

Was sind Elementarteilchen und gibt es „virtuelle“ Photonen?

Oliver Passon

1 Einführung

Die Elementarteilchenphysik hält Einzug in die Schule. Lehrbücher für die Oberstufe enthalten schon länger ein Kapitel zur Teilchenphysik (siehe etwa den Metzler [1], S. 528 ff) und in verschiedenen Bundesländern ist dieser Gegenstand bereits Teil des Lehrplans. Der neue Kernlehrplan für die Oberstufe in NRW (siehe [2], gültig ab Sommer 2014) sieht ebenfalls eine Einführung in das Standardmodell der Teilchenphysik vor (für Grund- und Leistungskurs, siehe Infokasten 1).

Infokasten1 „Teilchenphysik im Sek II Kernlehrplan NRW“

Der neue Kernlehrplan Physik für die Oberstufe in NRW ist in fünf Inhaltsfelder gegliedert. Eine Besonderheit besteht darin, dass diese für Grund- und Leistungskurs gesondert ausgewiesen sind. Gemeinsam ist das erste Inhaltsfeld „Mechanik“ in der Einführungsphase (also noch vor der Aufteilung in Grund- und Leistungskurs). Für den GK lauten die Inhaltsfelder: 2. Quantenobjekte, 3. Elektrodynamik, 4. Strahlung und Materie und 5. Relativität von Raum und Zeit. Im LK gliedern sich die Inhalte gemäß: 2. Relativitätstheorie, 3. Elektrik, 4. Quantenphysik und 5. Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik.

Die Teilchenphysik („Standardmodell der Elementarteilchen“) ist im Grundkursbereich dem Inhaltsfeld 4 (Strahlung und Materie) zugeordnet. Als möglicher Kontext wird „Forschung an Teilchenbeschleunigern“ angegeben. Der Zusammenhang zum Basiskonzept Wechselwirkung wird mit dem Hinweis „(Virtuelles) Photon als Austauscheteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung und Konzept der Austauscheteilchen vs. Feldkonzept“ konkretisiert. Im Kompetenzbereich „Umgang mit Fachwissen“ werden folgende Anforderungen angegeben: Die Schülerinnen und Schüler:

- erläutern mithilfe des aktuellen Standardmodells den Aufbau der Kernbausteine und erklären mit ihm Phänomene der Kernphysik (Systematisierung, Modellgebrauch)
- erklären an einfachen Beispielen Teilchenumwandlungen im Standardmodell (Wiedergabe).

Für den LK taucht dieser Gegenstand naheliegender Weise im Inhaltsfeld 5 (Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik) auf. Bezüglich der Kompetenz „Umgang mit Fachwissen“ wird (neben den Punkten, die bereits Teil der GK Anforderung sind) konkretisiert:

- Die SuS erklären an Beispielen Teilchenumwandlungen im Standardmodell mithilfe der Heisenberg'schen Unschärferelation und der Energie-Masse-Äquivalenz (Wiedergabe).“

Im Kompetenzbereich „Erkenntnisgewinnung“ wird die Anforderung „Die SuS vergleichen das Modell der Austauscheteilchen im Bereich der Elementarteilchen mit dem Modell des Feldes (Vermittlung, Stärke und Reichweite der Wechselwirkungskräfte) (Modellgebrauch)“ formuliert.

Diese Entwicklung stellt die Lehramtsausbildung, die Fachdidaktik und jeden Physiklehrer vor neue Herausforderungen. In diesem Aufsatz untersuche ich typische Lehrbuchdarstellungen sowie die

Unterrichtsmittel des „Netzwerk Teilchenwelt“¹ in Hinblick auf die Elementarisierung dieses komplexen Gegenstandes und diskutiere die verwendeten Modellvorstellungen hinsichtlich der Gütekriterien „Fachgerechtigkeit“ und „Anschlussfähigkeit“ für die didaktische Reduktion (siehe etwa [4], S. 74f). Als Referenzrahmen beschränke ich mich dabei nicht nur auf fachwissenschaftliche Darstellungen im engeren Sinne, sondern beziehe auch die relevante Literatur aus der Philosophie der Physik ein. Dies erscheint sinnvoll und notwendig, da die Schulphysik bei diesem Gegenstand nicht auf die Beherrschung eines Kalküls, sondern auf den Erwerb tragfähiger Begriffe zielt. Dabei werden jedoch gerade Fragen und Probleme der Interpretation des Formalismus berührt.

Vor diesem Hintergrund wird festgestellt, dass die Gefahr besteht, dass der Schulunterricht zur Teilchenphysik in weiten Teilen ungenaue, irreführende oder sogar falsche Vorstellungen und Erklärungen vermittelt. In einem abschließenden Kapitel skizziere ich didaktische Konsequenzen aus den hier geschilderten Problemen.

2 Elementarteilchen und Quantenfelder

Der Name „Teilchenphysik“ suggeriert bereits, dass auf dem Niveau der grundlegenden Beschreibung die Vorstellung von fundamentalen „Bausteinen“ gültig ist. Keine Einführung des Standardmodells auf Schulniveau kommt ohne eine Darstellung von Quarks und Leptonen als farbige Kügelchen aus (wie etwa in Abbildung 1). Sicherlich (oder besser: hoffentlich) wird niemand diese Darstellung zu ernst nehmen und etwa erwarten, dass diese „Teilchen“ klassische Eigenschaften besitzen. Schließlich muss bereits in der nichtrelativistischen Quantenmechanik (QM) der naive Teilchenbegriff modifiziert werden. In der QM verliert der Begriff der Teilchenbahn seine Bedeutung und die Wellenfunktion des Zustandes erlaubt lediglich die Berechnung einer Wahrscheinlichkeit, etwa ein Elektron bei einer Messung an einem bestimmten Ort anzutreffen. Mit dem Attribut „Anzahl“ und der Beobachtungsgröße „Ort“ liegen aber immer noch typische Eigenschaften vor, die es rechtfertigen können, von der QM als „Teilchentheorie“ im weiteren Sinne zu sprechen.

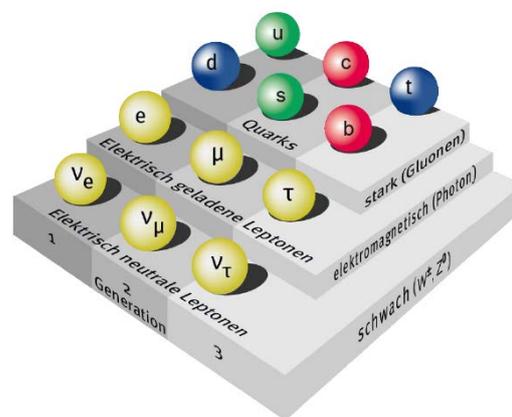


Abbildung 1 Teilcheninhalts des Standardmodells. (Quelle: teilchenwelt.de, Masterclass Einführungsvortrag)

Warum diese Teilchen-Sprechweise auch in der Elementarteilchenphysik verbreitet ist, hat im Wesentlichen eine experimentelle und eine theoretische Ursache. Zum einen erfolgt der Nachweis dieser „Objekte“ oder „Zustände“ (wie man sie neutraler nennen könnte) in der Regel über lokale Wechselwirkungen in Blasen- oder Spurrkammern.² Die Rekonstruktion von „Teilchenspuren“ scheint aber nur dann sinnvoll, wenn man auch ein verursachendes „Teilchen“ annimmt. Es ist nun aber bereits eine Lehre aus der QM, dass dieser Schluss von „Eigenschaften der Messung“ (nämlich lokal und teilchenhaft) auf „Eigenschaften des Nachgewiesenen“ nicht hinreichend ist und einer zusätzlichen Absicherung bedarf. Diese scheint es jedoch zu geben, und damit komme ich zur zweiten Ursache für

¹ Siehe [3] für Informationen zu diesem Projekt sowie www.teilchenwelt.de für die Materialien, die durch ihren Einsatz in der sog. „Masterclass“ sicherlich zu den meist erprobten Unterrichtsmitteln auf diesem Gebiet gehören.

² Diese Eigenschaft begründet im Wesentlichen einen „operationalen“ Teilchenbegriff (siehe [5] S. 170f), der etwa der üblichen Sprechweise von „Teilchen-Detektoren“ und „Teilchen-Beschleunigern“ zu Grunde liegt. Siehe hierzu auch Abschnitt 5.

die verbreitete Teilchen-Sprechweise: Sie liegt technisch gesprochen in der sog. „Fockraum-“ bzw. „Besetzungszahldarstellung“, die die zugrunde liegende Theorie erlaubt. Natürlich überschreitet diese Diskussion in fachlicher Hinsicht den Physik-Kanon der Lehramtsausbildung. Im Folgenden soll möglichst voraussetzungslos und untechnisch skizziert werden, was diese Begriffe bedeuten und warum der Teilchenbegriff hier dennoch *nicht* mehr angemessen verwendet werden kann.

Kurioser Weise ist der theoretische Rahmen der Teilchenphysik eine Feldtheorie, bzw. genauer: eine Quantenfeldtheorie (QFT). Es muss also die Frage geklärt werden, welcher Zusammenhang zwischen Elementarteilchen und Quantenfeldern besteht. Die typische Lehrbuchdarstellung (siehe etwa [6]) führt den Übergang von einer klassischen Feldtheorie zu einer Quantenfeldtheorie mit Hilfe der „kanonischen Quantisierung“ durch. Dieses heuristische Verfahren verläuft formal ähnlich wie der Übergang von klassischer Punkt- zu Quantenmechanik. Die Lösung ϕ einer zunächst klassischen Feldgleichung wird dabei als Operator umgedeutet, und für diesen (bzw. den zugehörigen konjugierten Impuls) werden sog. „Vertauschungsrelationen“ gefordert.³ Der konzeptionell wichtige Punkt besteht darin, dass dieses Quantenfeld *keine* Wahrscheinlichkeitsinterpretation erlaubt, wie etwa die Wellenfunktion der Quantenmechanik. Es beschreibt auch nicht den Zustand des Systems, sondern ist selbst ein Operator, der auf Zustandsvektoren angewandt werden muss.

Das geschilderte Verfahren kann sowohl auf die Maxwell-Gleichung angewandt werden und führt dann zur Quantenelektrodynamik (kurz „QED“, der QFT des elektromagnetischen Feldes), als auch auf zum Beispiel die Dirac-Gleichung. In diesem Fall gelangt man zu einer Quantenfeldtheorie der „Materie“. Der Unterschied zwischen „Stoff“ und „Kraft“ wird dadurch im formalen Sinne aufgehoben.

Der Zusammenhang zu „Teilchen“ wird nun wie folgt hergestellt: Die Lösungen der Quantenfeldgleichungen, also die operatorwertigen Felder, können nach ebenen Wellen entwickelt werden. Die dabei auftretenden Koeffizienten (häufig mit a und a^+ bezeichnet) „erben“ den Operatorcharakter des Feldes und besitzen dieselben mathematische Eigenschaften wie die Auf- und Absteigeoperatoren, die in der Quantenmechanik bei der Behandlung des harmonischen Oszillators (HO) eingeführt werden. Diese Gemeinsamkeit erlaubt die heuristische Deutung, sich das Feld als unendliche Summe von quantenmechanischen HO vorzustellen. Daneben kann aus diesen Operatoren ein sog. „Besetzungszahloperator“ gebildet werden, der lediglich ganzzahlige und positive Eigenwerte besitzt. Die Wirkung der Operatoren $a^+(p)$ bzw. $a(p)$ besteht jedoch darin, aus dem Zustand mit Besetzungszahl Null („Vakuum“) einen 1-Teilchenzustand mit dem Impuls p zu erzeugen, bzw. die Besetzungszahl eines Zustandes mit Impuls p um eins zu verringern. Aus diesem Grund spricht man auch von Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren. Die zugehörige Darstellung der Zustände wird (wie bereits erwähnt) Fockraum- bzw. Besetzungszahldarstellung genannt und begründet die Teilchen-Sprechweise theoretisch. Häufig findet man auch die Formulierung, dass diese Teilchen „Anregungszustände des Quantenfeldes“ sind – analog zu der Anregung des quantenmechanischen HO durch Anwendung des Aufsteigeoperators.

Nun ist das Merkmal „Anzahl“ sicherlich eine typische Teilcheneigenschaft. Allerdings können ebenfalls Überlagerungen von Zuständen mit verschiedener Besetzungszahl gebildet werden – für diese Zustände ist die Anzahl der „Quanten“ also gerade nicht bestimmt. Zusätzlich wird man für einen Teilchenbegriff im engeren Sinne die (zumindest unscharfe) Lokalisierbarkeit fordern. Dass dies für

³ Beziehungsweise „Anti-Vertauschungsrelationen“ für Fermionen, um dem Pauliprinzip Rechnung zu tragen.

eine relativistische QFT nicht möglich ist, wurde durch Malament [7] sowie Halvorson und Clifton [8] gezeigt. Diese Arbeiten beweisen unter allgemeinen Voraussetzungen, dass in relativistischen Quantenfeldtheorien weder ein Ortsoperator definiert werden kann, noch lokalisierte Feldobservable einen konsistenten lokalisierten Teilchenbegriff begründen können. Allerdings zeigen Halvorson und Clifton (S. 19ff), wie dennoch der *Anschein* der Teilchenhaftigkeit in typischen Messsituationen („Teilchenspuren“ in Detektoren etc.) erklärt werden kann. Aber selbst ein solch nichtlokales „Teilchenkonzept“ kann nicht aufrechterhalten werden, wie durch die Arbeiten von John Earman und Doreen Fraser [9] gezeigt wurde. Im Kern besteht das zusätzliche Problem darin, dass die diesem schwachen Teilchenbegriff zu Grunde liegende Fockraum-Darstellung lediglich für Feldtheorien *ohne* Wechselwirkung angegeben werden kann. Selbst ohne die Forderung der Lokalisierbarkeit hat also der Teilchenbegriff in einer relativistischen QFT keine konsistente Begründung. Lediglich unter gewissen Umständen (etwa bei asymptotischen Streuzuständen) erlaubt er eine näherungsweise Beschreibung. Die Liste der Probleme einer „Teilchen-Ontologie“ ist damit noch nicht erschöpft. Das Thema der Ununterscheidbarkeit von Zuständen wurde noch gar nicht erwähnt (siehe [14], Kapitel 3). Zudem ist die Besetzungszahl eines Zustandes in der relativistischen Feldtheorie vom Bewegungszustand des Beobachters abhängig („Unruh-Effekt“, siehe dazu [14], Kapitel 6).

2.1 Der lichtelektrische Effekt

Genau betrachtet gibt es innerhalb des üblichen Quantenmechanik-Curriculums der Schule bereits ein Element, das seine fachwissenschaftliche Begründung erst in der Quantenfeldtheorie findet, nämlich das „Photon“. Ein besonderes Ärgernis ist in diesem Zusammenhang, dass die meisten Darstellungen den Eindruck erwecken, die Erklärung des lichtelektrischen Effekts erzwingt die Einführung von (zudem teilchenhaft vorgestellten) Lichtquanten. Die aus heutiger Sicht noch nicht abschließende Erklärung dieses Effekts durch Einstein 1905 ging zeitlich sowohl der Quantenfeldtheorie als auch der Quantenmechanik voraus. Bereits kurz nach Veröffentlichung der Schrödinger-Gleichung (1926) gelang unabhängig voneinander Gregor Wentzel und Guido Beck die Herleitung des Photoeffekts innerhalb der nichtrelativistischen Quantenmechanik, bei der das Strahlungsfeld noch gar nicht quantisiert ist (siehe Kuhn und Strnad [10] S. 226ff). Dieser Effekt kann also *ohne* Photonen erklärt werden, in dem der quantisierte Festkörper diskrete Energieportionen aus dem kontinuierlichen Feld entnimmt.⁴ Im Übrigen gelingt erst in dieser halbklassischen Beschreibung die Erklärung der beobachteten Winkelverteilung der emittierten Photoelektronen. Die Notwendigkeit zu einer Quantisierung des Strahlungsfeldes, d.h. der Einführung von Photonen im heutigen Wortsinn, ergibt sich erst bei genuinen QED-Effekten (z. Bsp. dem anomalen magnetischen Moment des Elektrons). Das Photon der Quantenelektrodynamik besitzt hingegen keine lokalisierten Zustände. In der Regel gehört seine diskrete Energie dem gesamten Raumbereich an, den das Strahlungsfeld einnimmt. Eine „Wellenfunktion des Photons“ im üblichen Sinne, d.h. mit Wahrscheinlichkeitsinterpretation im Ortsraum, kann ebenfalls nicht angegeben werden (siehe [10] S. 150ff).⁵

Natürlich soll auf die Behandlung des lichtelektrischen Effektes nicht verzichtet werden. Dieser Versuch gehört zu der kleinen Zahl schultauglicher Experimente der modernen Physik und erlaubt zudem die Bestimmung einer grundlegenden Naturkonstante! Tatsächlich kann sogar die traditionelle

⁴ Dasselbe gilt für den Compton-Effekt, den Erwin Schrödinger 1927 ebenfalls in der halbklassischen Näherung beschreiben konnte (siehe [10] S. 221ff).

⁵ Eine verständliche Darstellung dieses Problemkreises findet sich bei Greenstein und Zajonc [11, Kapitel 2]. Ebenfalls ist der Artikel von Simonsohn [12], trotz seines Alters, in diesem Zusammenhang immer noch äußerst lesenswert.

Deutung dieses Effekts mit Hilfe von teilchenhaften Photonen gerechtfertigt werden, wenn man diesem Modell denselben vorläufigen Status wie dem 8 Jahre später (!) formulierten Bohrschen Atommodell einräumt. Genauso wie in der weiteren Behandlung der Quantenmechanik die Unhaltbarkeit der Vorstellung von kontinuierlichen Teilchenbahnen thematisiert wird, muss die naive Teilchenvorstellung im Zusammenhang mit den Energiequanten der elektromagnetischen Strahlung als vorläufige Etappe charakterisiert werden. Dazu eignet sich etwa die Behandlung des Experiments von Hanbury-Brown und Twiss mit verschiedenen Lichtquellen (siehe [11] S. 28ff).⁶ Dieser Vorschlag ist jedoch der berechtigten Kritik ausgesetzt, dass mehr Gründe gegen die Einführung des Bohrschen Atommodells sprechen, als für eine analoge Behandlung des lichtelektrischen Effekts. Untersuchungen zu Schülervorstellungen zeigen schließlich, wie suggestiv die Kraft des Planetenmodells des Atoms ist und wie viele Schüler an dieser Vorstellung festhalten (siehe [22], S. 44).

2.2 Sind Quantenfelder „Felder“?

Der Vollständigkeit halber erwähne ich, dass die angesichts dieser Sachlage naheliegende Konsequenz, als fundamentale Entitäten der Quantenfeldtheorie nicht „Teilchen“, sondern „Felder“ anzunehmen, ebenfalls problematisch ist. Klassische Feldtheorien ordnen jedem Punkt der Raumzeit einen Skalar, Vektor oder Tensor zu. Die Quantenfelder sind jedoch Operatoren, die auf Zustandsvektoren wirken. Paradoxe Weise ist es in diesem Sinne eine strittige Frage, in welchem Sinne eine „Quantenfeldtheorie“ tatsächlich eine Feldtheorie ist. Für die damit zusammenhängenden Schwierigkeiten und alternativen Vorschläge sei jedoch auf die Literatur verwiesen; etwa [14, Kapitel 6].

3 Feynman-Graphen und „Wechselwirkung durch Teilchenaustausch“

Selbst die einfachsten Probleme des Standardmodells, etwa der Prozess $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ (sprich: die Paarvernichtung von Positron und Elektron erzeugt Myon und Anti-Myon), können nicht exakt gelöst werden. Zur Anwendung kommen deshalb entweder numerische Lösungsverfahren (die sog. „Gittertheorie“, die jedoch vor allem bei der Beschreibung von Bindungszuständen angewendet wird) oder die „Störungsrechnung“. Bei dieser werden die gesuchten Wahrscheinlichkeitsamplituden in Potenzen der sog. Kopplungskonstante⁷ entwickelt. Um bei den dafür notwendigen komplexen Berechnungen alle Terme, die zu einer Ordnung beitragen, systematisch zu erfassen, entwickelte der amerikanische Physiker Richard Feynman eine spezielle grafische Notation; die „Feynman-Graphen“ oder „Feynman-Diagramme“. Jeder dieser Graphen repräsentiert einen mathematischen Ausdruck, der bei der näherungsweise Bestimmung der Streumatrix S zu einer bestimmten Näherung n-ter Ordnung summiert werden muss.⁸ Die Elemente dieser Graphen sind „äußere Linien“, „innere Linien“ und ihre Schnittpunkte („Vertices“). Ein Beispiel für einen Feynman-Graphen zeigt Abbildung 2. Von links laufen Teilchen und Antiteilchen ein (etwa Elektron und Positron). Sie annihilieren über ein Photon, das anschließend

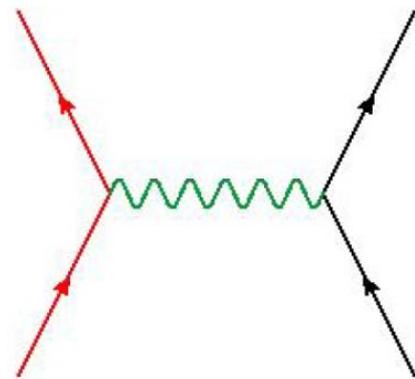


Abbildung 2 Feynman-Diagramm für die Paarvernichtung (und Erzeugung) in unterster Ordnung Störungstheorie. Die Zeitachse ist von links nach rechts gerichtet. Die Schlangelinie stellt ein virtuelles Photon dar.

⁶ Weitere wertvolle Hinweise dazu gibt Jan-Peter Meyn in [13].

⁷ Dies ist im Falle der QED die Sommerfeld'sche Feinstrukturkonstante.

⁸ Es treten in diesem Zusammenhang eine ganze Reihe schwerwiegender Probleme auf – etwa ist i. allg. die Konvergenz dieser Störungsreihe nicht gewährleistet und ab $n=2$ kommt es zum Auftreten unendlicher Beiträge. Notwendig wird deshalb das mathematisch durchaus fragwürdige Verfahren der „Renormierung“.

ein weiteres Teilchen/Antiteilchen-Paar erzeugt. Offensichtlich ist es verlockend, diese Diagramme als raum-zeitliche Darstellung des behandelten Streuprozesses zu deuten. Während tatsächlich eine Achse der Diagramme eine Zeitrichtung auszeichnet, sind die auf diese Weise symbolisierten Zustände jedoch typischerweise Impulsraumzustände. In jedem Fall handelt es sich um keine Visualisierung einer „Teilchenbahn“ oder der räumlichen Lage der Streupartner. Alle Lehrbücher der QFT sowie das meiste didaktische Material auf Schulniveau betonen diesen Sachverhalt ausdrücklich und sicherlich kann auch in der Unterrichtspraxis dieses Missverständnis vermieden bzw. aufgeklärt werden. Es stellt sich jedoch die Frage, welchen Nutzen die Einführung dieser grafischen Notation im jeweiligen Kontext hat. Für Lehrbücher der theoretischen Physik liegt der Vorteil auf der Hand, denn sie verwenden im Verlauf ihrer Darstellung die zugehörigen Feynman-Regeln zur Konstruktion der mathematischen Ausdrücke, auf deren Berechnung das gesamte Verfahren zielt. In der Schulphysik und in populären Darstellungen kann dieses Motiv offensichtlich nicht leitend sein.

3.1 Virtuelle Teilchen

Stattdessen wird mit Hilfe dieser Diagramme erläutert, dass die Wechselwirkungen der Elementarteilchenphysik (elektroschwache- oder starke Wechselwirkung) durch den Austausch „virtueller“ Feldquanten vermittelt werden (Photonen, W und Z Teilchen oder Gluonen). Auf das Problem der „Teilchenmetaphorik“ ist dabei im letzten Abschnitt bereits eingegangen worden.

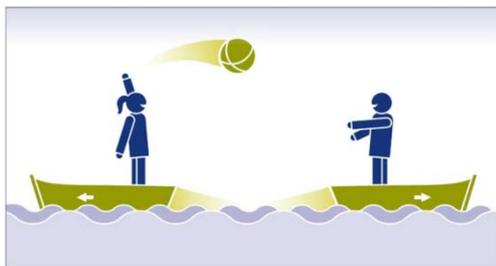


Abbildung 3 Fragwürdige klassische Veranschaulichung des Konzepts „Kraftwirkung durch Teilchenaustausch“. (Quelle: teilchenwelt.de, Masterclass Einführungsvortrag)

teilchenphysik (elektroschwache- oder starke Wechselwirkung) durch den Austausch „virtueller“ Feldquanten vermittelt werden (Photonen, W und Z Teilchen oder Gluonen). Auf das Problem der „Teilchenmetaphorik“ ist dabei im letzten Abschnitt bereits eingegangen worden. Kraftwirkungen als durch einen „Teilchenaustausch“ vermittelt zu deuten (siehe etwa Abb. 3 für eine besonders hanebüchene klassische Analogie) missachtet alle Inkonsistenzen des Teilchenbegriffs in der Quantenfeldtheorie. Aber an dieser Stelle soll vielmehr auf ein anderes problematisches Konzept eingegangen werden, nämlich dass

es „virtuelle“ Zustände sind, die die Kraftwirkung vermitteln. Gemeint ist damit, dass für die Zustände, die durch innere Linien der Feynman-Graphen dargestellt werden, die relativistische Energie-Impuls Relation ($E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$) nicht gültig ist. Nach üblicher Sprechweise liegen diese „Teilchen“ nicht auf der Massenschale bzw. verletzen die Energieerhaltung. Die Frage lautet nun, ob dieser Vorgang („Erzeugung und Vernichtung eines virtuellen Zustandes“) realistisch gedeutet werden kann. Obwohl die Bezeichnung „virtuell“ für diese Teilchen die Assoziation von „nur vorgestellten“ bzw. „irrealen“ Objekten weckt, erklärt man mit ihrem Austausch ja die tatsächlich messbaren Kraftwirkungen. Ebenfalls gibt es die verbreitete Sprechweise, dass etwa elektrisch geladene Teilchen von einer „Wolke aus virtuellen Photonen“ umgeben seien. Bereits Mario Bunge hat 1970 [15] eine Reihe von Argumenten gegen eine realistische Lesart angegeben. Die Begründung der Verletzung der Energieerhaltung mithilfe der Energie-Zeit-Unschärferelation ist etwa dem Einwand ausgesetzt, dass die Zeit keine Observable der QM (bzw. QFT) ist und der Status der besagten Unschärfebeziehung nur heuristisch ist. Schlagend ist jedoch der Einwand von Robert Weingard [16], nachdem jedes einzelne Feynman-Diagramm lediglich zur Berechnung eines Terms S_n für das volle Streumatrixelement ($S = \sum S_n$) beiträgt. Die experimentell zugängliche Übergangswahrscheinlichkeit gewinnt man jedoch aus dem Quadrat der Summe dieser Anteile: $P = | \langle \Psi_f | \sum S_n | \Psi_i \rangle |^2$ (hier bezeichnen die Ψ_n die Anfangs- und Endzustände des Streuprozesses). In einer solchen Superposition jeden einzelnen Term realistisch zu deuten ist bereits in der klassischen Physik problematisch und verbietet sich in der Quantenmechanik vollends. Überlagerungszustände in der Quantentheorie drücken ja gerade aus, dass für die betreffende Größe keine feste Eigenschaft vorliegt – die Zahl und Art der virtuellen Zu-

stände ist also vollkommen unbestimmt. Ein analoger Fehler bestünde darin, beim Doppelspaltversuch mit Elektronen danach fragen zu wollen, durch welchen Spalt das später registrierte Teilchen gegangen sei (siehe [16], S. 53).

Es existieren also starke Argumente gegen eine realistische Deutung der virtuellen und prinzipiell unbeobachtbaren Zwischenzustände, die bei der störungstheoretischen Behandlung auftreten. Die Vorstellung, dass „Teilchen“ durch den Austausch (d.h. die Erzeugung und Vernichtung) virtueller Zustände Energie und Impuls übertragen, ist eher metaphorisch zu verstehen. Dies erkennt man auch daran, dass es sich um eine Darstellung der Wechselwirkung handelt, die auf dem speziellen Lösungsverfahren der Störungsrechnung beruht. Es besteht also die Gefahr, dass man ein „Artefakt dieser Rechenmethode“ [17, S. 629] zu einem zentralen Konzept der Naturbeschreibung erhebt. Man beachte, dass diese Frage in der üblichen Lehrbuchliteratur der theoretischen Physik kaum oder gar nicht adressiert wird, da es hier nicht um mögliche anschauliche Vorstellungen des physikalischen Prozesses, sondern seine Berechnung geht.

4 Mögliche Einwände

Auf zwei naheliegende Einwände gegen diese Darstellung will ich im Folgenden bereits kurz eingehen. Zum einen liegt es nach üblichem Verständnis im Wesen jedes Modells, den betreffenden Vorgang nur unter bestimmten Aspekten treu abzubilden („Verkürzungsmerkmal“). Der hypothetische Charakter und die begrenzte Aussagekraft eines Modells können und sollen auch zum Inhalt des Physikunterrichts gemacht werden (siehe etwa [18]). In diesem Sinne darf ein Modell auch fachwissenschaftliche Ungenauigkeiten (bzw. streng genommen: Fehler) enthalten. Mit diesem Argument lässt sich ein „operationaler Teilchenbegriff“ (siehe dazu Abschnitt 5) bei aller notwendigen Vorsicht rechtfertigen. Im Falle der „virtuellen“ Teilchen ist die Lage jedoch eine andere. Sieht man den Nutzen eines Modells unter anderem in seiner erklärenden Funktion, sollte nicht gerade eine solche „Erklärung“ durch einen fachwissenschaftlichen Fehler erkaufte werden. Es erscheint vor diesem Hintergrund problematisch, dass „virtuelle“ Austauschteilchen sogar Teil des Kernlehrplans in NRW sind.

Ein weiterer möglicher Einwand betrifft den Umstand, dass ich mich in weiten Teilen auf einen wissenschaftsphilosophischen Diskurs beziehe, der selbst unter Physikern wenig Beachtung findet. Schließlich wird das Material des „Netzwerk Teilchenwelt“ von aktiven CERN Physikern mitentwickelt, die darin schließlich ihre eigene Arbeit darstellen. Jedoch ist gerade die experimentelle Teilchenphysik oft von einem operationalen Wissenschaftsverständnis geprägt, das nicht unkritisch in die Schule transportiert werden sollte. Eine Datenanalyse in der Teilchenphysik am CERN braucht vor allem Kenntnisse des Detektors und von statistischen Auswertungsmethoden. Ihr Erfolg ist weitgehend unabhängig davon, ob der Experimentalphysiker „virtuelle Teilchen“ realistisch deutet oder nicht. Auch dem theoretischen Physiker können Feynman-Diagramme eine unschätzbare praktische Hilfe sein, deren Bedeutung von der eher philosophischen Frage, ob die zu Grunde liegenden Prozesse eine „reale“ Bedeutung haben, unabhängig ist.

Die hier dargestellte Diskussion um die „Interpretation der Quantenfeldtheorie“ fristet in der Physikausbildung ein noch stiefmütterlicheres Dasein als die bereits sehr viel länger geführte Debatte um die „Interpretation der Quantenmechanik“. Das Bewusstsein dafür, dass das Messproblem (siehe dazu auch den nächsten Abschnitt) innerhalb der QFT unvermindert weiter besteht, ist sicherlich nicht besonders ausgeprägt. Gerade in solchen Fragen liegt jedoch in besonderem Maße der Bildungswert der modernen Physik für die Schule (und Hochschule). In diesem Sinne kann dieser Artikel auch als Beitrag zur Hochschuldidaktik gelesen werden.

5 Fazit und didaktische Folgerungen

Die hier dargestellten Probleme sollten nicht als Plädoyer für den Verzicht auf die Teilchenphysik in der Schule missverstanden werden. In gewisser Weise ist es geradezu umgekehrt: der besondere Bildungswert der modernen Physik liegt meiner Auffassung nach gerade darin, dass sie zu einer grundlegenden Reflexion des Prozesses der physikalischen Erkenntnisgewinnung zwingt und damit auch zu einer Erweiterung des begrifflichen Rahmens der Physik führt. Der Begriff „Teilchen“ weckt durchgängig Assoziationen, die die Zustände der Quantenfeldtheorie nicht erfüllen. Dieser Begriff wurzelt in traditionellen naturphilosophischen Substanzvorstellungen, die in der klassischen Mechanik aufgegriffen und präzisiert wurden (vgl. [5], S. 159). Brigitte Falkenburg erläutert in [5] wie der klassische Teilchenbegriff innerhalb der Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie eine Wandlung erfährt. Teilchenspuren in einer Blasenkammer sind das Ergebnis von nicht vollständig determinierten Streuprozessen und ein fiktives Teilchen kann hier nicht als lokale Ursache angenommen werden. Vielmehr sind die diskreten Punkte der „Teilchenspur“ die lokalen Wirkungen einer nicht-lokalen Ursache. Zur Anwendung kommt also ein lediglich „operationaler Teilchenbegriff“, nach dem Teilchen als „Bündel dynamischer Größen (wie Masse, Energie, Ladung)“ aufzufassen sind, die sich in Detektoren „approximativ lokalisieren“ lassen ([5], S. 163). Die beiden Hauptaspekte des klassischen Teilchenbegriffs („Teil eines Ganzen“ zu sein sowie seine „kausale Bedeutung“, also mikroskopische Ursache zu sein) werden umgedeutet und der Zusammenhang zwischen ihnen geht im Wesentlichen verloren – und dies gilt bereits innerhalb der Quantenmechanik.

5.1 Anmerkungen zur Didaktik der Quantenmechanik

Damit wird auch deutlich, dass der Unterricht zur Quantenmechanik eine wichtige Rolle bei der Vermeidung der hier geschilderten Fehlvorstellungen spielt. Dies ist auch deshalb so wenig überraschend, da Untersuchungen zu Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten in der Quantenmechanik auf ganz ähnliche Probleme hinweisen. Diese betreffen etwa das Festhalten am Bohrschen Atommodell, Schwierigkeiten mit der Welle-Teilchen Problematik oder dem Verständnis von „Materiewellen“. Josef Küblbeck drückt wohl eine typische Haltung aus, wenn er schreibt: „Leider ist die Quantenphysik aber auch besonders unanschaulich und deshalb für Schüler schwer zu erfassen. Die experimentellen Ergebnisse können in der Regel nicht mit klassischen Vorstellungen erklärt werden“ [19, S. 255]. Diese Bemerkung scheint jedoch stärker die Experten- als die Schülerperspektive zu reflektieren. Schließlich tragen aus Schülersicht „anschauliche“ Vorstellungen auch in anderen Gebieten der Physik nur sehr eingeschränkt. Müller [20] erwähnt im selben Zusammenhang die elektrische Spannung als abstrakten Begriff, dessen unterrichtliche Behandlung (bei allen Schwierigkeiten) nicht an seiner Unanschaulichkeit scheitern muss. Alltags- und Schülervorstellungen in allen Bereichen der Physik orientieren sich zudem nicht an „klassischen“ Begriffen im Sinne der „klassischen Physik“ – aus Schülerperspektive wird auch deshalb die fehlende klassische Erklärungsmöglichkeit von Quantenphänomenen weniger schmerzvoll erfahren.

Es kann also begründet bezweifelt werden, dass die Physikdidaktik in der Quantenmechanik und Teilchenphysik vor grundsätzlich andere (und größere) Herausforderungen gestellt wird, als in anderen Teilgebieten. Schließlich sind Abstraktion und Unanschaulichkeit Eigenschaften von zahlreichen physikalischen Beschreibungen. In einer Hinsicht nimmt nun aber die Quantenphysik tatsächlich eine Sonderstellung ein, und dies betrifft die ungeklärten Grundlagenfragen zur Interpretation dieser Theorie. Diese betreffen im Kern aber nicht die Neuartigkeit der verwendeten Begriffe, sondern die behauptete Widersprüchlichkeit bzw. Unvollständigkeit der damit erreichten Naturbeschreibung. Die zentrale Frage der immer noch lebhaften Debatte um die Interpretation der QM (sowie der QFT) ist

jedoch das Messproblem, d.h. die Bedeutung von Überlagerungen zwischen makroskopisch verschiedenen Zuständen (Stichwort: „Schrödingers Katze“). Den „Kollaps der Wellenfunktion“ zu postulieren stellt hier keine Lösung dar, sondern ist nur eine Umformulierung des Problems. Die Frage, wann und warum es zu dieser Zustandsänderung, die nicht durch die Schrödingergleichung beschrieben wird, kommt, bleibt schließlich unbeantwortet.

Nicht immer wird in den didaktischen Konzepten zur QM (sowie den Lehrbuchdarstellungen) eine klare Position in der Deutungsfrage formuliert und so entsteht die Gefahr, dass sich didaktische Schwierigkeiten mit den tatsächlich ungeklärten Grundlagenfragen vermischen. Historische Exkurse, die kaum oder gar nicht in den Haupttext der Schulbücher integriert werden, tragen hier wenig zur Klärung bei. Dasselbe trifft auf Begriffe wie „Welle-Teilchen-Dualismus“ oder „Materiewelle“ zu, die aus der Frühphase der Diskussion stammen und nicht Teil der Lösung, sondern Teil des Problems sind. Einen pragmatischen Lösungsvorschlag für das Messproblem stellt etwa die Ensemble-Interpretation⁹ [21] dar, die z. Bsp. auch dem Münchner Unterrichtskonzept zur QM zugrunde liegt [22]. Auf einer solchen Grundlage kann nicht nur die Unangemessenheit klassischer Begriffe und Vorstellungen erläutert werden, sondern es gelingt auch die Formulierung kohärenter neuer Begriffe. Ein Elektron wird dann weder durch eine Materiewelle beschrieben, noch unterliegt es einem begrifflich unklaren „Welle-Teilchen-Dualismus“. Vielmehr verhält es sich in *allen* Beobachtungssituationen wie ein „Teilchen“, dessen Nachweiswahrscheinlichkeit sich jedoch wie eine Welle ausbreitet. Durch den Verzicht auf die Beschreibung individueller Zustände muss die Eindeutigkeit *einzelner* Messungen nicht mehr begründet werden; der „Kollaps der Wellenfunktion“ wird in einer Ensemble-Interpretation somit überflüssig.¹⁰

Statt einer eingeschränkten Gültigkeit klassischer Begriffe, kann dem Teilchen-Konzept also nur noch eine operationale Bedeutung gegeben werden. Der damit verbundene Verlust an Anschaulichkeit scheint hier genauso unausweichlich wie im Falle der abstrakten Strukturbegriffe der Physik (Zur Frage der Anschaulichkeit bzw. Anschauung in der Quantenmechanik siehe auch [23]).

5.2 Ähnliche Probleme in anderen Bereichen der Physik

Natürlich wäre es lebensfremd, daraus den Schluss zu ziehen, den Begriff „Teilchen“ aus der schulischen Behandlung der „Teilchenphysik“ zu verbannen. Tatsächlich stellt sich ein verwandtes Problem in der Wärmelehre mit dem ebenfalls namensgebenden Begriff „Wärme“. Auch dieser weckt Vorstellungen (etwa: „kann in Körpern gespeichert werden“), die für den fachwissenschaftlichen Wärmebegriff nicht zutreffen, sondern seine historischen Vorläufer charakterisieren. Von Baravalle [24] bemerkt mit Recht, dass man „früher seine Vorstellungen über Wärme mit dem Gedanken an einen Wärmestoff gleichsam zu tief in das Materielle hineingesenkt hatte [...]“ (S. 338). Für quasimechanische Modelle der Lichtausbreitung trifft im Übrigen dasselbe zu. Ihre Begriffsbildungen sind durchgängig nicht dem „Sehraum“, sondern dem „Tastraum“ entlehnt (siehe hierzu etwa [25]). Eben-

⁹ Damit ist gemeint, die Wellenfunktion nicht als Beschreibung *individueller Zustände* aufzufassen, sondern als Beschreibung der statistischen Eigenschaften einer im Prinzip unendlichen Menge (also eines *Ensembles*) identisch präparierter Zustände. Die „Lösung“ des Messproblems besteht gemäß der Ensemble-Deutung also darin, *einzelne* Messungen aus dem Gegenstandsbereich der Theorie auszuschließen. Die Frage ob eine theoretische Beschreibung der *einzelnen* Ensemble-Mitglieder möglich ist (und hier der Rahmen der üblichen Quantenmechanik überschritten werden muss) bleibt an dieser Stelle offen. In diesem Sinne handelt es sich also um eine Minimaldeutung der Theorie, die philosophisch nicht vollständig überzeugt (siehe etwa [14]).

¹⁰ Warum das Münchner Unterrichtskonzept die Ensemble-Interpretation einführt und dennoch die Zustandsreduktion als Besonderheit des quantenmechanischen Messprozesses behandelt [22, S. 110] erscheint vor diesem Hintergrund allerdings irreführend.

so missachten alle naiven Teilchenmodelle des elektrischen Stroms, dass die Erklärung von Elektrizitätsphänomenen nur gelingt, wenn die Grenzen der mechanischen Begriffsbilder überschritten werden.

Somit ist es unzutreffend, wenn man die Grenzen der Anwendbarkeit klassischer Substanzvorstellungen erst in der Quantenmechanik erreicht sieht. Bereits innerhalb der Wärmelehre, Optik oder bei der Behandlung von elektromagnetischen Wellen stoßen mechanische Begriffe an ihrer Grenzen und die Einführung des Feldkonzeptes oder die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ohne mechanischen Träger markieren Brüche bzw. Umdeutungen und Ergänzungen der klassischen Materievorstellung. Die Entwicklung anschlussfähiger und fachlich tragfähiger Konzepte zu Quanten- und Teilchenphysik kann somit bereits in diesen Bereichen der Schulphysik vorbereitet werden. Hinweise für einen Brückenschlag aus der optischen Beugung zur Quantentheorie gibt etwa die Arbeit von Sommer [26, S. 127ff]. Besonders vielversprechend für diesen Versuch ist der Phänomenbereich der Polarisation (siehe [27]).

Literatur

- [1] Grehn, J. und Krause, J. (Hrsg.) (2007) „Metzler Physik“, Braunschweig: Westermann.
- [2] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes NRW (Hrsg.) (2013) „Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen – Physik“, Frechen: Ritterbach.
- [3] Kuhar, M und Trefzger, T. (2013) „Teilchen im Klassensatz“, Physik Journal 12, Nr. 10, 49-52.
- [4] Hopf et al. (2011) „Fachdidaktik kompakt“, Köln: Aulis.
- [5] Falkenburg, B. (2012) „Was sind subatomare Teilchen?“, in: M. Esfeld (Hrsg.) Philosophie der Physik, Berlin: Suhrkamp.
- [6] Scheck, F. (2001) „Theoretische Physik 4 – Quantisierte Felder“, Berlin: Springer.
- [7] Malament, D. B. (1996) „In defense of dogma: why there cannot be a relativistic quantum mechanics of (localizable) particles“, in: R. Clifton (Hrsg.) „Perspectives on Quantum Reality“, Dordrecht: Kluwer.
- [8] Halvorson, H. und Clifton, R. (2002) „No place for particles in relativistic quantum theories?“, Philosophy of Science, Vol. 69, No. 1. 1-28.
- [9] Fraser, D. and Earman, J. (2008) „The fate of “particles” in quantum field theories with interactions“, Studies in the History and Philosophy of Modern Physics, 39, 841-859.
- [10] Kuhn, W. und Strnad, J. (1995) „Quantenfeldtheorie“, Braunschweig: Vieweg.
- [11] Greenstein, G and Zajonc, A. (2005) „The Quantum Challenge“, London: Jones and Bartlett.
- [12] Simonsohn, G. (1981) „Probleme mit dem Photon im Physikunterricht“, Praxis der Naturwissenschaften, 9/30.
- [13] Meyn, J.-P. (2013) „Zur Geschichte des Photons“, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 1/62.
- [14] Friebe, C., Stöckler, M., Kuhlmann, M., Lyre, H., Passon, O. und Näger, P. „Philosophie der Quantentheorie“, in Vorbereitung (geplante Veröffentlichung 2014), Heidelberg: Springer-Spektrum.
- [15] Bunge, M. (1970) „Virtual Processes and Virtual Particles: Real or Fictitious?“, International Journal for Theoretical Physics, Vol. 3, No. 6, 507-508.
- [16] Weingard, R. (1988) „Virtual Particles and the Interpretation of Quantum Field Theory“, in: H. R. Brown und R. Harré (Hrsg.) „Philosophical Foundations of Quantum Field Theory“ 1988, Oxford: OUP.
- [17] Huggett, N. (2000) „Philosophical Foundations of Quantum Field Theory“, British Journal for the Philosophy of Science, Vol. 51, 617-637.
- [18] Mikelskis-Seifert, S. (2006) „Im Physikunterricht modellieren“, in: H. Mikelskis (Hrsg.). Physik-Didaktik – Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II. Berlin: Cornelsen.
- [19] Küblbeck, J. (2009) „Quantenphysik“, In: E. Kirchner et al. (Hrsg.) „Physikdidaktik – Theorie und Praxis“, 2. Auflage, Heidelberg: Springer.
- [20] Müller, R. (2013) „Die Grenzen der Anschauung“, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 1/62.
- [21] Ballentine, L. (1970) „The statistical interpretation of quantum mechanics“, Review of Modern Physics, Vol. 42, No. 4.
- [22] Müller, R. (2003) „Quantenphysik in der Schule“, Berlin: Logos.

- [23] Leuchs, G. (2013) „Wie viel Anschauung verträgt die Quantenmechanik“, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 1/62.
- [24] von Baravalle, H. (1993) „Physik als reine Phänomenologie, Band 1: Mechanik, Wärme und Kälte“, Stuttgart: Verlag freies Geistesleben.
- [25] Maier, G. (1993) „Optik der Bilder“, Dürnau: Verlag der Kooperative Dürnau.
- [26] Sommer, W. (2005) „Zur phänomenologischen Beschreibung der Beugung im Konzept der optischen Wege“, Berlin: Logos.
- [27] Grebe-Ellis, J. (2005) „Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisation“, Berlin: Logos.