



Prof. Dr. Michael Kobel, Dresden;
Prof. Dr. Gesche Pospiech, Dresden



Liebe Leserinnen und Leser,

Elementarteilchen – ein Thema, das viele Menschen fasziniert. Die Fragen nach dem Woher und Wohin des Universums sowie nach den elementaren Bausteinen und Wechselwirkungen der Materie sind die Triebfeder für aufwendige Experimente, welche die internationale Zusammenarbeit Tausender Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erfordern. Die Erforschung der Elementarteilchen bedeutet, zum Allerkleinsten vorzudringen, zugleich Einblick in die Vergangenheit des Universums zu gewinnen sowie heutige Boten aus dem Weltall zu vermessen. Dabei zeigt sich, wie man neue Erkenntnisse durch Anwendung und Erweiterung grundlegender Prinzipien, wie dem Ladungsbegriff, gewinnen kann. Daraus entsteht eine elegante Theorie: das Standardmodell der Elementarteilchenphysik, das sich bis heute grandios bestätigt hat. Dennoch bleiben ungeklärte Fragen, welche die Elementarteilchenphysik zu einem dankbaren Thema machen, um die Neugier der Jugendlichen anzuregen und ihnen neue Welten zu eröffnen.

Dieses Heft ermöglicht Ihnen einen Einblick in die Welt der Elementarteilchen und liefert Ihnen dazu vielfältige Anregungen für den Unterricht.

Viel Spaß beim Lesen wünschen Ihnen

Michael Kobel *G. Pospiech*

Im Abo enthalten:
**Unterricht Physik
digital**

So erhalten Sie Zugang
zur digitalen Ausgabe:
[www.friedrich-verlag.de/
digital/](http://www.friedrich-verlag.de/digital/)

BASISARTIKEL

- Michael Kobel und Moritz Springer
Eine Reise zu fundamentalen Erkenntnissen 2
Theorie und Experimente der Teilchenphysik

- Gesche Pospiech
Teilchenphysik in der Schule 9
Ein fachdidaktischer Blick auf die Elementarteilchenphysik

- Michael Kobel und Moritz Springer
Glossar zur Teilchenphysik 14

DIDAKTISCHE IMPULSE

- Oliver Passon, Philipp Lindenau und Michael Kobel
Von Feynman-Diagrammen und Stromkreisen 16
Hinweise zu Feynman-Diagrammen und zu ihrer Behandlung im Unterricht

- Gesche Pospiech
Neutrinooszillationen 21
Aktuelle Impulse zur Anwendung der Quantenphysik im Unterricht

UNTERRICHTSPRAXIS

- Stephan Stein
Feldkonzept ade? 24
Unterrichtssequenz zur Teilchenphysik in der Sekundarstufe II

- Carolin Schwerdt, Felix Lehmann, Philipp Lindenau und Michael Walter
Cosmic@Web 28
Ein Online-Lernangebot zur Astroteilchenphysik

- Fabian Bernstein, Oliver Keller, Sascha Schmeling, Thomas Wilhelm und Julia Woithe
Ein LINAC zum Selberbauen 33
Modell eines elektrostatischen Linearbeschleunigers

- Marco Kirschner, Rebecca Liebschner und Floria Rehwald
Den Teilchen auf der Spur mit GeoGebra 36
Materialien zum schulischen Einsatz von Blasenkameraaufnahmen

- Philipp Lindenau und Otmar Winkler
Feynman-Rhombino 40
Ein spielerischer Umgang mit Feynman-Diagrammen

MAGAZIN

- Anna Donhauser
Stromkreis trifft Energiewende 44
Experimente zur Verknüpfung von Grundlagen der Elektrizitätslehre und photovoltaischer Energiekonversion

VERSUCHSKARTEI

- Patrik Vogt, Lutz Kasper (und Matthias Rädler)
Mündungskorrektur: experimentelle Untersuchung 49
– der Längenunabhängigkeit
– der Radiusabhängigkeit

- Julia Hiniborch
Eine Physikanten-Show im Buchformat 51

Kurzfassungen und Jahresregister unter:
<https://www.friedrich-verlag.de/physik/unterricht-physik/>



Alle Downloads zu dieser Ausgabe

Bitte geben Sie den Code XXXXXXXXXX
in das Suchfenster auf www.friedrich-verlag.de ein,
um alle Downloads dieser Ausgabe herunterzuladen.

Von Feynman-Diagrammen und Stromkreisen

Hinweise zu Feynman-Diagrammen und zu ihrer Behandlung im Unterricht

Ende der 1940er-Jahre entwickelte der amerikanische Physiker Richard P. Feynman (1918–1988, Nobelpreis 1965) eine grafische Symbolsprache, um bei komplexen störungstheoretischen Berechnungen in der Quantentheorie des elektromagnetischen Feldes (der sog. Quantenelektrodynamik, QED) nicht den Überblick zu verlieren. Diese Methode verbreitete sich rasch, wurde in Lehrbuchdarstellungen aufgenommen und auch auf andere Anwendungsfelder verallgemeinert [1].

In der Zwischenzeit sind diese „Feynman-Diagramme“ aus vielen Forschungsbereichen nicht mehr wegzudenken. Dies gilt auch und vor allem für die Elementarteilchenphysik. Ihre Funktion ist hier in der Regel nicht bloß illustrativ und intuitiv, sondern ein konkretes Werkzeug für die Berechnung von Prozesshäufigkeiten im Standardmodell. Jedes Element der Feynman-Diagramme übersetzt sich mithilfe der sog. Feynman-Regeln in einen mathematischen Ausdruck. So kann mithilfe der Diagramme in **Abbildung 1** berechnet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit und unter welchen Winkeln die Compton-

Streuung von Photonen an Elektronen erfolgt.

Populäre oder schuldidaktische Darstellungen der Teilchenphysik (und zuweilen auch die Fachliteratur) verwenden Feynman-Diagramme jedoch in einer anderen Absicht: Mit ihrer Hilfe scheint es möglich (oder doch wenigstens erleichtert), eine fachlich angemessene Darstellung der Teilchenphysik zu geben, die auf den abstrakten und mathematischen „Ballast“ der zugrunde liegenden Theorie verzichtet [2].

Aber eine (vorgeblich) intuitive und anschauliche visuelle Darstellung kann auch Fehlvorstellungen hervorrufen oder verstärken. Im Falle der Feynman-Diagramme weisen viele populäre oder didaktische Darstellungen darauf hin, dass der naheliegenden Interpretation der Linien im Feynman-Diagramm als Teilchenbahnen entgegengewirkt werden muss. Schließlich ist die Vorstellung von Teilchenbahnen bereits in der nicht-relativistischen Quantenmechanik unzulässig.

Viel seltener wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Vorstellung von „unscharfen“ oder „verschmierten“

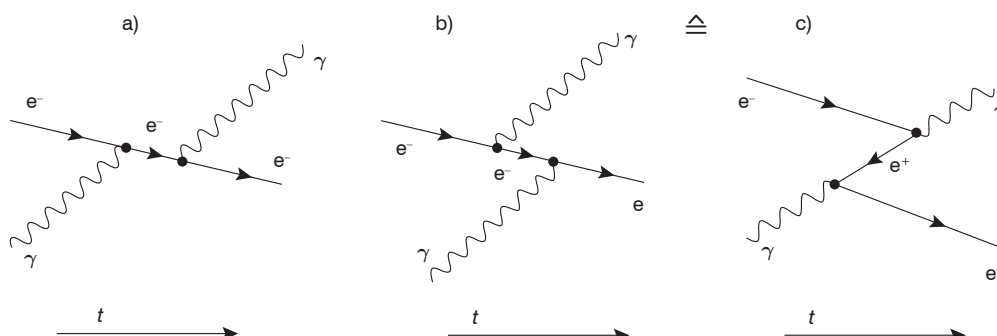
Teilchenbahnen ebenfalls unhaltbar ist. Tatsächlich stellen Feynman-Diagramme gar keine direkte Repräsentation eines physikalischen Prozesses dar, sondern symbolisieren lediglich mathematische Formeln.

Im Folgenden wird erläutert, welche fachlich korrekte Deutung Feynman-Diagramme besitzen und welche weiteren Missverständnisse bei ihrer Interpretation zu vermeiden sind. Abschließend werden die Elemente dieser Symbolsprache mit einem schulbekannten Beispiel verknüpft, nämlich der Notation von Stromkreisen mithilfe von Schaltplänen. Hier zeigt sich eine Analogie, die an Vorwissen anknüpft und im Schulunterricht genutzt werden kann.

Was bedeuten Feynman-Diagramme – und was nicht?

Konstruktion und Funktion von Feynman-Diagrammen

Elemente eines Feynman-Diagramms sind Linien und ihre Kreuzungspunkte (sog. Vertices). Details der Notation werden in **Kasten 1** kurz erläutert. Alle Diagramme können auf diese Weise



1 | Feynman-Diagramme für den Compton-Effekt, also die Streuung von Photonen an Elektronen. Die Zeit verläuft von links nach rechts (s. zur Erläuterung auch **Kasten 1**). Die Diagramme b) und c) stellen dabei denselben mathematischen Ausdruck dar und dürfen nur einmal berücksichtigt werden. Der Fachaussdruck dafür lautet „topologische Äquivalenz“.

Die Elemente eines Feynman-Diagramms

- Feynman-Diagramme bestehen aus Linien und ihren Schnittpunkten (sog. „Vertices“). Durchgezogene Linien symbolisieren Fermionen (also Materieteilchen), Wellenlinien symbolisieren das Photon, das W- oder das Z-Teilchen. Die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung (Gluonen) werden durch Spirallinien symbolisiert.
- Die sog. „inneren Linien“ beginnen und enden in einem Vertex. Diese Zustände entziehen sich grundsätzlich der Beobachtung und werden auch „virtuelle Zustände“ bzw. virtuelle Teilchen genannt. Die Linien der beobachtbaren Anfangs- und Endzustände haben ein freies Ende, das also nicht in einem Vertex endet bzw. beginnt. Um sie zu unterscheiden, wird eine Zeitrichtung ausgezeichnet.
- Zusätzlich haben die durchgezogenen Linien eine zeitliche Orientierung. Damit können Fermionen (Pfeil in Zeitrichtung) und Anti-Fermionen (Pfeil gegen die Zeitrichtung) unterschieden werden. Da z.B. Photonen ihre eigenen Anti-Teilchen sind, kann man bei ihnen auf eine Pfeilrichtung verzichten.
- Die Feynman-Regeln ordnen jedem Element der Diagramme einen mathematischen Ausdruck zu. Wir verzichten hier auf Details und erwähnen lediglich, dass für jeden Vertex ein Produkt aus dem Kopplungsparameter und der zur Wechselwirkung gehörigen Ladung als Faktor hinzukommt. Da dieses Produkt < 1 ist, werden mit wachsender Zahl an Vertices die numerischen Beiträge von Diagrammen immer kleiner. Außerdem muss an jedem Vertex die Energie-Impuls-Erhaltung erfüllt werden.
- Aus Vertices ergeben sich durch Umkappen von Linien wiederum erlaubte Vertices. Ist ein Vertex oder auch ein komplexeres Feynman-Diagramm bekannt, so kann durch Umkappen von Linien ein Diagramm erzeugt werden, das ebenfalls zulässig ist. Durch das Umkappen einer Linie kehrt sich automatisch die Pfeilrichtung um, das heißt, Teilchen und Antiteilchen werden vertauscht. Bei diesem Vorgang bleiben automatisch alle Erhaltungssätze der Ladungen erfüllt.

aus einer kleinen Zahl von Elementen (sog. „fundamentalen Vertices“) zusammengesetzt werden (s. Abb. 2).

Welche fundamentalen Vertices „erlaubt“ sind, entscheidet die zugrunde liegende Theorie. Innerhalb des Standardmodells der Teilchenphysik gibt es – wenn Materieteilchen beteiligt sind – nur Kreuzungspunkte von drei Linien. Immer „treffen“ sich dort zwei „Materieteilchen“ (Leptonen oder Quarks) und ein „Austausch-“ bzw. „Botenteilchen“ (Photon, Gluon oder W bzw. Z). Man sagt, diese Teilchen „koppeln“ aneinander.

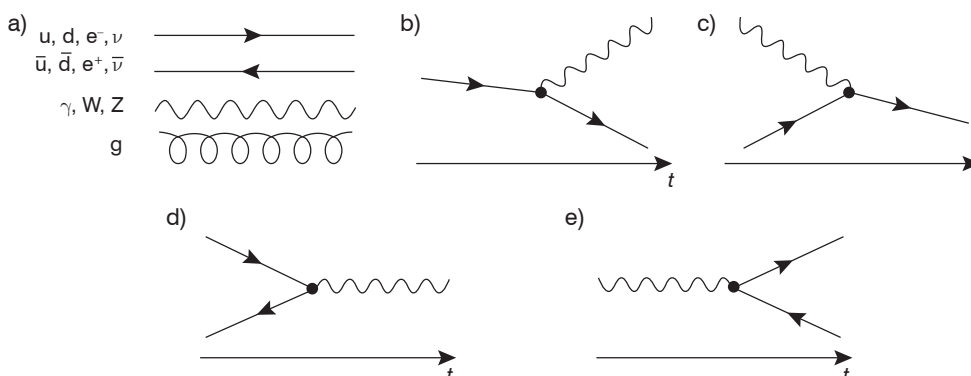
Aber es gilt eine weitere Einschränkung: Wie im Basisartikel „Eine Reise zu fundamentalen Erkenntnissen“

erläutert wird, ist der Ladungsbegriff von entscheidender Bedeutung. Nur Teilchen, die eine bestimmte Ladung (elektrisch, schwach oder stark) besitzen, können an das Austauschteilchen der entsprechenden Wechselwirkung koppeln. Während es also einen Vertex gibt, bei dem z.B. Quarks an ein Gluon koppeln, gibt es z.B. keinen Vertex, der Elektronen und Gluonen verknüpft, da Elektronen keine starke Ladung besitzen.

Es sind gerade auch diese einfachen Regeln für die Konstruktion der Feynman-Diagramme, die ihre Nützlichkeit und weite Verbreitung begründen. Mit ihrer Hilfe können sehr einfach und ohne mathematischen Aufwand Aussagen über mögliche

physikalische Prozesse getroffen werden. Die so gewonnenen Vorhersagen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik haben sich glänzend bestätigt und wir haben es hier mit einer der erfolgreichsten physikalischen Theorien zu tun.

Der Artikel „Feynman-Rhombino“ zeigt, wie die einfachen Konstruktionsvorschriften der Feynman-Diagramme im Unterricht eingesetzt werden können. Doch in welchem genauen Zusammenhang steht die Symbolsprache der Feynman-Diagramme mit dem tatsächlichen physikalischen Prozess? An dieser Stelle gilt es, verbreitete Missverständnisse und Verkürzungen in der populären Literatur aufzuklären.



2 | a) Linientypen von Feynman-Diagrammen; b) – e) fundamentale Vertices zwischen Materie- und Austauschteilchen

Feynman-Diagramme als Summanden einer Wahrscheinlichkeitsamplitude

Jedes Element der Feynman-Diagramme übersetzt sich in einen mathematischen Ausdruck. Die Ergebnisse werden dabei in der sog. „Störungstheorie“ gewonnen, einer Potenzreihe im Kopplungsparameter.¹⁾ Je nach angestrebter Genauigkeit werden als Näherungsausdruck zunächst alle Beiträge der niedrigsten Potenz („führende Ordnung“) und weiterer Potenzen („nächstführende Ordnung“, „übernächstführende Ordnung“ usw.) addiert. Die gesuchte Wahrscheinlichkeit, z. B. für den Wirkungsquerschnitt eines Streuprozesses, ergibt sich dann aus dem *Quadrat dieser Summe*.

Dieses scheinbar bloß technische Detail (das Quadrieren der Summe) ist von zentraler Bedeutung: Ein einzelnes Diagramm liefert lediglich einen Beitrag zur Wahrscheinlichkeitsamplitude, erst das *Quadrat der Summe* beschreibt den beobachtbaren Prozess. Auf diese Weise entstehen im Allgemeinen gemischte Terme – physikalisch gesprochen handelt es sich hierbei um Interferenzen.

Analogie: Doppelspalt-Experiment

Es ist instruktiv, die Situation mit der quantenmechanischen Behandlung der Interferenz von Elektronen am Doppelspalt zu vergleichen. Auch dort kann jedem Spalt eine Wahrscheinlichkeitsamplitude zugeordnet werden (Ψ_1 und Ψ_2) und das beobachtbare (Interferenz-)Muster ergibt sich aus dem Summenquadrat $|\Psi_1 + \Psi_2|^2$. In der Quantenmechanik ist die Beschreibung des Sachverhalts nun unstrittig: Das Elektron dringt nicht durch den einen oder anderen Spalt; in diesem

Sinne repräsentiert der einzelne Summand der Wahrscheinlichkeitsamplitude am Doppelspalt keinen physikalischen Prozess.

Aber genauso wie im Doppelspalt aus dem Interferenzmuster auf die Eigenschaften der Spalten (Breite und Abstand) zurückgeschlossen werden kann, kann auch in der Teilchenphysik aus einer Messung auf die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsamplituden geschlossen werden.

Beispiel: Paarerzeugung

Diesen etwas verwickelten und indirekten Zusammenhang zwischen Feynman-Diagrammen und dem „physikalischen Prozess“ wollen wir an einem konkreten Beispiel genauer erläutern, nämlich an der Erzeugung von Myonen-Paaren in der Elektron-Positron-Annihilation. Hier tragen in führender Ordnung genau zwei Diagramme bei (s. **Abb. 3**):

- die Paarerzeugung durch ein (virtuelles) Z-Teilchen und
- die Paarerzeugung durch ein (virtuelles) Photon (s. a. **Kasten 2** zu virtuellen Teilchen).

Auch hier ist die Frage, ob das eine oder andere passiert, nicht sinnvoll. Beobachtet wird das Quadrat der Summe beider Terme, die sich aus den einzelnen Diagrammen gemäß der Feynman-Regeln ergeben. Dies führt auf gemischte Terme (sprich: Interferenzeffekte), die sich tatsächlich in experimentellen Befunden zeigen.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler können dabei aus der Häufigkeit und Winkelverteilung der erzeugten Myonen die Eigenschaften des Photons und des Z-Teilchens (Massen, Lebensdauern, Kopplungen, Spin etc.) berechnen, obwohl man bei jedem erzeugten Myon-Paar gar nicht

sinnvoll fragen kann, ob es über ein Photon oder ein Z-Teilchen erzeugt wurde²⁾ – analog zum Doppelspalt.

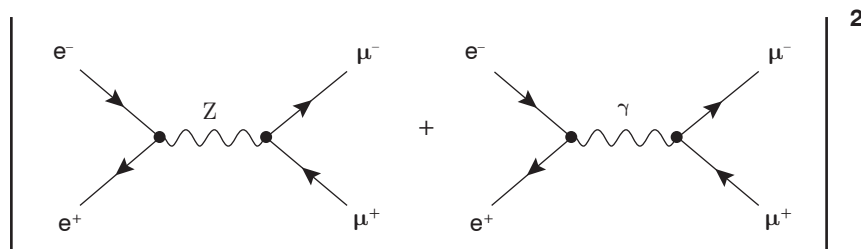
Die Aussage, dass Feynman-Diagramme keine physikalischen Prozesse repräsentieren, ist also in diesem Sinne zu verstehen. Zum einen beobachtet man Interferenzeffekte, die keinem einzelnen Feynman-Diagramm zugeordnet sind, zum anderen „geschieht kein einzelnes Diagramm – sie alle sind beteiligt“ ([3]; Übers. d. Red.). Aus diesem Grund ist es durchaus problematisch, Feynman-Diagramme als „Modelle“ eines physikalischen Prozesses aufzufassen.

Feynman-Diagramme sind keine Raum-Zeit-Darstellungen

Hat man verstanden, dass Feynman-Diagramme nur in einem indirekten Sinne mit dem physikalischen Prozess zusammenhängen (s. o.), ist damit auch schon geklärt, dass sie keine raum-zeitliche Beschreibung eines solchen Prozesses darstellen können.

Feynman-Diagramme besitzen zwar eine „Zeitachse“, die es erlaubt, zwischen Anfangs- und Endzustand zu unterscheiden, d. h., welche Teilchen vor und welche nach dem zu beschreibenden Prozess (z. B. einer Streuung) vorhanden sind. Eine Raumachse besitzen sie jedoch nicht. Damit wird auch deutlich, dass die Länge der Linien oder der Winkel zwischen ihnen keine Information trägt.

Aber selbst die zeitliche Ordnung *innerhalb* eines Diagramms ist nicht eindeutig. So scheinen die Diagramme in **Abbildung 1b** und **1c** verschiedene Sachverhalte darzustellen: In Diagramm **b**) wird (in naheliegender Lesart) „zunächst“ ein Photon abgestrahlt und erst „anschließend“ das einlaufende Photon absorbiert. In Diagramm **c**) hingegen kommt es zur Paarerzeugung von Elektron und Positron und das Positron annihiliert „anschließend“ mit dem einlaufenden Elektron zum Photon im Endzustand. Offensichtlich werden hier vorgeblich recht verschiedene „Geschichten“ über den mikrophysikalischen Prozess zwischen Anfangs- und Endzustand erzählt. Dabei handelt es sich bei den beiden Diagrammen um äquivalente Darstellungen, die physikalisch gar



3 | Die beiden Beiträge zur Wahrscheinlichkeitsamplitude in führender Ordnung der Störungstheorie für den Prozess $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Beobachtet wird aber lediglich das Quadrat der Summe, das Interferenzterme enthält.

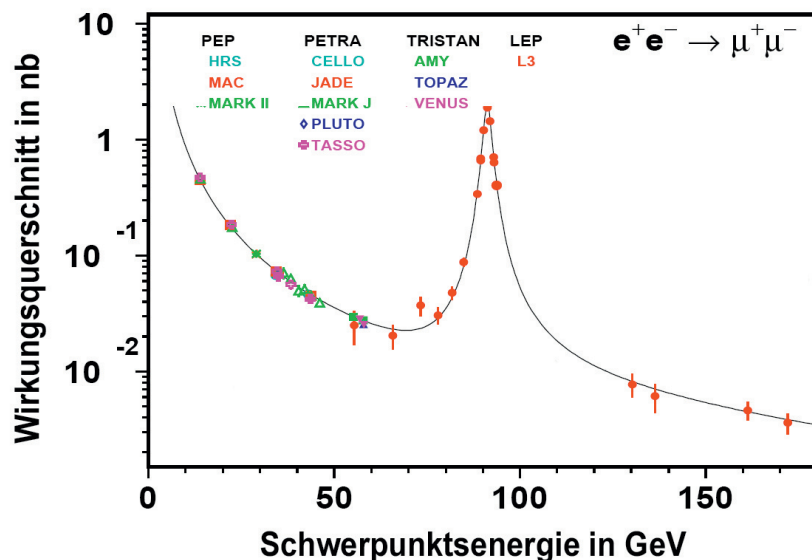
Virtuelle Teilchen

- Aus der Energie-Impuls-Erhaltung an jedem Vertex folgt, dass innere Linien (sog. „virtuelle Zustände“ oder „virtuelle Teilchen“) die für reelle Teilchen gültige Energie-Impuls-Beziehung i. Allg. nicht erfüllen können, denn ihre Energie und ihr Impuls werden oft unabhängig voneinander über externe Linien (Teilchen im Anfangs- und/oder Endzustand) festgelegt.
- Annullieren beispielsweise in **Abbildung 3** die beiden Teilchen im Anfangszustand mit entgegengesetzt gleichem Impuls, so tragen das virtuelle Z bzw. das virtuelle Photon die experimentell beliebig einstellbare Schwerpunktsenergie $E = E_{\text{SP}}$ und den Impuls $p = 0$. Dies erfüllt nur dann $E^2 = p^2 c^2 + (m c^2)^2$, wenn die Schwerpunktsenergie $E_{\text{SP}} = m c^2$ gerade die Ruheenergie des Z oder des Photons ist, beim Photon also nie, da $E_{\text{SP}} > 0$.
- Ein virtueller Zustand, bei dem die Größe $q^2 := E^2 - p^2 c^2$ vom Quadrat der Ruheenergie $m c^2$ des reellen Teilchens verschieden ist, kann mit einer erzwungenen Schwingung verglichen werden, bei der die Erregerfrequenz von der Eigenfrequenz abweicht. Je größer diese Differenz, desto geringer die Amplitude. Im Falle von Feynman-Diagrammen ändert sich entsprechend die resultierende

Wahrscheinlichkeitsamplitude. Dies erklärt z. B. die sehr lange Lebensdauer des Neutrons oder die extrem langsame Kernfusion in der Sonne, da für das virtuelle W-Teilchen bei der Umwandlung von Neutronen in Protonen nur ca. 1 MeV Energie zur Verfügung steht, 1/80 000 der nominalen Ruheenergie des W.

- Die Ähnlichkeit mit einer erzwungenen Schwingung ist kein Zufall, denn

die Phasenfrequenz der Wellenfunktion wird durch die Ruheenergie bestimmt, sodass sich genau dieselben mathematischen Ausdrücke ergeben. Im Wirkungsquerschnitt für $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ beobachtet man daher eine „Resonanz“ bei $E_{\text{SP}} = m_Z c^2$ für das Z und den Anstieg zu einer nie erreichbaren „Resonanz“ bei $E_{\text{SP}} = 0$ für das Photon (s. a. **Abb. 4**).



4 | Wirkungsquerschnitt als Maß für die Wahrscheinlichkeit des Prozesses $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ in Abhängigkeit von der Schwerpunktsenergie von Elektron und Positron. Deutlich sichtbar ist der vorübergehende und sprunghafte Anstieg (Resonanz), wenn die Schwerpunktsenergie der Ruheenergie des Z-Teilchens (91,2 GeV) entspricht.

nicht zu unterscheiden sind und auf denselben Beitrag zur Wahrscheinlichkeitsamplitude führen.

Teil der Feynman-Regeln ist es nämlich, dass lediglich die „topologische“ Struktur beachtet werden muss. Lassen sich Diagramme durch eine stetige Deformation ineinander überführen, spricht man von „topologisch äquivalenten“ Diagrammen.³⁾ Alle zueinander topologisch äquivalenten Diagramme bilden eine Äquivalenzklasse; von dieser darf bei der Berechnung jeweils nur ein Vertreter berücksichtigt werden.

Feynman-Diagramme erzählen also gar keine eindeutige „Geschich-

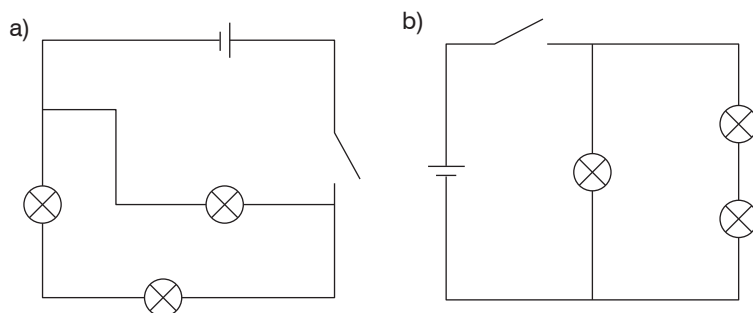
te“ davon, wie Anfangs- und Endzustände durch Emission und Absorption von Teilchen etc. ineinander überführt werden. Eigentlich darf dies auch niemanden verwundern, denn schließlich gilt bereits in der Quantenphysik, dass der Vorgang zwischen Präparation und Messung nicht raumzeitlich beschrieben werden kann

Feynman-Diagramme und Stromkreise

Wenn alle topologisch äquivalenten Diagramme denselben Beitrag zur Wahrscheinlichkeitsamplitude be-

schreiben, darf diese Symbolsprache nicht mehr mit einer anschaulichen (insb. mit einer raum-zeitlichen) Beschreibung von physikalischen Vorgängen verwechselt werden. Topologische Äquivalenz ist jedoch (der Sache, nicht dem Begriff nach) seit Jahrzehnten etablierter Teil der Mittelstufenphysik, nämlich bei der Darstellung von elektrischen Schaltungen mithilfe von Schaltplänen.

Zum Zeichnen von Schaltplänen existieren zwar etliche Konventionen, dennoch bleibt viel Freiheit für die Entwicklung einer eigenen „Handschrift“. So können viele verschiedene Schaltpläne korrekte Darstellungen



5 | Verschiedene, topologisch äquivalente Darstellungen desselben Stromkreises

derselben Schaltung sein. Die beiden Schaltpläne in **Abbildung 5** sind ein einfaches Beispiel für diese Form topologischer Äquivalenz.

Zu erkennen, dass hier gleichwertige symbolische Darstellungen vorliegen, ist ein wichtiges Lernziel in der Elektrizitätslehre. Voraussetzung für diese Abstraktionsleistung ist es, dass die Lernenden die relevanten Einflussgrößen identifizieren: Die Art und Relation der Komponenten untereinander ist wichtig – nicht z. B. ihre absolute Lage. Ebenso wenig, wie also ein Schaltplan verdeutlichen soll, der Strom würde im rechten Winkel abknicken, beschreiben Feynman-Diagramme konkrete raum-zeitliche, mikrophysikalische Abläufe.

Die Analogie lässt sich noch weiterentwickeln: Die verbreiteten Schülervorstellungen in der Elektrizitätslehre, die in [4] als „lokale“ bzw. „sequenzielle“ Argumentation bezeichnet werden, haben ihre Ursache gerade in der Missachtung der „topologischen Äquivalenz“. Ihnen kann man mit dem Hinweis begegnen, dass der Stromkreis als „System“ behandelt werden muss. Denn eine Spannungsquelle erzeugt ein elektrisches Feld, das alle Komponenten des Schaltkreises miteinander verknüpft. Die Schülervorstellungen leiten sich hingegen aus der fachlich inkorrekten Transportvorstellung des Stroms ab, die die Rolle des elektrischen Feldes unterschlägt [5]. Im gleichen Sinne darf ein Feynman-Diagramm nicht mit einem „Transport“ zusammengedacht werden. Sowohl der Schaltplan als auch die Symbolsprache der Feynman-Diagramme beschreiben stationäre, also nicht explizit zeitabhängige Vorgänge.

Grenzen der Analogie

Im Gegensatz zu Feynman-Diagrammen handelt es sich allerdings bei Schaltplänen um räumliche Darstellungen des Sachverhalts. Das Merkmal der Superposition von quantenmechanischen Zuständen und die daraus resultierenden Interferenzen haben in der Symbolsprache der Schaltpläne ebenfalls keine naheliegenden Entsprechungen.

Fazit

Feynman-Diagramme sind in vielen Bereichen der Forschung zu einem unverzichtbaren Werkzeug geworden. Auf übersichtliche Weise erlauben sie es zu beurteilen, ob bestimmte „Prozesse“ (genauer: Amplituden) überhaupt beitragen. In vielen Fällen genügen bereits wenige Terme der Störungsreihe (d. h., eine kleine Anzahl zugehöriger Diagramme), um mit ausreichender Genauigkeit Vorhersagen zu gewinnen. Zudem konnte – analog zum Doppelspalt – mit Messungen auf Eigenschaften von Teilchen geschlossen werden, obwohl diese noch gar nicht entdeckt waren. Es reichte nämlich aus, dass sie als „virtuelle Zustände“ in Feynman-Diagrammen auftraten, deren Amplituden berücksichtigt werden mussten.

Der große Erfolg der Feynman-Diagramme verdankt sich aber sicherlich auch ihrer visuellen Natur, die zu einer anschaulichen Interpretation einlädt [1]. Dabei beschreiben sie nicht unmittelbar einen physikalischen Prozess, sondern repräsentieren lediglich Terme einer störungstheoretischen Reihenentwicklung. Insbesondere stellen sie keine raum-zeitliche

Beschreibung des mikrophysikalischen Vorgangs dar. Entsprechende Fehler und Ungenauigkeiten in populären Darstellungen zu Feynman-Diagrammen aufzuspüren, könnte eine motivierende Aufgabe für Schülerinnen und Schüler darstellen.

Superposition, Interferenz und die Unmöglichkeit einer raum-zeitlichen Beschreibung zwischen Präparation und Messung gelten bereits in der Quantenphysik. In diesem Sinne bietet die Behandlung von Feynman-Diagrammen die Möglichkeit einer Anwendung und Vertiefung des im Unterricht zur Quantenmechanik Gelernten.

Anmerkungen

- 1) Im Falle der Quantenelektrodynamik ist dies gerade die Feinstrukturkonstante $\alpha_{\text{em}} \approx 1/137$.
- 2) Je nach Schwerpunktsenergie der Annihilation ist es allerdings möglich, dass einer der Summanden den allergrößten numerischen Anteil der Gesamtsumme trägt. Wählt man die Schwerpunktsenergie gleich der Ruhenergie des Z-Teilchens (91,2 GeV), so dominiert das Diagramm mit virtuellem Z-Teilchen, bei deutlich niedrigeren Schwerpunktsenergien dominiert das Photon-Diagramm und bei höheren Energien sind alle drei Summanden numerisch relevant.
- 3) Im Beispiel in **Abbildung 1** muss man lediglich die innere Linie in Diagramm b) gegen die Zeitachse „knicken“ bzw. den linken Vertex in Zeitrichtung verschieben. Auf diese Weise wird aus der Elektron-Linie eine Positron-Linie und man erhält die Darstellung c). Das Diagramm a) ist hingegen nicht (topologisch) äquivalent zu b) und c). Die Compton-Streuung berechnet sich in führender Ordnung also aus dem Quadrat der Summe von a) und b) oder a) und c).

Literatur

- [1] Kaiser, D.: *Drawing Theories Apart*. Chicago: The University of Chicago press, 2005.
- [2] Passon, O.; Zügge, T.; Grebe-Ellis, J.: Pitfalls in the teaching of particle physics. In: *Physics Education* 54 (2019), Nr. 1, 015014 (S. 17 ff.).
- [3] Allday, J.: The nature of force in particle physics. In: *Physics Education* 32 (1997), S. 327–332.
- [4] von Rhöneck, C.: Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis. In: *NiU Physik/Chemie* 34 (1986), Nr. 13, S. 10–14. Nachgedruckt in: Müller, R. et al. (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis, 2004.
- [5] Müller, R.: Was ist Spannung? In: *PdN Physik in der Schule* 61 (2012), Nr. 5, S. 5–16.