik und Outreach im Bereich der Elementarteilchenphysik besitzt großes Potenzial, wie sich auch schon bei der Tagung zur „Kohärenz im Unterricht der Elementarteilchenphysik“ im Herbst 2018 in Wuppertal gezeigt hat [9]. Für den Erfolg dieser Bemühungen wird es jedoch auf die Verstetigung und Dokumentation der Anstrengungen ankommen. Wir hoffen, dass die vorliegende Arbeit einen Beitrag dazu leistet.

5. Literatur

- [1] Stachowiak, H. (1973) *Allgemeine Modelltheorie*, Wien, New York: Springer (S. 131–133).
- [2] Kobel, M., Bilow, U., Lindenau, P. und Schorn, B. (2017) *Teilchenphysik: Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen*. Hamburg: Joachim Herz Stiftung.

- [3] Noether, E. (1918) Invariante Variationsprobleme. *Nachr. d. Königl. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen, Math-phys. Klasse*, 235–257.
- [4] Möller, K. (2010) Lernen von Naturwissenschaft heißt: Konzepte verändern. In P. Labudde (Hrsg.), *Fachdidaktik Naturwissenschaft. 1. – 9. Schuljahr*, S. 57 – 72. Stuttgart: Haupt Verlag.
- [5] Posner, G. J. Posner, Strike, K. A., Hewson, P. W. und Gertzog, W. A. (1982) Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. In: *Science Education* **66**(2): 211-227.
- [6] Healey, R. (2013) Physical composition. In: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **44**: 48–62.
- [7] Passon, O., Zügge, T. und Grebe-Ellis, J. (2019) Pitfalls in the teaching of particle physics. In: *Physics Education*, 15(1) 015014 (17pp).
- [8] Heusler, S und Ubben, M. (2018) Modeling spin. *European Journal of physics* **39**(6): 065405
- [9] Passon, O., Zügge, T. und Grebe-Ellis, J. (in Vorbereitung) *Kohärenz im Unterricht der Elementarteilchenphysik*. Heidelberg, Berlin: Springer.

Danksagung

Wir danken dem Sprecher des Fachverbades Didaktik der Physik Johannes Grebe-Ellis für die organisatorische Unterstützung und Thomas Zügge für die technische Hilfe bei der Audioaufzeichnung und sorgfältige Korrekturen am Manuskript.

Unser besonderer Dank aber gilt natürlich allen Teilnehmern der Veranstaltung und an der lebhaften Diskussion.