

Der didaktische Nutzen von Feynman-Diagrammen

Merten Dahlkemper^{*+}, Pascal Klein⁺, Andreas Müller[°], Sascha Schmeling^{*}, Jeff Wiener^{*}

^{*} CERN, Esplanade des Particules 1, CH-1211 Genève 23, Schweiz,

⁺ Fakultät für Physik, Abteilung Didaktik der Physik, Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen,

[°] Faculty of Science/Physics Section IUFÉ, Universität Genf, Pavillon Mail, Boulevard du Pont d'Arve 40, CH-1211 Genève 4, Schweiz

merten.dahlkemper@cern.ch

Kurzfassung

Feynman-Diagramme sind eine der populärsten Darstellungsformen in der Teilchenphysik. Bislang gibt es jedoch noch kaum Untersuchungen aus der Physikdidaktik zu ihrem Nutzen. In diesem Forschungsprojekt wurde deshalb untersucht, welche Nutzen Feynman-Diagramme für Oberstufenschüler:innen haben. Um diese Frage zu beantworten, wurden Interviews mit 4 Experten im Bereich der Teilchenphysikdidaktik und Wissenschaftsphilosophie durchgeführt, um nach Herausforderungen, Möglichkeiten und möglichen Konzepten zu suchen. Als Herausforderungen wurde das unbeabsichtigte Induzieren möglicher Fehlkonzepte sowie die zu oberflächliche Behandlung im Physikunterricht gefunden. Als zentrale Konzepte wurden Ladungserhaltung, Austauschteilchen und die Superposition von Prozessen gefunden. Als Möglichkeiten wurden von den Experten der Anreiz zur Auseinandersetzung mit Wissenschaft sowie die mögliche Verknüpfung von Teilchenphysik mit anderen Themen aus der Schulphysik genannt. Die Ergebnisse wurden verwendet, um mögliche Lernziele für eine multimediale Lernumgebung zum Thema Feynman-Diagramme zu definieren.

1. Einleitung

1.1. Motivation und Kontext

Teilchenphysik spielt in immer mehr Physikcurricula rund um die Welt eine Rolle. Häufig werden dabei auch Feynman-Diagramme thematisiert, die als eine der am weitesten verbreiteten Darstellungen in der Teilchenphysik unweigerlich auch interessierten Schüler:innen begegnen. Die vorliegende Studie ist Teil eines Design-Based-Research-Projektes, in dem es darum geht, diese Darstellungsform zu nutzen, um anhand von ihr Konzepte in der Elementarteilchenphysik an Oberstufenschüler:innen (14-18 Jahre) zu vermitteln.

Bisher gibt es kaum systematische Untersuchungen dazu, wie Feynman-Diagramme für die Didaktik der Teilchenphysik von Nutzen sein können. Dies herauszufinden ist das Ziel der vorliegenden Studie.

1.2. Feynman-Diagramme

Feynman-Diagramme [1] wurden erstmals von Richard Feynman auf einer Konferenz im Frühjahr 1948 öffentlich vorgestellt [2]. Seitdem sind sie in vielen Bereichen der theoretischen Physik, vor allem aber in der Quantenfeldtheorie und damit der Teilchenphysik, zu einem weit verbreiteten grafischen Hilfsmittel geworden. Tatsächlich werden sie hauptsächlich als "Buchhaltungswerkzeug" bei der störungstheoretischen Berechnung von Prozessen in der Teilchenphysik verwendet [2].

Die Diagramme werden jedoch mittlerweile nicht nur in wissenschaftlichen, sondern auch in populärwissenschaftlichen Publikationen und teilweise in Lehr-Lern-Materialien für den Schulunterricht verwendet

(z. B. [3]). Hier werden sie meist als (vermeintlich) anschauliche Darstellung teilchenphysikalischer Prozesse verwendet. Passon et al. [4], [5] weisen in diesem Zusammenhang auf verschiedene mit Feynman-Diagrammen verbundene Vorstellungen hin, die so nicht haltbar sind. So ist zum Beispiel jede Lesart, in der Teilchen eine Flugbahn in Raum und Zeit zugeordnet wird, physikalisch unsinnig. Verschiedene Physiker:innen und Physikdidaktiker:innen haben versucht, didaktische Einführungen in die Feynman-Diagramme zu geben. Pascolini & Pietroni [6] stellten die Diagramme als "akkurate Metaphern" vor und versuchten, den Lernenden die den Feynman-Diagrammen zugrunde liegenden Regeln anhand eines mechanischen Modells zu vermitteln. Dieser Ansatz wurde in einem reinen Post-Test-Design empirisch untersucht, und es wurde ein positiver Einfluss auf das Lernen festgestellt.

Im Allgemeinen unterscheiden sich die Erklärungen darin, wie viel Wert auf eine "wörtliche Lesart" gelegt wird. In einigen Texten werden die Feynman-Diagramme als Raum-Zeit-Diagramme eingeführt [7], während in anderen die einzelnen fundamentalen Vertices erklärt und mit mathematischen Begriffen verknüpft werden [8]. Wieder andere Texte beschreiben Feynman-Diagramme als Beitrag zu einer Wahrscheinlichkeitsamplitude und adressieren auf diese Art das Problem der zu wörtlichen Lesart [5], [9], [10].

Hoekzema et al. [11] verfolgen einen anderen Ansatz. In ihrem Text arbeiten sie mit einer reduzierten Form von Feynman-Diagrammen, die sie "Reaktionsdia-

gramme" nennen, um Erhaltungssätze und Symmetrien in der Teilchenphysik zu erklären. Der Text wurde in Schulen eingesetzt und erhielt positive Rückmeldungen von Lehrkräften. Insbesondere wurde der Ansatz mit der reduzierten Form der Feynman-Diagramme als verständlicher beurteilt als ein früherer Text mit herkömmlichen Feynman-Diagrammen.

1.3. Forschungsfragen

Obwohl es wie oben beschrieben viele Versuche gab, Feynman-Diagramme didaktisch einzusetzen, wurde bislang nicht systematisch untersucht, welchen didaktischen Zwecken diese Darstellungsform in der Teilchenphysik und darüber hinaus dienen könnten. Im Rahmen des eingangs erwähnten Design-Based-Research-Projektes ergibt sich die folgende Forschungsfrage:

Welchen kognitiven und affektiven Nutzen können Feynman-Diagramme haben, wenn man sie mit Oberstufenschüler:innen verwendet?

2. Methoden

Um die oben genannte Forschungsfrage zu beantworten, wurden Interviews mit Experten [12] im Bereich der Physikdidaktik mit Schwerpunkt Teilchenphysik aus dem deutschsprachigen Raum durchgeführt.

2.1. Auswahl der Experten

Als Experten wurden zunächst drei Wissenschaftler von zwei deutschen Universitäten ausgewählt, deren Physikdidaktik-Arbeitsgruppen einen ausgewiesenen Schwerpunkt in der Vermittlung von Elementarteilchenphysik an Oberstufenschüler:innen haben. Alle drei Experten haben einen Studienhintergrund in Elementarteilchenphysik. Zwei der Experten sind Forschende in der Physikdidaktik, einer in der Teilchenphysik. Alle drei haben mehrere Jahre Erfahrung in der Vermittlung von Elementarteilchenphysik an Oberstufenschüler:innen, entweder in der Schule oder in extracurricularen Aktivitäten.

Nach der Durchführung der Interviews und Diskussion der Ergebnisse im Autorenteam wurde deutlich, dass die epistemologische Fragestellung über den Zusammenhang zwischen Feynman-Diagrammen und Realität nicht eindeutig aufgelöst werden konnte. Aus diesem Grund wurde ein weiteres Interview mit einem Wissenschaftsphilosophen durchgeführt. Dieser verfügt über eine ausgewiesene Expertise im Bereich von philosophischen Aspekten der modernen Physik.

2.2. Durchführung der Interviews

Die Interviews wurden semistrukturiert durchgeführt, d.h. der Interviewer, in diesem Fall der Erstautor, hatte einen Interviewleitfaden, von dem abgewichen werden konnte, sofern es für die Antwort angemessen erschien.

Der Interviewleitfaden wurde um zwei Leitfragen herum konstruiert, welche sich wiederum aus der Forschungsfrage ableiten. Diese lauteten:

- 1) Welche Herausforderungen und möglichen Lernschwierigkeiten sind damit verbunden, Feynman-Diagramme für Oberstufenschüler:innen zu unterrichten?
- 2) Welche Möglichkeiten für den Physikunterricht in der Oberstufe ergeben sich aus der Verwendung von Feynman-Diagrammen?

Der Interviewleitfaden bestand aus insgesamt 12 Fragen, die in drei Abschnitte aufgeteilt wurden: Im ersten Abschnitt sollten die Experten beschreiben, was Feynman-Diagramme sind, im zweiten Abschnitt mögliche Lernschwierigkeiten beschreiben und im dritten Möglichkeiten aufzeigen, die Feynman-Diagramme für den Physikunterricht mit sich bringen.

Somit zielte der zweite Abschnitt primär auf die Beantwortung der ersten Leitfrage und der dritte Abschnitt auf die zweite Leitfrage ab. Der erste Abschnitt zielte darauf ab, mögliche Erklärungsmuster für Oberstufenschüler:innen zu generieren. Aufgrund der Natur des semistrukturierten Interviews wurde den Experten bei der Beantwortung der Fragen ein gewisser Freiraum gelassen, sodass Antworten auf die beiden Leitfragen auch im jeweils anderen Teil gegeben wurden.

Besonders wurde darauf geachtet, dass die Experten bei der Beantwortung der Fragen die Eignung für die Zielgruppe im Blick behielten. So wurde zum Beispiel im ersten Abschnitt explizit nach einer Erklärung für 17-jährige Oberstufenschüler:innen gefragt.

Für das vierte Interview wurde der Interviewleitfaden entsprechend der mit ihm verbundenen Fragestellung sowie der Expertise des Experten angepasst. Der Leitfaden wurde um 11 Fragen erweitert. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Interviews zu gewährleisten, wurden aus dem ersten Leitfaden 5 Fragen übernommen. Der neue Leitfaden bestand aus insgesamt vier Abschnitten. Im ersten Abschnitt wurde eine gemeinsame Sprache rund um die im Interview verwendeten Begriffe wie Realität, Modell oder Theorie gefunden, im zweiten Teil wurde der Zusammenhang zwischen Modellen und Realität erörtert. Der dritte Abschnitt bestand aus den Fragen rund um Feynman-Diagramme aus dem ersten Leitfaden. Der vierte Abschnitt behandelte den Nutzen moderner Physik und wissenschaftsphilosophischer Aspekte in der Schule.

Die Interviews wurden durch den Erstautor in deutscher Sprache über eine Videokonferenzsoftware in Ton und Bild durchgeführt und aufgezeichnet. Die Audioaufnahmen wurden anschließend manuell sowie unter Zuhilfenahme einer Spracherkennungssoftware transkribiert.

2.3. Analyse der Interviews

Die Transkripte der Interviews wurden mittels thematischer Analyse ausgewertet [13]. Das Codierschema für die Analyse wurde induktiv erstellt, wobei jedoch die o.g. Leitfragen als Gerüst dienten, mit deren Hilfe das Schema erstellt wurde. Die Transkripte wurden also einerseits auf Herausforderungen, andererseits

auf Möglichkeiten hin untersucht, die Feynman-Diagramme im Gebrauch mit Oberstufenschüler:innen bieten. Zusätzlich wurden die Textstellen kodiert, in denen explizit Konzepte erwähnt wurden, die mit Feynman-Diagrammen verbunden sind.

In einem ersten Codierdurchgang wurden ca. 30% der Transkripte codiert. Das heißt, einzelnen Textstellen wurden Codes mit vorläufigen Code-Beschreibungen zugeordnet, die ihren Inhalt im Hinblick auf die drei o.g. Kategorien beschrieben. Die Codes wurden direkt einer der drei Kategorien zugeordnet. Nach dem ersten Codierdurchgang wurde das Codierschema zwischen den Autoren diskutiert und überarbeitet. Basierend auf dem überarbeiteten Codierschema wurde der volle Text codiert, wobei noch Codes hinzugefügt wurden. Anschließend wurden die Codes innerhalb der Kategorien in übergeordnete Themen und Sub-Themen zusammengefasst. Die Codes und Themen wurden anschließend ein weiteres Mal überarbeitet, wobei Themen und Codes umbenannt wurden und eine finale Beschreibung erhielten. Die Kategorien, Themen und Codes wurden anschließend zusammen mit allen Code-Beschreibungen in einem Coding-Handbuch zusammengefasst.

3. Ergebnisse

Die Interviews dauerten jeweils 63, 81, 37 und 81 Minuten. In den Transkripten wurden insgesamt 327 Textstellen in 71 Codes codiert.

Insgesamt konnten die Codes acht Themen zugeordnet werden, die wiederum per Konstruktion den drei Kategorien *Herausforderungen*, *Möglichkeiten* und *Konzepte* zugeordnet waren. Bei den Herausforderungen war die unbeabsichtigte Induzierung von Allob-Vorstellungen über Teilchenphysik das prominenteste Thema, daneben wurden Herausforderungen genannt, die insbesondere die Behandlung von Feynman-Diagrammen im Schulunterricht betreffen. Unter den Möglichkeiten wurden im Wesentlichen zwei Themen diskutiert: Einerseits die Möglichkeit, anhand der Diagramme sich mit Wissenschaft im Allgemeinen auseinanderzusetzen und andererseits die Möglichkeit, über die Feynman-Diagramme eine Verbindung zu anderen Themen der Schulphysik herzustellen. Die in den Interviews erwähnten Konzepte wiederum lassen sich unterteilen in Ladung und Ladungserhaltung, Superposition von Prozessen sowie Austauschteilchen. Im Folgenden werden die gefundenen Themen kurz genauer beschrieben.

Die Experten werden im Folgenden mit E1, E2 und E3 bezeichnet.

3.1. Herausforderungen

3.1.1. Beförderung von Fehlvorstellungen über Teilchenphysik

Die Experten diskutierten einige Quellen für Fehlvorstellungen, die aus den Feynman-Diagrammen herühren. Eine wichtige Quelle für den Ursprung dieser Fehlvorstellungen ist die Verwendung von Feynman-Diagrammen im Alltag von Wissenschaftler:innen.

E1 beschreibt diesen Umstand, dass „der Umgang mit Feynman-Diagrammen immer in eine Praxis eingebettet“ und „das Reden über Feynman-Diagramme ... einfach der Jargon“ sei. Für Schüler:innen hingegen seien „diese Diagramme ... einfach pures Gift“.

Insbesondere verweist E1 darauf, dass Feynman-Diagramme „vorgeblich Geschichten davon was passiert“ erzählen würden. Jedoch solle diese „Form von Anschaulichkeit im Sinne von raumzeitlicher Einbettung“ vermieden werden. Jedoch verweist E3 darauf, dass ihm „auch bei Lehrkräften aufgefallen“ sei, dass sie „versuchen, aus [der] Geometrie Information abzulesen über die Bewegung ... der beteiligten Teilchen“. Auch E2 stellt klar, dass die Interpretation eines Feynman-Diagramms als Orts-Zeit-Diagramm „nur hier ne Krücke“ sei, denn es könne „gar kein richtiges Orts-Zeit-Diagramm sein“, da es „in der Quantenmechanik ja gar keinen Bahnbegriff“ gebe. Weiter führt E2 aus, dass ein Feynman-Diagramm „schon gar nicht ein Abbild eines Prozesses in dem Sinn“ sei, sondern „eine quantenmechanische Amplitude“. E1 erweitert diesen Punkt, indem er betont, dass die Quantenfeldtheorie, also die der Elementarteilchenphysik zugrunde liegende Theorie, „nicht weniger seltsam“ sei als die Quantenmechanik und die „Form von Anschaulichkeit“, die durch die Feynman-Diagramme suggerierten, „unsere modernen Theorien nicht [bieten]“ würden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Experten darauf hinweisen, dass in Feynman-Diagrammen Information enkodiert ist, die Wissenschaftler:innen im täglichen Umgang mit diesen leicht zugänglich ist, für Laien ohne Erfahrung im Umgang mit diesen jedoch Missverständnisse entstehen, insbesondere dadurch, dass sie vergleichsweise einfach aussehen.

3.1.2. Allgemeine Herausforderungen für den Schulunterricht

Eine Herausforderung, die vor allem von E1 herausgestellt wurde, war die, dass die Behandlung von Teilchenphysik im Schulunterricht Zeit koste, die von der Behandlung anderer Themen weggenommen würde. Zu der Frage ob Feynman-Diagramme bzw. Teilchenphysik insgesamt im Schulunterricht behandelt werden sollten, führt er aus, dass dies ja auch mit der Frage verbunden sei, was dadurch rausfiele und man verliere. Man solle diese Zeit „zum Beispiel der Quantenmechanik nicht wegnehmen“. E3 weist außerdem darauf hin, dass für eine Behandlung der Diagramme im Schulunterricht ein gewisses „Vorwissen, um nicht einer zu wörtlichen Lesart der Diagramme zu unterliegen“ nötig sei, also etwa „Vorwissen zu Quantenobjekten allgemein“.

Insgesamt spielten Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Schulunterricht in den Interviews eine kleine Rolle und wurden nur von E1 und E3 überhaupt erwähnt.

3.2. Möglichkeiten

3.2.1. Auseinandersetzung mit Wissenschaft

Die Experten erwähnten mehrere Aspekte, mit denen Feynman-Diagramme als Anreiz zur Auseinandersetzung mit Wissenschaft im allgemeinen bzw. der modernen Physik im speziellen beitragen können.

Der erste Aspekt dabei ist, dass die Feynman-Diagramme einen wichtigen Beitrag dazu leisten, hochpräzise theoretische Vorhersagen zu machen. E2 betont, dass „die Physik so weit gekommen [sei], es geschafft zu haben, vorherzusagen, was darf passieren, ... was darf nicht passieren und sogar mit welcher Wahrscheinlichkeit passiert dieses oder jenes“. Diese „Vorhersagekraft“ sei etwas, „was man unbedingt auch schon in der Schule betonen sollte“. Auch der vierte Experte, E4, beschreibt diese Theorie als „die erfolgreichste Theorie, die die Menschheit je aufgestellt“ habe. Mit Bezug auf die o.g. Herausforderung, dass die Feynman-Diagramme nicht einen tatsächlich stattfindenden Prozess darstellen, betont er jedoch, „dass etwas, von dem man glaubt, dass es so nicht stattfindet ... trotzdem eine so gute Berechnung erlauben kann, die sich x-fach bestätigt“ habe. E2 beschreibt diesen Aspekt aus der Sicht eines Teilchenphysikers, dass Feynman-Diagramme für ihn „[eine] sehr anschauliche Darstellung, [eine] sehr hilfreiche, aber eben auch sehr eindrucksvoll mächtige Darstellung“ sei. Schüler:innen wiederum lernten durch die Verwendung von Feynman-Diagrammen „[etwas] über Vorgehen und Mathematisierung in der theoretischen Physik“ (E3). Auch E4 erklärt, „dass man vieles, das Standardmodell der Teilchenphysik ohne Feynman-Diagramme unterrichten kann, ... aber dass vielleicht Feynman-Diagramme dazu dienen können, ... auch die Methodik der Teilchenphysik [aufzuzeigen]“. Er betont also den Nutzen über die teilchenphysikalischen Konzepte hinaus. Vielmehr könnten Feynman-Diagramme dazu dienen, die Arbeitsweise der modernen Teilchenphysik aufzuzeigen.

Ein weiterer Aspekt, der mit der Auseinandersetzung mit Wissenschaft zusammenhängt, ist die kritische Betrachtung von wissenschaftlichen Darstellungen, wie etwa in Lehrbüchern oder populärwissenschaftlichen Texten. E3 erläutert, dass „es natürlich auch ein Lernziel sein“ solle, „dass die Schüler:innen dazu populärwissenschaftliche Literatur oder Quellen ... einordnen können“. E1 beschreibt sogar als „Hauptnutzen im didaktischen Kontext“, dass man „auf verbreitete Missverständnisse hinweisen“ können und „die Schüler auf die Reise schicken, in populären, aber auch fachnahen Darstellungen irreführende oder falsche Darstellungen zu finden“. Dies könne „ein Beitrag zu einem Autonomieerlebnis sein“.

3.2.2. Verbindung zu anderen Themen der Schulphysik

Die Experten erwähnten in den Interviews, dass Feynman-Diagramme auf vielfältige Weise mit im Schulunterricht vorkommenden Konzepten verknüpft

sind. Auf die Konzepte wird im Einzelnen in den Themen der dritten Kategorie eingegangen.

Insbesondere wird von den Experten darauf hingewiesen, dass mittels der Feynman-Diagramme eine Verknüpfung zwischen Quantenmechanik und Teilchenphysik hergestellt werden könne. E1 betont, dass man im Unterricht der Elementarteilchenphysik „eine gewisse Einheitlichkeit der modernen Physik“ darstellen solle und „dass man guckt, wo man noch vertiefen kann, was man in der Quantenmechanik schon gelernt hat, dass das wie [eine] Einheit betrachtet wird“. E2 stellt heraus, dass „man frühestmöglich auf die andere Welt der Quantenphysik verweisen“ solle.

Daneben wird das Konzept der Ladungserhaltung als sehr anschlussfähig beurteilt. E2 schätzt ein, dass sich „Ladungserhaltung ... auf jeden Fall mit jüngeren [als Oberstufenschüler:innen] machen“ ließe.

3.3. Verknüpfte Konzepte

3.3.1. Ladung und Ladungserhaltung

Eines der am häufigsten erwähnten Konzepte in den Interviews war das Konzept der Ladungserhaltung. So beschreibt E3, dass es „natürlich ... relevant“ sei, „dass man die Erhaltungssätze ... anhand dieser Feynman-Diagramme auch überprüfen kann“. Aber auch das Konzept der Ladung an sich sei wichtig. So beschreibt E2 Ladung als „wichtige[n] Begriff, um überhaupt zu verstehen, welches Diagramm darf ich malen, welchen Vertex darf ich malen?“.

Insgesamt werden die Konzepte der Ladung und der Ladungserhaltung eng verknüpft betrachtet und als wesentliches Konzept im Zusammenhang mit Feynman-Diagrammen beschrieben.

3.3.2. Superposition von Prozessen

Wie oben erwähnt wurden Feynman-Diagramme als Gelegenheit gesehen, wie man Quantenmechanik und Teilchenphysik verknüpfen kann.

E1 beschreibt diesen Punkt, „dass jedes Feynman-Diagramm nicht nur für einen physikalischen Prozess steht, sondern nur ein Anteil ist ... bei der Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeit“. Er beschreibt dies auch in der Analogie zum Doppelspalt, „dass man sagt ... es gibt einen Anteil der Wellenfunktion, der drückt aus, dass das Elektron durch den einen Spalt drückt“. E2 hebt dieses Thema auf eine etwas allgemeinere Ebene, indem er den Punkt betont, dass man „nur noch Wahrscheinlichkeiten sagen“ könne.

Insgesamt betonen alle Experten, dass insbesondere durch Feynman-Diagramme der probabilistische Charakter der Teilchenphysik sehr gut motiviert werden könne.

3.3.3. Austauscheteilchen

Das wichtigste teilchenphysikalische Konzept, dass die Experten erwähnten, war das der Wechselwirkungs-, Austausch oder Botenteilchen. E1 erwähnte dazu, dass „Austauschteilchen ihre metaphorische

Bedeutung aus dieser graphischen Symbolsprache erhalten“ würden und beschrieb, dass „der einzige Grund, weshalb man [in der Schule] über Feynman-Diagramme reden sollte“ sei, „weil man darüber Austauscheteilchen einführen“ könne. E3 wiederum beschreibt es gerade anders herum, dass Schüler:innen „das Konzept der Beschreibung von Wechselwirkungen kennen“ müssten.

Alle Experten erwähnten dieses Konzept als ein zentrales in der Teilchenphysik, wobei E1 einen besonderen Schwerpunkt darauf legte.

4. Diskussion

Die Ergebnisse aus den Experteninterviews zeigen das Potential, aber auch die Schwierigkeiten auf, die mit der Behandlung von Feynman-Diagrammen mit Jugendlichen verbunden sind. Basierend auf den Ergebnissen wurden vier Lernziele für potenzielles Lernmaterial für Feynman-Diagramme entwickelt. Diese werden hier kurz vorgestellt und motiviert.

4.1. Lernziele

4.1.1. Ladungserhaltung

Das erste Lernziel lautet „Schüler:innen sind in der Lage, mit Hilfe des Konzepts der Ladungserhaltung zu überprüfen, ob ein Teilchenprozess möglich ist.“. Das Konzept der Ladungserhaltung wurde von den Experten als eines der grundlegenden mit Feynman-Diagrammen verbundenen Konzepte erwähnt und ist anschlussfähig an die Mittelstufe, in denen die Konzepte Ladung (wenn auch nur elektrische) und Erhaltungssätze (unter anderem am Beispiel der Energie) eingeführt werden. Auch Hoekzema et al. [11] verwenden Erhaltungssätze als eines der Kernelemente ihrer Lerneinheit.

4.1.2. Austauscheteilchen

Das zweite Lernziel basiert ebenfalls auf einem der Konzepte, welches die Experten als zentral erachtet haben. Es lautet: „Schüler:innen können die Rolle von Wechselwirkungsteilchen erklären sowie ihre Existenz im Standardmodell der Teilchenphysik motivieren.“. Die Rolle von Wechselwirkungs- oder Austauscheteilchen im Standardmodell wird auf unterschiedliche Art und Weise eingeführt, so zum Beispiel über Alltagsanalogien, die jedoch eher Fehlkonzepte befördern, als dass sie physikalische Konzepte erklären. Fachnähere Darstellungen führen das Konzept der Austauscheteilchen über Felder ein [9], [10], [14].

4.1.3. Superposition

Das dritte Lernziel greift das Konzept der Superposition von Prozessen auf und trägt dem Gedanken Rechnung, die teilchenphysikalischen Konzepte mehr mit der Quantenphysik zu verknüpfen. Um es für Oberstufenschüler:innen zugänglicher zu machen, besteht es aus zwei Teilen. Der erste Teil lautet: „Die Schüler:innen sind in der Lage, das Superpositionsprinzip aus der Quantenmechanik auf Teilchenprozesse zu übertragen.“ Hierbei sollen die Schüler:innen erkennen, dass ein Prozess nicht nur von einem

einzelnen Diagramm dargestellt wird, sondern immer mehrere Diagramme zu einem Prozess beitragen, in Analogie zum Doppelspaltexperiment, bei dem beide Spalte gleichermaßen zum Interferenzmuster beitragen. In Erweiterung dieses Prinzips lautet der zweite Teil dieses Lernziels: „Die Schüler:innen erkennen Teilchenprozesse als eine Superposition von unendlich vielen Beiträgen.“. Hierbei lernen die Schüler:innen, dass jedes Feynman-Diagramm im Prinzip erweiterbar ist, ohne dass es einen anderen Prozess repräsentiert.

4.1.4. Arbeit von Teilchenphysiker:innen

Das vierte Lernziel trägt dem Thema der Auseinandersetzung mit Wissenschaft Rechnung. Die Experten betonten, dass Feynman-Diagramme einen Einblick darein geben können, wie in der (theoretischen) Teilchenphysik gearbeitet wird. Um dies zu nutzen, lautet das vierte Lernziel: „Die Schüler:innen können die Methode der Feynman-Diagramme auf die Arbeit von Teilchenphysiker:innen anwenden.“. Um dieses Lernziel zu erreichen, könnten die Schüler:innen etwa damit konfrontiert werden, dass eine Messung nicht mit einer theoretischen Vorhersage übereinstimmt und die Schüler:innen müssten erkennen, dass dies unter anderem daran liegen könnte, dass zu wenig Feynman-Diagramme berücksichtigt wurden. So kann der Einsatz von Feynman-Diagrammen in der Praxis dargestellt werden.

5. Ausblick

Die in dieser Studie entwickelten Lernziele werden verwendet, um darauf basierend Lernmaterialien zum Thema Feynman-Diagramme zu erstellen, welche mittel- bis langfristig in einen derzeit in der Entwicklung befindlichen Online-Kurs über Teilchenphysik für 14-18-Jährige eingegliedert werden. Die Entwicklung dieser Lernmaterialien passiert im Rahmen des Design-Based Research Frameworks [15]. Für diese Lernmaterialien werden Designprinzipien auf Basis von Multimedia-Lerntheorien entwickelt. Die auf Basis dieser Prinzipien entwickelten Lernmaterialien werden in sogenannten Teaching Experiments unter Einbeziehung von Eye Tracking-Daten mit Schüler:innen aus der Zielgruppe getestet und auf die Unterstützung durch Designprinzipien sowie auf die Angemessenheit der Lernziele hin überprüft. Auf Basis der Ergebnisse dieser Teaching Experiments werden die Lernmaterialien anschließend weiterentwickelt.

6. Literatur

- [1] R. P. Feynman, „Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics“, *Phys. Rev.*, Bd. 76, Nr. 6, S. 769–789, Sep. 1949, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.769>.
- [2] D. Kaiser, *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*. University of Chicago Press, 2005.
- [3] M. Kobel, U. Bilow, P. Lindenau, und B. Schorn, „Teilchenphysik: Ladungen, Wech-

- selwirkungen und Teilchen - Unterrichtsmaterial ab Klasse 10“, Joachim Herz Stiftung, Hamburg, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.teilchenwelt.de/wp-content/uploads/2022/05/band1.pdf>
- [4] O. Passon, T. Zügge, und J. Grebe-Ellis, „Pitfalls in the teaching of elementary particle physics“, *Phys. Educ.*, Bd. 54, Nr. 1, S. 015014, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aadbc7>.
- [5] O. Passon, P. Lindenau, und M. Kobel, „Von Feynman-Diagrammen und Stromkreisen“, *Unterr. Phys.*, Bd. 180, 2020, Zugegriffen: 19. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.friedrich-verlag.de/physik/quantenphysik/von-feynman-diagrammen-und-stromkreisen-7480>
- [6] A. Pascolini und M. Pietroni, „Feynman diagrams as metaphors: borrowing the particle physicist’s imagery for science communication purposes“, *Phys. Educ.*, Bd. 37, Nr. 4, S. 324, Juli 2002, doi: <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/4/306>.
- [7] G. T. Jones, „The uncertainty principle, virtual particles and real forces“, *Phys. Educ.*, Bd. 37, Nr. 3, S. 223–233, Mai 2002, doi: <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/3/306>.
- [8] J. Woithe, G. J. Wiener, und F. F. V. der Veken, „Let’s have a coffee with the Standard Model of particle physics!“ , *Phys. Educ.*, Bd. 52, Nr. 3, S. 034001, März 2017, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa5b25>.
- [9] J. Allday, „The nature of force in particle physics“, *Phys. Educ.*, Bd. 32, Nr. 5, S. 327, Sep. 1997, doi: <https://doi.org/10.1088/0031-9120/32/5/016>.
- [10] R. Lambourne, „Predicting the physics of particles“, *Phys. Educ.*, Bd. 27, Nr. 2, S. 71, März 1992, doi: <https://doi.org/10.1088/0031-9120/27/2/003>.
- [11] D. Hoekzema, G. Schooten, E. van den Berg, und P. Lijnse, „Conservation Laws, Symmetries, and Elementary Particles“, *Phys. Teach.*, Bd. 43, Nr. 5, S. 266–271, Apr. 2005, doi: <https://doi.org/10.1119/1.1903808>.
- [12] A. Bogner, B. Littig, und W. Menz, *Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2014. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-531-19416-5>.
- [13] V. Braun und V. Clarke, „Using thematic analysis in psychology“, *Qual. Res. Psychol.*, Bd. 3, Nr. 2, S. 77–101, 2006, doi: <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>.
- [14] M. Daniel, „Particles, Feynman diagrams and all that“, *Phys. Educ.*, Bd. 41, Nr. 2, S. 119–129, Feb. 2006, doi: <https://doi.org/10.1088/0031-9120/41/2/001>.
- [15] The Design-Based Research Collective, „Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry“, *Educ. Res.*, Bd. 32, Nr. 1, S. 5–8, Jan. 2003, doi: <https://doi.org/10.3102/0013189X032001005>.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert durch das Wolfgang-Gentner-Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF-Forschungsvorhaben 13E18CHA).