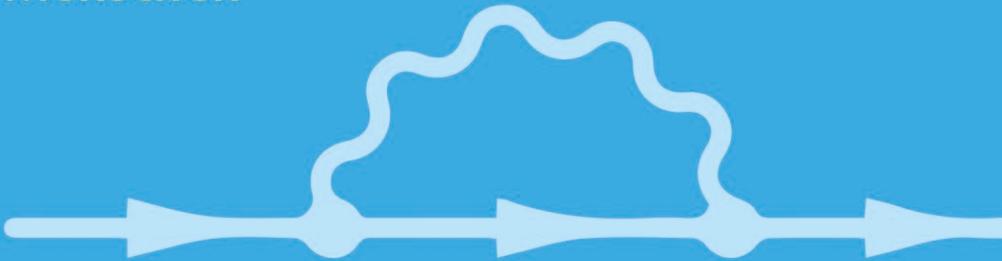


Jörg Resag

Feynman und die Physik

Leben und Forschung
eines außergewöhnlichen
Menschen



 Springer

Feynman und die Physik

Jörg Resag

Feynman und die Physik

Leben und Forschung eines
außergewöhnlichen Menschen

 Springer

Jörg Resag
Leverkusen
Deutschland

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

ISBN 978-3-662-54796-0 ISBN 978-3-662-54797-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-54797-7>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2018

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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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

Planung: Lisa Edelhäuser

Einband: deblik, Berlin, unter Verwendung eines Bildes von © CERN/SCIENCE PHOTO LIBRARY

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

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

Vorwort

Wenn man Menschen nach den bedeutendsten Physikern der Neuzeit fragt, so dürfte man einige Namen immer wieder hören. Albert Einstein wird sicher dabei sein, ebenso wie Isaac Newton oder Galileo Galilei. Auch Stephen Hawking werden viele kennen, beispielsweise durch seinen Bestseller „Eine kurze Geschichte der Zeit“ oder durch die Fernsehserie „The Big Bang Theory“. Wo aber steht Richard Feynman, um den es in diesem Buch gehen wird?

Zur Jahrtausendwende hat das bekannte Physikportal Physics World der britischen physikalischen Gesellschaft „Institute of Physics“ (<http://physics-world.com/>) die folgende Top-Ten-Liste der zehn besten Physiker aller Zeiten aufgestellt¹:

1. Albert Einstein	Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie
2. Isaac Newton	Grundgesetze der Mechanik, Gravitationsgesetz
3. James Clerk Maxwell	Grundgesetze der Elektrodynamik
4. Niels Bohr	Quantenmechanik, Atommodell
5. Werner Heisenberg	Quantenmechanik, Unschärferelation
6. Galileo Galilei	Trägheitsgesetz, Fallgesetze, Fernrohr
7. Richard Feynman	Quantenelektrodynamik, Feynman-Diagramme
8. Paul Dirac	Quantenmechanik, Dirac-Gleichung
9. Erwin Schrödinger	Quantenmechanik, Schrödinger-Gleichung
10. Ernest Rutherford	Atommodell, Streuversuch

¹ siehe z. B. CERN Courier vom 26. Januar 2000, <http://cerncourier.com/cws/article/cern/28153>

Auch andere Namen wie beispielsweise Enrico Fermi, Max Planck oder Michael Faraday hätten hier durchaus einen Platz verdient gehabt, und über die Reihenfolge lässt sich sicher ebenfalls streiten. Stephen Hawking taucht in der Liste nicht auf – es ist wohl einfach noch zu früh, um seinen Beitrag zur Physik richtig einschätzen zu können.

Dass Albert Einstein an der Spitze steht, dürfte die meisten Menschen wohl kaum überraschen. Er prägte zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts die Physik wie kaum ein anderer, indem er unsere Ansichten über das Wesen von Raum und Zeit revolutionierte und ihre tiefe Verbindung zur Gravitation offenlegte. Seine Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie bilden einen der beiden Grundpfeiler der modernen Physik.

Ebenso ist die Spitzenstellung von Isaac Newton und James Clerk Maxwell klar. Sie haben die Grundgesetze der Mechanik und Gravitation bzw. des elektromagnetischen Feldes formuliert und damit die Grundlagen gelegt, auf denen die gesamte klassische Physik basiert.

Andere Namen sind eng mit der Entwicklung der Quantenmechanik verbunden, die in den 1920er Jahren unser physikalisches Weltbild erschütterte und dies bis heute tut. Die Quantenmechanik ist der andere Grundpfeiler der modernen Physik – beide Säulen werden uns an vielen Stellen in diesem Buch begegnen.

Den jüngsten Physiker in dieser Liste finden wir auf Platz sieben (Abb. 1). Es ist Richard Feynman! Diese Platzierung ist sicher ein Traumergebnis, wenn man sich mit Genies wie Einstein, Newton oder Maxwell messen muss.

Richard Feynman (Abb. 2) war eine der eindrucksvollsten und bekanntesten Persönlichkeit der Physik im mittleren und späten zwanzigsten Jahrhundert. Das lag zum einen an seinen herausragenden physikalischen

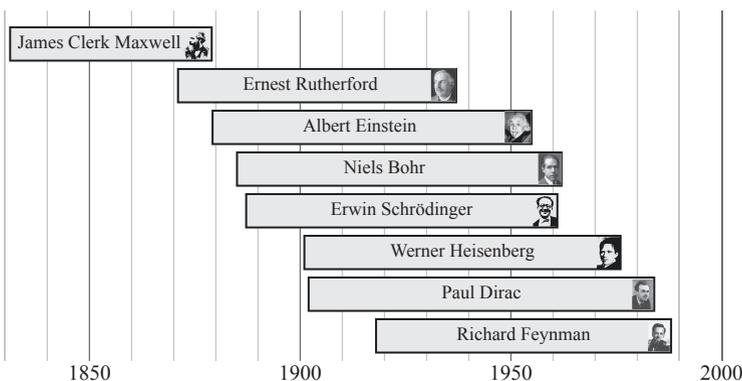


Abb. 1 Lebenszeiten der bekanntesten Physiker ab dem Jahr 1830



Abb. 2 Richard Feynman im Jahr 1984 © Tamiko Thiel, CC-BY-SA 3.0 Unported

Leistungen, um die es in diesem Buch immer wieder gehen wird. Feynman gehörte zur ersten Generation junger Physiker, die bereits im Studium mit den Erkenntnissen der noch jungen Quantenmechanik vertraut gemacht wurden. So vorbereitet gelang es ihm und einigen seiner Kollegen später, die enormen Schwierigkeiten zu überwinden, die sich bei der Vereinigung von Einsteins Spezieller Relativitätstheorie mit den Prinzipien der Quantenmechanik auftraten. Während sich seine Kollegen dabei meist auf abstrakte mathematische Formalismen verließen, vertraute Feynman auf einen eher intuitiven Ansatz, der typisch für ihn war. Ausgehend von seiner anschaulichen Vorstellung über das Quantenverhalten von Teilchen erschuf er eine vollkommen neue Formulierung der Quantentheorie, die heute zum Standardwerkzeug in der relativistischen Quantentheorie geworden ist: Pfadintegrale und Feynman-Diagramme. Für diese Leistung erhielt er im Jahr 1965 zusammen mit Julian Schwinger und Shin'ichirō Tomonaga den Physik-Nobelpreis.

Doch Feynman gab sich damit nicht zufrieden. Er war an vielen Aspekten der Physik interessiert und ließ sich nur ungern auf ein einziges Spezialgebiet festlegen. Mit seiner physikalischen Intuition, seinen mathematischen Fähigkeiten und seinem tiefen Verständnis der Quantentheorie gelang es ihm, auch in anderen Bereichen der Physik Wegweisendes zu leisten, beispielsweise in der Physik sehr tiefer Temperaturen (Supraleitung und Supraflüssigkeit). Bei der sogenannten schwachen Wechselwirkung, die unter anderem den radioaktiven Betazerfall von Atomkernen auslöst, erklärten er und andere, wie dabei die Spiegelsymmetrie der Natur verletzt wird – die Natur unterscheidet tatsächlich grundlegend zwischen rechts und links! In der Teilchenphysik zeigte er, wie sich die Streudaten von hochenergetischen Elektronen an Protonen dadurch erklären ließen, dass die Elektronen von kleinen Bausteinen innerhalb des Protons (Partonen bzw. Quarks) aus ihrer Bahn geworfen werden.

Feynman interessierte sich zeitlebens sehr für Computer und die physikalischen Grundlagen des Rechnens, wobei er später auch die Quantenmechanik mit einbezog. Mittlerweile haben sich Quantencomputer zu einem sehr aktiven Forschungsgebiet gemausert. Er war auch einer der Ersten, die sich mit einer Quantenbeschreibung der Gravitation befassten, also einer Quantisierung von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Noch heute gilt dies als das wohl größte ungelöste Problem der Physik. Heerscharen von Physikern mühen sich daran ab, beispielsweise im Rahmen der Stringtheorie oder der Loop-Quantengravitation oder als Experimentatoren an Großgeräten wie dem LHC am CERN in Genf.

Doch Feynman war nicht nur ein großer Physiker. Ein großer Teil seiner Bekanntheit und Beliebtheit geht sicher auf seinen außergewöhnlichen Charakter zurück. Er war ein unkonventioneller, lebensfroher Mensch – eher der künstlerische Freidenkertyp als der klassische, etwas angestaubte Universitätsprofessor, wie man ihn sich häufig vorstellt. Neben seiner Leidenschaft für die Physik besuchte er gerne Strip-Clubs, spielte Bongos und entdeckte in späteren Jahren auch seine Liebe zum Zeichnen und Malen. Anders als manche seiner Kollegen hatte er keinerlei Interesse an irgendwelchen Insignien der Macht, deren pompöse Zurschaustellung ihm zuwider war. Außerdem liebte er es, den Dingen auf den Grund zu gehen und so lange an einem Problem zu tüfteln, bis er die Lösung gefunden hatte. Dabei hatte er kein Problem damit, eigene Fehler einzugestehen, und er hasste es, wenn andere aus Eitelkeit oder Starrsinn dazu nicht bereit waren. Sein Leitspruch war: „Der oberste Grundsatz ist, dass man sich nichts vormachen darf – und sich selbst kann man am leichtesten etwas vormachen.“²

Feynman war ein charismatischer Redner und hatte ein Gespür für Dramaturgie, mit der er seine Zuhörer fesseln und begeistern konnte. Mit seiner humorvollen und leidenschaftlichen Art zog er sein Publikum in seinen Bann, sodass man am Schluss das Gefühl hatte, etwas Wichtiges verstanden zu haben – auch wenn man sich nicht immer daran erinnern konnte, was genau das gewesen war.

Im Internet kann man viele Videos finden, die Feynman in Aktion zeigen, sodass sich auch heute noch jeder ein Bild von seinem mitreißenden Vortragsstil machen kann. So hat Bill Gates, bekannt als Gründer von Microsoft, die BBC-Videos von sieben Vorlesungen Feynmans erworben und sie im Internet unter <http://research.microsoft.com/apps/tools/tuva/> für jeden frei zugänglich gemacht. Feynman hatte die Vorlesungen 1964 unter

² “The first principle is that you must not fool yourself – and you are the easiest person to fool”, aus Feynman: *Surely You're Joking, Mr. Feynman!*

dem Titel *The Character of Physical Law* in seinen *Messenger Lectures* an der Cornell-Universität gehalten. Schauen sie da unbedingt einmal rein – die Vorlesungen sind ein wahrer Genuss!

Viele der Vorlesungen Feynmans wurden auch mitgeschrieben und in Buchform veröffentlicht. Noch heute sind seine *Feynman Lectures on Physics* (*Feynman-Vorlesungen über Physik*) aus den Jahren 1961–1963 eine Fundgrube für jeden Physikstudenten und -dozenten. Feynmans tiefe Begeisterung für die Physik kommt darin besonders gut zum Vorschein. Er denkt alle Aspekte der Physik auf seine ihm eigene erfrischende Art und Weise neu durch, wobei manche Einsicht zutage tritt, die man in anderen physikalischen Standardwerken vergeblich sucht. Kein Wunder, dass die *Feynman Lectures* auch nach mehr als einem halben Jahrhundert immer noch unvermindert gedruckt und gekauft werden, was kaum ein anderes Lehrbuch der Physik von sich behaupten kann.

Feynmans Persönlichkeit prädestinierte ihn für eine Aufgabe, die er in seinen letzten Lebensjahren trotz seiner fortschreitenden Krebserkrankung mit viel Energie anging und die ihn in der breiteren Öffentlichkeit bekannt machte: Die Mitarbeit in der Untersuchungskommission zur Explosionskatastrophe, bei der im Januar 1986 alle sieben Besatzungsmitglieder des Spaceshuttles Challenger kurz nach dem Start ums Leben kamen. Anders als manche seiner Kommissionskollegen, die ihre Zeit eher in Meetings verbrachten, ging er direkt zu den Technikern und Ingenieuren der NASA und stieß bald auf die Ursache der Explosion: ein Gummidichtungsring, der bei dem frostigen Wetter am Starttag seine Flexibilität verloren hatte, sodass heißes Gas austreten konnte. Unvergessen sind die Bilder, in denen Feynman vor laufenden Kameras einen solchen Dichtungsring in ein Glas Eiswasser tauchte und so für alle sichtbar machte, wo das Problem lag.

Über das Leben von Richard Feynman und die unzähligen Anekdoten, die sich um seine Person ranken, sind bereits mehrere Bücher geschrieben worden – einige davon hat er sogar selbst verfasst. Das vorliegende Buch soll daher keine weitere umfassende Feynman-Biografie sein. Natürlich spielt der Lebensweg von Feynman auch in diesem Buch eine Rolle und dient als Leitfaden. Im Mittelpunkt soll jedoch das stehen, was Feynman selbst so sehr liebte: die Physik!

Wir wollen versuchen zu verstehen, was Feynman daran so faszinierte und welche Ideen er selbst und seine Kollegen dazu beisteuerten. Dabei werden wir uns intensiv mit einer tragenden Säule der modernen Physik beschäftigen, von der Feynman aus gutem Grund sagt, dass niemand sie wirklich verstehe: die Quantenmechanik. Das bedeutet nicht, dass wir keine präzise Theorie darüber hätten, wie die Quantenmechanik funktioniert – Feynman selbst hat

dazu wichtige Beiträge geleistet. Es bedeutet vielmehr, dass niemand weiß, warum sie ausgerechnet so funktioniert und dabei unsere Begriffswelt auf so eine harte Probe stellt. „But how can it be like that?“ fragt Feynman in seinen *Messenger Lectures* 1964 und illustriert damit den vergeblichen Versuch, die Quantenmechanik mit den uns vertrauten Begriffen zu erfassen. Natürlich kann auch das vorliegende Buch dieses Problem nicht lösen, aber immerhin können wir versuchen zu verstehen, wie die Quantenmechanik tickt und was daran so merkwürdig ist.

Wir wollen Feynmans Weg durch die Physik folgen und sehen, wie er Quantenmechanik und Relativitätstheorie miteinander verband, wie er Antiteilchen, die schwache Wechselwirkung oder eiskaltes supraflüssiges Helium damit beschrieb und wie er über Nanotechnik und Zukunftscomputer nachdachte. Dabei werden wir einer Vielzahl von Themen begegnen, die fundamental für unser heutiges Verständnis der Naturgesetze sind, und so eine Menge über das moderne Weltbild der Physik lernen. Auf mathematische Formeln werden wir dabei fast völlig verzichten – manchmal sind sie in separate Kästen ausgelagert und können übersprungen werden, ohne dass das Gesamtverständnis darunter leidet. Andererseits bieten diese Kästen dem interessierten Leser die Möglichkeit, an der einen oder anderen Stelle auch etwas tiefer in die Thematik einzutauchen.

Feynman wäre im Jahr 2018 einhundert Jahre alt geworden, wenn ihn seine Krankheit nicht schon dreißig Jahre zuvor aus dem Leben gerissen hätte. Ich hoffe, dass es mir ihm zu Ehren mit diesem Buch gelingt, etwas von der Faszination zu vermitteln, die er beim Umgang mit der Physik empfand und die in den folgenden Worten seiner *Messenger Lectures* 1964 zum Ausdruck kommt:

„Our imagination is stretched to the utmost, not, as in fiction, to imagine things which are not really there, but just to comprehend those things which are there. (Unsere Vorstellungskraft wird auf das Äußerste strapaziert, aber nicht, um uns wie in Geschichten Dinge vorzustellen, die nicht wirklich da sind, sondern lediglich um die Dinge zu begreifen, die da sind.)“

Sehr herzlich möchte ich an dieser Stelle Lisa Edelhäuser vom Springer Spektrum Verlag danken. Von ihr stammt die Initiative, das Leben und die Physik Richard Feynmans zu seinem einhundertsten Geburtstag noch einmal in neuer Form als Buch herauszubringen. Immer wieder hat sie das Manuskript Seite für Seite durchgearbeitet, auseinandergenommen und mit ihren vielen konstruktiven Vorschlägen entscheidend zum Gelingen dieses aufwendigen Projekts beigetragen. Bettina Saglio von Springer Spektrum hat

das fertige Manuskript bis zum Druck begleitet und so manche schöne Grafik für das Buch entdeckt. Herzlichen Dank auch an Matthias Delbrück, der das fast fertige Manuskript noch einmal sorgfältig unter die Lupe genommen und viele Verbesserungsvorschläge eingebracht hat. Und schließlich möchte ich meiner Frau Karen und meinen Söhnen Kevin, Tim und Jan für ihre Unterstützung und ihre Geduld danken, wenn das Buchprojekt wieder einmal viel mehr von meiner Zeit in Anspruch nahm als geplant.

Leverkusen, Juni 2017

Jörg Resag

Inhaltsverzeichnis

1	Jugendjahre und das Prinzip der kleinsten Wirkung	1
1.1	Kindheit, Highschool und MIT	4
1.2	Licht spart Zeit: das Fermatsche Prinzip	27
1.3	Mechanik mal ganz anders: das Prinzip der kleinsten Wirkung	37
2	Princeton, Pfadintegrale und das Manhattan-Projekt	47
2.1	Feynman in Princeton	47
2.2	Elektrodynamik ohne Felder	52
2.3	Die Wirkung in der Quantenmechanik	71
2.4	Radioaktivität und Manhattan-Projekt	80
3	Feynmans Pfad zur Quantenelektrodynamik	101
3.1	Wechsel an die Cornell-Universität	101
3.2	Das Meisterstück: Feynman-Diagramme und Antiteilchen	114
3.3	Lamb-Shift, magnetisches Moment und Renormierung	133
3.4	Schwinger, Tomonaga und Dyson	150
4	Kalifornien, eiskaltes Helium und die schwache Wechselwirkung	163
4.1	Brasilien und der Wechsel ans Caltech	163
4.2	Physik bei tiefen Temperaturen	173
4.3	Rechts und links: die Verletzung der Spiegelsymmetrie	195

5	Vom Forscher zum Lehrer und Nobelpreisträger	219
5.1	Heirat, Familie und der Nobelpreis	220
5.2	Nanotechnologie: Da unten ist eine Menge Platz	224
5.3	Die <i>Feynman Lectures</i>	235
5.4	Gravitation und Quantentheorie	252
6	Quarks, Computer und das Challenger-Unglück	267
6.1	Symmetrien und Quarks	268
6.2	Computer	286
6.3	Die letzten Jahre und das Challenger-Unglück	308
6.4	Feynmans Erbe	321
	Glossar	327
	Quellen und Literatur	339

1

Jugendjahre und das Prinzip der kleinsten Wirkung

Es waren unruhige Zeiten, als Richard Phillips Feynman am 11. Mai 1918 in New York das Licht der Welt erblickte. In Europa tobte noch immer der erste Weltkrieg und kostete unzählige Menschen das Leben. Die USA waren etwa ein Jahr zuvor (im April 1917) in den Krieg eingetreten, was letztlich den Sieg über Deutschland herbeiführen sollte, doch es würde noch bis in den November 1918 hinein dauern, ehe der Krieg beendet werden konnte. Glücklicherweise war Feynmans Familie vom Krieg nicht direkt betroffen.

Auch in der Physik war das frühe zwanzigste Jahrhundert eine ereignisreiche Zeit. Albert Einstein ([Abb. 1.1](#)) hatte im Jahr 1905 seine Spezielle Relativitätstheorie formuliert und damit unser Verständnis von Raum und Zeit grundlegend verändert. Zehn Jahre später (im Jahr 1915) gelang es ihm, in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie zu zeigen, dass die Gravitation auf der Krümmung von Raum und Zeit beruht. Sogar Licht würde dieser Krümmung unterworfen sein und durch die Gravitation von seiner geradlinigen Bahn abgelenkt werden, sagte er voraus. Als im Mai 1919 bei einer totalen Sonnenfinsternis nachgewiesen werden konnte, dass das Licht eines Sterns durch das Gravitationsfeld der Sonne tatsächlich abgelenkt wurde, war Einstein über Nacht ein berühmter Mann. Feynman war zu dieser Zeit gerade ein Jahr alt geworden.

Einsteins Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie waren nicht die einzigen Meilensteine zu jener Zeit. Erste Ergebnisse deuteten eine weitere Revolution in der Physik an, die erst mehrere Jahre nach Feynmans Geburt ihre volle Wucht entfaltete und die zur Grundlage für Feynmans eigene



Abb. 1.1 Albert Einstein (1879–1955) im Jahr 1921. (Aus: The Scientific Monthly 12:5, -S. 483; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_photo_1921.jpg)

Arbeiten werden würde: Die Quantenmechanik. Ihr wichtigster Vorbote war eine Entdeckung des deutschen Physikers Max Planck (Abb. 1.2) aus dem Jahr 1900: Atome können Licht nur in bestimmten Energiepaketen (Quanten) abgeben oder aufnehmen. Ausgerechnet in Feynmans Geburtsjahr 1918 erhielt Planck dafür den Physik-Nobelpreis, was für einen Deutschen angesichts der Eroberungspolitik des Kaiserreichs während des Kriegs sicher nicht selbstverständlich war.

Planck selbst hielt die Energiequanten eher für mathematische Rechengrößen bei Emissions- und Absorptionsprozessen, denen selbst keine physikalische Realität zukam. Doch Albert Einstein erkannte bereits 1905, dass diese abstrakten Quanten ganz reale Teilchen des Lichts sein mussten, denen man später den Namen *Photonen* gab. Nur so ließ sich beispielsweise erklären, wie Licht beim sogenannten Photoeffekt einzelne Elektronen aus Metalloberflächen herausschlagen konnte: die Photonen stoßen sie regelrecht aus dem Metall hinaus.

Die Erkenntnis lautet also: Licht besteht aus Teilchen, kann aber dennoch in vielen Fällen erfolgreich als Welle beschrieben werden. Man ahnt schon,



Abb. 1.2 Max Planck (1858–1947). (© akg images/picture alliance)

auf welche scheinbaren Widersprüche wir uns hier gefasst machen müssen! Einstein erhielt für seine Photonen-Hypothese im Jahr 1921 – also drei Jahre nach Max Planck – den Physik-Nobelpreis. Interessanterweise erhielt er den Nobelpreis nicht für seine Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie, die ihn letztlich berühmt gemacht hatten – dem Nobelpreiskomitee schienen diese revolutionären Theorien damals noch nicht ausreichend belegt zu sein.

Dies war also die Welt, in die Richard Feynman vor rund einem Jahrhundert hineingeboren wurde und in der er aufwuchs. Feynman hatte eine schöne Kindheit, in der sein Vater schon früh eine tiefe Begeisterung für die Naturwissenschaften in ihm weckte. Da überrascht es nicht, dass Feynman schließlich Physik am renommierten MIT (Massachusetts Institute of Technology) bei Boston studierte. Dabei begegneten ihm zwei physikalische Prinzipien, die deutlich älter als Relativitätstheorie und Quantenmechanik sind: Das Fermatsche Prinzip und das Prinzip der kleinsten Wirkung. Beide Prinzipien sind eng miteinander verwandt und übten auf Feynman eine große Faszination aus. Sie sollten später zur Grundlage seiner neuen Sichtweise der Quantenmechanik werden.

1.1 Kindheit, Highschool und MIT

Richard Feynman wurde am 11. Mai 1918 in Far Rockaway geboren, einem kleinen Ort, der zum New Yorker Stadtbezirk Queens gehört und an der Südspitze von Long Island nahe am Meer liegt. Hier verlebte er den größten Teil seiner Kindheit und Jugend, was ihm seinen typischen New-Yorker Akzent einbrachte. Seine befreundeten Physiker-Kollegen Wolfgang Pauli und Hans Bethe drückten es später einmal so aus: „Feynman spoke like a bum“ (in etwa: Feynman sprach wie ein Landstreicher, siehe Sykes (1994): *No ordinary genius: the illustrated Richard Feynman*).

Feynmans Eltern Melville und Lucille waren beide jüdischer Herkunft, ihre Familien stammten aus dem Osten Europas. Melvilles Eltern kamen aus Litauen und hatten in Minsk (Weißrussland) gelebt, bevor sie 1895 in die USA emigrierten – Melville war damals erst fünf Jahre alt. Lucille wurde genau in diesem Jahr in den USA geboren. Ihre Eltern waren schon als kleine Kinder aus Polen in die USA gekommen und hatten es dort zu einem gewissen Wohlstand gebracht, sodass sie ein großes Haus im damals noch ländlichen Far Rockaway erwerben konnten.

Dieses Haus war für viele Jahre auch die Heimat von Melville, Lucille und ihrem kleinen Richard. Sie teilten es sich aus finanziellen Gründen mit Lucilles Schwester Pearl und deren Familie. So konnte Feynman zusammen mit seinem älteren Cousin Robert und seiner jüngeren Cousine Frances aufwachsen, denn ein Geschwisterkind ließ lange Zeit auf sich warten. Zwar gebar Lucille einen weiteren Sohn, als Richard fünf Jahre alt war, doch dieser starb nach nur einem Monat. Es dauerte weitere vier Jahre, ehe Richards kleine Schwester Joan am 31. März 1927 das Licht der Welt erblickte. Trotz des großen Altersunterschieds von neun Jahren entwickelte sich im Lauf der Zeit eine enge Verbundenheit zwischen den beiden Geschwistern.

Über Feynmans Mutter Lucille und dem Verhältnis zu ihrem Sohn ist nicht allzu viel bekannt. Sie muss eine sehr humorvolle und herzliche Frau gewesen sein, die gerne Geschichten erzählte, was auch auf Feynman abfärbte. So sagte er einmal, von seiner Mutter habe er gelernt, dass die höchste Form der Erkenntnis Lachen und Mitgefühl sind. Als Feynman bereits ein berühmter Nobelpreisträger war und im Jahr 1979 vom Omni-Magazin zum *world's smartest man* gekürt wurde, soll sie trocken gesagt haben: „If that's the world's smartest man, God help us“ (Wenn das der schlaueste Mann der Welt sein soll, dann helfe uns Gott). Mit den Naturwissenschaften konnte sie allerdings nicht allzu viel anfangen.

Feynmans Vater Melville und die Liebe zur Naturwissenschaft

Das war bei Feynmans Vater Melville anders. Er liebte die Naturwissenschaften, hatte aber selbst nie die finanziellen Möglichkeiten, ein entsprechendes Studium aufzunehmen. Diese Chance wollte er seinem Sohn um jeden Preis ermöglichen, und so tat er alles, um in ihm schon in frühen Jahren ein Interesse für die Geheimnisse der Natur zu wecken und ihn an kritisches wissenschaftliches Denken heranzuführen. So kaufte er die *Encyclopaedia Britannica*, setzte den kleinen Richard auf seinen Schoß und las ihm daraus vor. Aber er las nicht nur vor, er erklärte auch, was es bedeutete. Wenn da beispielsweise stand, wie groß ein Brontosaurier ist, so stellte er sich zusammen mit Richard vor, was geschehen würde, wenn der Saurier unten im Vorgarten ihres Hauses stünde. Er wäre groß genug, um seinen Kopf durch das Fenster zu stecken – nur dass sein riesiger Kopf dabei das Fenster zerstören würde. So etwas kann man sich doch viel besser merken als irgendwelche nackten Zahlen!

Melville brachte seinem Sohn außerdem bei, einen unabhängigen Geist zu bewahren und sich von Autoritäten und ihren Machtsymbolen nicht beeindrucken zu lassen. Da Melville zeitweise sein Geld mit dem Vertrieb von Uniformen verdiente, kannte er den Unterschied zwischen einem Mann mit und ohne Uniform sehr gut und wusste, dass es immer derselbe Mann war. In einem Interview mit der BBC aus dem Jahr 1981 erzählt Feynman dazu eine seiner typischen Anekdoten:¹

Eines Tages zeigte sein Vater ihm ein Zeitungsbild in der *New York Times*. Darauf konnte man sehen, wie sich die Menschen ehrfürchtig vor dem Papst verneigten – und den Papst mochte Melville nicht besonders. So fragte er seinen Sohn, was denn so besonders an diesem einen Menschen sei, dass alle anderen sich vor ihm verbeugen. Und er erklärte, der Unterschied liege in dem Hut, den er trägt. Ansonsten habe dieser Mensch dieselben Sorgen wie alle anderen Menschen: Er muss essen und trinken und geht aufs Klo. Er ist auch nur ein Mensch. Es ist also alleine seine Position und seine besondere Kleidung, die ihn hervorheben, nicht aber irgendwelche besonderen Taten oder sein ehrenhafter Charakter.

Es gibt noch weitere Anekdoten über die Art und Weise, wie Melville seinem Sohn die Welt und ihre Geheimnisse näher brachte. Auch die Physik

¹ man findet die Geschichte auch in seinem bekannten Buch *Es ist so einfach: Vom Vergnügen, Dinge zu entdecken* (englisches Original: *The Pleasure of Finding Things Out*)

gehörte dazu, soweit sie Melville bekannt war. Eines Tages kamen sie beispielsweise auf das Phänomen der Trägheit zu sprechen. Richard hatte bemerkt, dass ein Ball in einem kleinen Rollwagen scheinbar gegen die Rückwand gestoßen wurde, wenn er plötzlich an dem Wagen zog. Doch Melville zeigte ihm, dass der Ball sich kaum bewegte – es war der Wagen, dessen Rückwand sich dem Ball näherte. Der kleine Richard war fasziniert, und tatsächlich: Wenn er genau hinschaute, konnte er sehen, dass sein Vater Recht hatte. „Warum ist das so?“ fragte er ihn. „Das weiß niemand!“ antwortete dieser. „Ein allgemeines Prinzip besagt, dass bewegte Dinge ihre Bewegung beibehalten und dass ruhende Dinge unbewegt bleiben, bis man sie anstößt. Das nennt man Trägheit, aber niemand weiß warum es wahr ist!“ Das war genau die Art, in der später auch Feynman selbst an die Rätsel der Natur heranging. Der Begriff *Trägheit* sagt alleine wenig – es ist nur ein Name.

Feynman genoss diese Gespräche mit seinem Vater. Viele Jahre später sagte er in *The Pleasure of Finding Things Out*: „Das war die Art, wie mein Vater mich unterrichtete, mit solchen Beispielen und Gesprächen, ohne jeden Druck, einfach nur wunderbar interessante Diskussionen.“ Was für eine herrliche Art aufzuwachsen, besonders für einen so intelligenten und wissbegierigen Jungen wie Feynman.

Joan – Feynmans begabte Schwester

Auch Feynmans neun Jahre jüngere Schwester Joan entwickelte sich zu einem sehr aufgeweckten und intelligenten Kind mit ganz ähnlichen Interessen wie ihr älterer Bruder. In einem Intelligenztest an der Highschool erzielte sie 124 Punkte, während ihr Bruder es auf 123 Punkte brachte – ein Punkt weniger, wie Joan später einmal scherzhaft betonte²: „So I was actually smarter than he was!“ Diese IQ-Werte waren sicherlich gut, aber nicht außergewöhnlich. Feynman nutzte in späteren Jahren dieses Resultat, um ein Mitgliedsangebot des Hochbegabten-Vereins MENSA abzulehnen: Sein IQ sei dafür nicht hoch genug. In Wahrheit stand dieser elitäre Club, für den man einen gewissen Mindest-IQ nachweisen muss, in Feynmans Augen wohl genau für das, was er verabscheute: aufgeblasene Wichtigtuerei.

Doch zurück zu seiner kleinen Schwester Joan: Leider herrschte im frühen zwanzigsten Jahrhundert noch die Ansicht, das weibliche Gehirn sei für die anspruchsvollen Naturwissenschaften von Natur aus ungeeignet. Auch Joans Mutter Lucille teilte diese Auffassung, die aus heutiger Sicht vollkommen

² siehe z. B. Sykes, Christopher: *No Ordinary Genius: The Illustrated Richard Feynman*.

unverständlich erscheint, damals aber durchaus gängig war. Und dabei war Lucille keineswegs besonders rückständig – als junge Frau war sie noch selbst für das Frauenwahlrecht auf die Straße gegangen, wie Joans Sohn Charles Hirshberg in *My Mother, the Scientist* erzählt. Als die achtjährige Joan ihrer Mutter enthusiastisch eröffnete, sie wolle Wissenschaftlerin werden, entgegnete Lucille: „Frauen können das nicht, weil ihr Gehirn davon nicht genug begreifen kann!“ Das war für Joan ein schwerer Schlag. Ihr Wunsch, Wissenschaftlerin zu werden, schien ein Ding der Unmöglichkeit zu sein, und selbst viele Jahre später hatte sie immer wieder Zweifel an ihren Fähigkeiten.

Andere Frauen hatten damals ebenfalls unter diesen Vorurteilen zu leiden. Einige schafften es dennoch. So war die österreichische Kernphysikerin Lise Meitner um 1938 an der Entdeckung der Kernspaltung beteiligt gewesen, und die aus Polen stammende Marie Curie hatte sogar zwei Nobelpreise erhalten (1903 in Physik für die Entdeckung der Radioaktivität und 1911 den Chemie-Nobelpreis für die Entdeckung der radioaktiven Elemente Radium und Polonium). In Richards Geburtsjahr 1918 hatte die damals 36 Jahre alte deutsche Mathematikerin Emmy Noether mit dem nach ihr benannten Theorem einen tiefen Zusammenhang zwischen Symmetrien und Erhaltungssätzen hergestellt. Damit hatte sie unter anderem die Frage nach dem Ursprung der Trägheit in gewissem Sinn beantwortet (siehe Infobox 1). Doch diese Frauen schienen für Joan irgendwie nicht von dieser Welt zu sein – keine realen Frauen, denen man nacheifern konnte.

Infobox 1: Das Noether-Theorem und der Ursprung der Trägheit

Im Jahr 1918 bewies die deutsche Mathematikerin Emmy Noether folgende fundamentale Erkenntnis:

Zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems gehört eine Erhaltungsgröße.

Symmetrie bedeutet dabei, dass man etwas mit einem physikalischen System tun kann, ohne dass sich seine Physik dabei ändert. Man könnte beispielsweise in Gedanken unser Sonnensystem an einen anderen Ort im Universum verfrachten – alles würde dort genauso ablaufen, denn es kommt nicht darauf an, wo genau sich das Sonnensystem befindet. Die physikalischen Gesetze sind nämlich, soweit wir wissen, überall im Universum gleich. Nach dem Noether-Theorem muss es eine zugehörige physikalische Größe geben, die sich zeitlich nicht ändert und deshalb Erhaltungsgröße genannt wird. Diese Größe ist für die „Verschiebungssymmetrie“ der Gesamtimpuls des Sonnensystems, also der „Schwung“ aller Bewegungen von Sonne, Planeten, Monden zusammengenommen.

Noether sagt also, dass die Impulserhaltung eine Konsequenz der Verschiebungssymmetrie unserer Welt ist. Und Impulserhaltung bedeutet, dass es keine Impuls- und damit keine Geschwindigkeitsänderung ohne äußeren Anlass gibt.

Unser Sonnensystem gleitet also als Ganzes mit gleichmäßiger Geschwindigkeit durch den Weltraum, wenn keine äußeren Kräfte auf es einwirken. Das ist genau das Trägheitsprinzip, das Feynmans Vater ihm am Beispiel des Balls im Rollwagen erläutert hatte. Emmy Noether hat mit dem nach ihr benannten Theorem also einen tieferen Grund für dieses Prinzip aufgedeckt.

Es gibt noch weitere Symmetrien und Erhaltungsgrößen. So könnte man in Gedanken das Sonnensystem anhalten und später weiterlaufen lassen – die Physik wäre dieselbe, denn es kommt auf den genauen Zeitpunkt nicht an. Nach dem Noether-Theorem folgt daraus, dass die Gesamtenergie des Sonnensystems sich nicht ändert, also die Summe der Bewegungs- und Lageenergien von Sonne und Planeten. Es wäre dem Sonnensystem auch egal, wenn es einige Grad gedreht oder gekippt würde – es folgt, dass der sogenannte Bahndrehimpuls (der Drehschwung) des Sonnensystems insgesamt konstant bleibt.

Für den Beweis des Noether-Theorems braucht man das Prinzip der kleinsten Wirkung, das uns bald begegnen wird. Die Beweisidee hat Feynman in seiner populären Vorlesung *Symmetry in Physical Law* in der Reihe *The Character of Physical Law* wunderbar skizziert.

Joan erhielt also, was die Naturwissenschaften angeht, nicht dieselbe Aufmerksamkeit von ihrem Vater wie ihr großer Bruder Richard. Doch Richard sprang in diese Lücke und erklärte seiner kleinen Schwester all die wunderbaren Dinge, die sein Vater ihm beibrachte. Joan bezeichnete sich später als Richards erste Studentin.

Eines Nachts weckte Richard seine Schwester, um ihr ein besonderes Schauspiel am Himmel zu zeigen: ein Nordlicht! Das war ein Schlüsselerlebnis für Joan, denn das Thema Nordlicht ließ sie nicht mehr los. In ihr stieg der Wunsch auf, Astronomin zu werden und sich mit Himmelsphänomenen wie dem Nordlicht zu beschäftigen. Richard schenkte ihr daraufhin zu ihrem vierzehnten Geburtstag ein Astronomie-Lehrbuch, das sie monatelang Seite für Seite durcharbeitete. Dabei stieß sie auf Seite 407 schließlich auf eine besondere Grafik mit der Bildunterschrift: „Relative strengths of the Mg^+ absorption line at 4,481 angstroms ... from *Stellar Atmospheres* by Cecilia Payne“. Da war es: Cecilia Payne! Damit war bewiesen, dass es möglich war: Auch eine Frau konnte Astronomin zu werden!

Es war nicht leicht für Joan, in der Wissenschaft gegen alle Vorurteile und Widerstände Fuß zu fassen, und sie hatte viel schwerer zu kämpfen als ihr Bruder. Aber schließlich schaffte sie es, wobei der Sonnenwind und seine Wechselwirkung mit dem Magnetfeld der Erde zu einem ihrer Hauptthemen wurde – das Nordlicht, das Richard ihr als Kind gezeigt hatte, hatte seine Wirkung entfaltet. Mit ihrem Bruder traf sie dabei eine lebenslange Abmachung: Sie würde ihm alle anderen Themen überlassen, wenn er ihr nur das Nordlicht überließ. Dieses Thema wollte sie ganz für sich alleine

haben, ohne dass ihr schlauer Bruder dazwischenfunkte. Er hielt sich an diese Abmachung.

Als der kleine Richard langsam älter wurde, genügten ihm die Geschichten seines Vaters oft nicht mehr. Mit etwa elf Jahren richtete er sich ein eigenes kleines Labor zu Hause ein, das er auch öfters dazu benutzte, um sich leckere Pommes Frites zuzubereiten, wie er in *Surely You're Joking, Mr. Feynman* erzählt. Er liebte Radios und experimentierte mit ihren elektrischen Schaltungen. Schließlich verdiente er sogar etwas Geld mit der Reparatur dieser Geräte. Und seine kleine Schwester Joan durfte mitmachen – Richard bezahlte ihr 2 Cent pro Woche für ihre Hilfe. Joan war offenbar nicht nur seine erste Studentin, sondern auch seine erste Assistentin gewesen.

Die Zeit an der Highschool

Mit 13 Jahren trat Feynman in die Far Rockaway High School ein, die er von 1931 bis 1935 besuchte. Es erging ihm wie vielen anderen begabten Kinder: Er war oft unterfordert und langweilte sich. Das meiste eignete er sich außerhalb des Schulunterrichts aus Büchern oder durch Gespräche an, wobei er von einigen Lehrern unterstützt wurde, die sein Talent erkannten und ihm beispielsweise fortgeschrittene Mathematikbücher zu lesen gaben. Feynman verschlang diese Bücher und verfügte bald über ein mathematisches Wissen, das dem seiner Altersgenossen weit überlegen war. So stieg er zum Star der Mathematik-Leistungsgruppe der Schule auf und gewann in seinem letzten Highschool-Jahr sogar die „New York University Math Championship“. Dabei kam ihm eine Fähigkeit zugute, die auch für seine späteren Erfolge wesentlich war: Feynman musste nicht wie viele seiner Mitschüler streng nach Schema arbeiten, um ein Problem zu lösen. Im Gegenteil: Er mochte solche vorgegebenen Lösungswege nicht besonders und versuchte immer, alles selbst von Grund auf zu verstehen und abzuleiten. Mit seiner mathematischen Intuition konnte er dabei die Lösung oft schon erahnen, wo andere noch stur vor sich hin rechneten. Feynman hatte eben schon früh seinen eigenen Kopf und ließ sich nur ungern etwas vorschreiben, auch nicht in der Mathematik.

Insgesamt war sein Interesse allerdings ziemlich einseitig: Mathematik und Naturwissenschaften liebte er, während er mit Geisteswissenschaften, Englisch, Religion oder gar Philosophie wenig anfangen konnte. Diese Fächer besaßen aus seiner Sicht wenig Substanz und bestanden für ihn hauptsächlich aus leerem Geschwätz. In seiner Jugend tat Feynman alles, um den Kontakt zu diesen Fächern auf ein Minimum zu beschränken. Erst als älterer Mensch entspannte sich seine Einstellung dazu etwas.

In seinem letzten Jahr an der Highschool hatte Feynman das Glück, einen jungen Lehrer in Physik zu bekommen, der neu an die Schule gekommen war: Abram Bader. Dieser hatte zuvor bei dem bekannten Physiker Isidor Isaac Rabi an seiner Dissertation gearbeitet, doch wegen der Weltwirtschaftskrise war ihm das Geld dafür ausgegangen. Pech für Bader – Glück für Feynman!

Bader erkannte, dass sich Feynman im Physikunterricht langweilte. Also nahm er ihn nach einer Physikstunde beiseite, um ihn mit einem wirklich interessanten physikalischen Konzept bekannt zu machen, das im normalen Schulunterricht leider keinen Platz hat: dem *Prinzip der kleinsten Wirkung*. In Feynmans Vorlesungen über Physik findet man in Band II Kap. 19 ein Sonderkapitel dazu. Dort erinnert sich Feynman: „Dann erzählte er mir etwas, das ich absolut faszinierend fand und das mich seitdem fasziniert. Immer wenn das Thema auftaucht, arbeite ich daran.“

Die Details zum Prinzip der Kleinsten Wirkung wollen wir uns erst etwas später genauer ansehen. Die Grundidee ist aber verblüffend einfach – hier ist sie:

Stellen wir uns einen Stein vor, der sich beispielsweise in einem Gravitationsfeld von einem Ort zu einem anderen Ort bewegt, wofür er eine bestimmte Zeit benötigt. Seine Flugbahn können wir mit Newtons Bewegungsgesetz *Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung* ($F = m \cdot a$) Schritt für Schritt berechnen, wenn wir seine Anfangsgeschwindigkeit kennen. Wir können uns aber in Gedanken auch andere imaginäre Flugbahnen zwischen den beiden Orten vorstellen, die zeitlich genauso lang dauern, die aber nicht Newtons Bewegungsgesetz gehorchen. Diese imaginären Flugbahnen würde ein Stein bei der wirkenden Schwerkraft also nicht „wählen“. Dennoch können wir uns natürlich fragen, was es bedeuten würde, wenn er wie von Geisterhand auf einer solchen Bahn entlang geführt würde:

Wir können für jeden Zeitpunkt die kinetische und die potenzielle Energie auf der entsprechenden Bahn berechnen – egal, ob es sich um eine reale oder eine imaginäre Flugbahn handelt. Anschließend bilden wir die Differenz der beiden Energien und summieren (genauer: integrieren) sie über die gesamte Flugzeit auf. Für jede der imaginären Bahnen (und natürlich auch für die reale) erhalten wir so eine Zahl, die man die *Wirkung* der Bahn nennt – ein etwas verwirrender Begriff, der hier nichts mit den üblichen Bedeutungen wie „Auswirkung“ oder „Ergebnis“ zu tun hat, sondern einfach nur ein Wort für eine Zahl ist, die man für jede Bahn berechnen kann. Und jetzt kommt es: Die Wirkung, die wir für die imaginären Bahnen erhalten, ist immer größer als die Wirkung für die richtige Bahn, die Newtons Bewegungsgesetz entspricht. Die Natur wählt von allen möglichen Bahnen immer diejenige mit der kleinsten Wirkung!

Offenbar kann man also auch ohne Newtons Bewegungsgesetz die richtige Bahn finden, indem man diejenige mit der kleinsten Wirkung sucht. Das ist verblüffend, denn beide Beschreibungsweisen haben auf den ersten Blick nicht viel miteinander zu tun. Es zeigt sich sogar, dass man alle heute bekannten fundamentalen Naturgesetze durch eine passende Wirkung beschreiben kann – das Wirkungsprinzip muss also einen sehr grundlegenden Charakter in der Natur haben. Aber wie findet die Natur eigentlich genau die Bahn mit der kleinsten Wirkung? Riecht das fliegende Objekt irgendwie die zu große Wirkung der anderen imaginären Bahnen und sucht sich stattdessen diejenige mit der kleinsten Wirkung aus? Nun ja – wie wir noch sehen werden, ist diese Vorstellung gar nicht so falsch!

Arline, die Liebe seines Lebens

Neben diesem Erlebnis, das seine weitere wissenschaftliche Arbeit entscheidend prägen würde, gab es in Feynmans Highschool-Zeit eine weitere Begegnung, die sein Leben außerhalb der Physik stark beeinflussen würde: Er lernte Arline Greenbaum kennen (Abb. 1.3, oft auch fälschlich „Arlene“ geschrieben). Sie wurde die große Liebe seines Lebens, die leider viel zu früh auf tragische Weise endete – Arline starb am 16. Juni 1945 im Alter von nur 25 Jahren an Tuberkulose.

Arline war ein hübsches Mädchen mit langen Haaren, das nicht weit entfernt von den Feynmans wohnte. Bei den Jungs in Far Rockaway war sie sehr beliebt und viele hätten sie wohl gerne zur Freundin gehabt. Letztlich gelang es aber ausgerechnet dem damals noch etwas schüchternen Richard, sie für sich zu gewinnen. Auf den ersten Blick passten sie gar nicht so gut zueinander: Arline war kultiviert, spielte gerne Klavier, tanzte, zeichnete und interessierte sich für Literatur und Kunst – alles Dinge, die Richard eher weniger interessierten. Und dennoch waren beide seelenverwandt und ergänzten sich mit ihren unterschiedlichen Interessen auf wunderbare Weise. Sie liebten das Leben und begegneten der Welt mit einer unkonventionellen Mischung aus Abenteuerlust und Aufgeschlossenheit. Arlines Lieblingssatz lautete: *What do you care what other people think?* (*Was kümmert es Dich, was andere Leute denken?*) – ein Satz, der später auch zum Titel von Feynmans letzten autobiografischen Buch wurde. Mit diesem Satz machte sie ihrem Richard Mut, wenn er unsicher war und mit etablierten Vorstellungen in Konflikt geriet. Diese Unterstützung konnte er gut gebrauchen, als er später begann, ganz eigene Wege zu beschreiten, und Arlines Motto wirkte in Feynmans Erinnerung auch dann noch nach, als sie selbst längst gestorben war.



Abb. 1.3 Richard und Arline. (© Emilio Segre visual Archives/American Institute of Physics/Science Photo Library)

Wechsel zum MIT: Feynman lernt Quantenmechanik – und wir mit ihm

Im Sommer 1935 ging Feynmans Highschool-Zeit zu Ende. In fast allen Fächern hatte er mit Auszeichnung bestanden, sogar in Englisch, das nicht gerade sein Lieblingsfach war. Seine Eltern waren fest entschlossen, ihm finanziell eine College-Ausbildung zu ermöglichen – eine Chance, die Feynmans Vater Melville zu seiner Zeit nicht hatte. Die Columbia-Universität in New York lehnte Feynmans Bewerbung allerdings trotz seiner hervorragenden Noten ab, weil sie ihre Quote an jüdischen Studenten bereits ausgeschöpft hatte. Kaum zu glauben, dass es so etwas damals gab, aber Antisemitismus war zu dieser Zeit weit verbreitet. Am MIT (Massachusetts Institute of Technology) in Cambridge bei Boston hatte er mehr Glück, und es sprang sogar ein kleines Stipendium von 100 Dollar pro Jahr für ihn heraus.

Also fuhr Feynman im Herbst 1935 als 17-jähriger junger Mann ins etwa 350 km nordöstlich von New York gelegene Boston – oder genauer gesagt: er wurde von einigen Mitstudenten abgeholt, die sich davon erhofften, er würde ihrer Studentenvereinigung beitreten. Ein so begabter Mitstudent wie

Feynman war heiß begehrt, und Feynman war geschmeichelt: „Es war eine große Sache; man war erwachsen!“

Zunächst hatte Feynman sich am MIT für das Fach Mathematik eingeschrieben, doch er stellte schnell fest, dass ihm das zu theoretisch war. Er schwenkte um und versuchte es mit Elektrotechnik, doch das war wiederum zu praxisorientiert. Schließlich fand er die goldene Mitte: die Physik. Hier fühlte er sich gut aufgehoben.

In den 17 Jahren seit seiner Geburt hatte sich die Physik stürmisch entwickelt. Man hatte im Rahmen der sogenannten Quantenmechanik endlich verstanden, auf welche Weise sich die Elektronen in den Hüllen der Atome bewegten. Die Quantenmechanik avancierte damit zur fundamentalen Theorie der subatomaren Welt, und Feynman und seine Mitstudenten hatten die Gelegenheit, diese neue Theorie in ihrem Studium intensiv kennenzulernen. Schauen wir uns daher im Folgenden genauer an, was es mit der Quantenmechanik auf sich hat.

Die erste wichtige Erkenntnis war, dass sich die Elektronen im Atom nicht auf festen Bahnen um den Atomkern bewegen, die der dänische Physiker Niels Bohr noch 1913 vorgeschlagen hatte. Die Elektronen mussten vielmehr durch Wellen beschrieben werden, wie der französische Physiker Louis de Broglie in seiner berühmten Doktorarbeit im Jahr 1924 herausfand: Genauso wie Lichtwellen aus Lichtteilchen (Photonen) zusammengesetzt sind, so hängen auch Elektronen mit Elektronenwellen zusammenhängen, und zwar nach denselben Formeln:

$$E = h \cdot f$$

$$p = h / \lambda.$$

Teilchen mit hoher Energie E gehören demnach zu Wellen mit hoher Frequenz f , wobei ein großer Teilchenimpuls (also Teilchenschwung) p zu einer kurzen Wellenlänge λ führt. Den Übersetzungsfaktor zwischen den Teilchen- und Welleneigenschaften liefert das Plancksche Wirkungsquantum h – eine Naturkonstante, die in allen quantenmechanischen Formeln vorkommt und deren Wert im Experiment bestimmt werden muss.

Diese Beziehungen gelten sogar allgemein für ganz beliebige Objekte der Quantenwelt, egal ob es sich dabei um Photonen, Elektronen oder beispielsweise Protonen handelt.

Die Elektronenwelle bezeichnet man meist mit dem Buchstaben ψ und nennt sie auch *Wellenfunktion* oder *Wahrscheinlichkeitsamplitude*. In vielen Fällen genügt es, sich diese Elektronenwelle ähnlich wie eine Wasserwelle

vorzustellen. Positive Werte von ψ stehen für einen Wellenberg, negative Werte für ein Wellental.

Will man mathematisch ganz korrekt sein, so sind die Werte von ψ keine einfachen positiven oder negativen, sondern sogenannte komplexe Zahlen. Darunter können Sie sich, um ein Bild vor Augen zu haben, Pfeile oder Uhrzeiger in einer zweidimensionalen Ebene vorstellen. Bei einer ebenen Welle rotiert dieser Pfeil an jeder Stelle mit der Frequenz f wie bei einer sehr schnell gehenden Uhr, während die relative Stellung der Pfeile von Ort zu Ort wie bei einer Welle variiert (siehe [Abb. 1.4](#)).

Nur was soll eine solche merkwürdige Elektronenwelle physikalisch bedeuten? Wir wissen bereits, dass Wellenlänge und Wellenfrequenz die Energie und den Impuls des Teilchens bestimmen. Aber wo ist das Teilchen denn nun eigentlich? Eine Welle ist ja ein räumlich ausgedehntes Objekt, während ein Teilchen sich zu jeder Zeit an einem bestimmten Ort befinden sollte!

Die Lösung dieses Problems ist ebenso genial wie merkwürdig: Man lässt genau diese Forderung fallen, dass ein Teilchen sich immer an einem bestimmten Ort aufhält und dass es sich auf einer eindeutigen Bahn bewegt. Stattdessen geht man zu einer Beschreibung durch Wahrscheinlichkeiten über, wobei das Betragsquadrat $|\psi|^2$ der Wellenfunktion – also die quadrierte Höhe der Quantenwelle oder genauer ihre quadrierte Pfeillänge – die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, das Teilchen am zugehörigen Ort anzutreffen, wenn man durch ein geeignetes Experiment konkret nachschaut. Anders gesagt: Solange der Ort des Teilchens keine Spuren hinterlässt, an denen er sich erkennen ließe, so lange ist er prinzipiell unbestimmt. Das Teilchen weiß gewissermaßen selbst nicht, wo es sich genau befindet. Erst wenn eine hinreichend ortsempfindliche Wechselwirkung mit der Umwelt (oder einem Messgerät) stattfindet und der Ort somit relevant wird, erst dann macht es

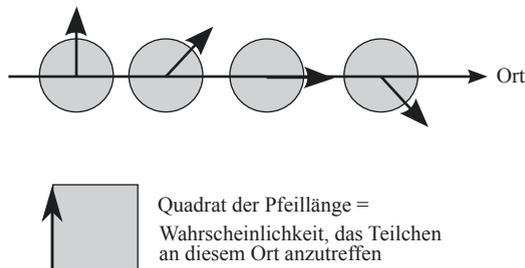


Abb. 1.4 Momentaufnahme einer Quantenwelle. Die Werte der Wellenfunktion an den einzelnen Orten kann man sich wie rotierende Pfeile oder Uhrzeiger vorstellen.

überhaupt Sinn, von einem Teilchenort zu sprechen. Genau dann greift auch die Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion.

Man kann sich natürlich die Frage stellen, warum man überhaupt eine Quantenwelle braucht und nicht gleich mit Wahrscheinlichkeiten arbeitet. Der Grund liegt darin, dass sich die Wellenberge und Wellentäler einer Quantenwelle gegenseitig auslöschen können, wenn sie aufeinandertreffen, während sich zwei Wahrscheinlichkeiten immer zu einer größeren Gesamtwahrscheinlichkeit aufsummieren. Dieses Phänomen, das man als Interferenz bezeichnet, wird uns später noch öfter beschäftigen.

Woran liegt es, dass in der Quantenmechanik auf einmal der Begriff der Wahrscheinlichkeit ins Spiel kommt? Man weiß es nicht – es ist eines der großen Rätsel, warum man ausgerechnet in einer Theorie, die man bis heute als fundamental ansieht, mit Wahrscheinlichkeiten operieren muss. Der Zufall scheint in der Natur eine grundlegende Rolle zu spielen. Wenn Sie das nicht glauben wollen, befinden Sie sich in guter Gesellschaft, denn auch Albert Einstein hatte seine Zweifel und drückte sie mit den berühmten Worten „Gott würfelt nicht“ aus. Nach allem, was wir heute wissen, scheint Gott aber doch zu würfeln. In seiner Vorlesung über Quantenelektrodynamik (QED) an der Universität von Auckland (Neuseeland) aus dem Jahr 1979 brachte Feynman diese Erkenntnis mit den folgenden Worten auf den Punkt:³

“If you want to know how nature works, we looked at it, carefully. Looking at it, that's the way it looks. You don't like it? Go somewhere else, to another universe where the rules are simpler, philosophically more pleasing, more psychologically easy. I can't help it, okay?”

Frei übersetzt:

„Wenn Sie wissen wollen, wie die Natur funktioniert – wir haben genau hingesehen, und so sieht sie nun einmal aus! Sie mögen es nicht? Gehen Sie woanders hin, in ein anderes Universum, wo die Regeln einfacher sind, philosophisch ansprechender, psychologisch einfacher. Ich kann es nicht ändern, okay?“

Das ist typisch Feynman. Mit seinem Seitenhieb auf die von ihm ungeliebten Philosophen macht er klar, dass nicht unsere Wunschvorstellungen wichtig sind, sondern die Realität – egal was wir von ihr halten. Trotzdem bleibt die fundamentale Rolle des Zufalls in der Quantenmechanik bis heute merkwürdig und unverstanden, und auch Feynman gibt das zu, wenn er an anderer Stelle sagt: „Niemand versteht die Quantenmechanik!“

³ das sehr unterhaltsame Video dazu findet man beispielsweise unter <https://www.youtube.com/watch?v=iMDTcMD6pOw>

Nun muss eine Elektronenwelle nicht unbedingt wie eine ebene Welle aussehen. Im räumlich begrenzten Bereich um die Atomkerne entstehen vielmehr sogenannte stehende Elektronenwellen ähnlich den Schwingungen auf einer Gitarrensaite, nur in drei Dimensionen. Dabei drehen sich die Wellenfunktionspfeile im Gleichtakt, wobei ihre Länge sich zeitlich nicht ändert und zum Rand des Atoms hin exponentiell kleiner wird. Im Jahr 1926 formulierte der österreichische Physiker Erwin Schrödinger die quantenmechanische Wellengleichung, eine Differenzialgleichung, mit der sich diese Wellenfunktionen ausrechnen lassen. Die Ergebnisse stimmten hervorragend mit dem Experiment überein und die Quantenphysiker wussten, dass sie mit der Quantenmechanik den richtigen Ansatz gefunden hatten.

Die durch Louis de Broglie, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg und viele andere begründete Quantenmechanik nahm eine rasante Entwicklung (siehe [Abb. 1.5](#)). Endlich hatte man eine fundamentale Theorie für die Natur auf mikroskopischer Ebene gefunden, mit der sich Atome, Festkörper, chemische Moleküle und vieles mehr zumindest im Prinzip berechnen ließen. Auch die Verbindung mit Einsteins Spezieller Relativitätstheorie gelang wenig später, als der britische Physiker Paul Dirac im Jahr 1928 seine berühmte Dirac-Gleichung aufstellte. Paul Dirac war es auch, der im Jahr 1930 das erste umfassende Lehrbuch zur Quantenmechanik herausbrachte: *The Principles of Quantum Mechanics* (deutsche Ausgabe: Die Prinzipien der Quantenmechanik). Auf dieser Basis konnten Feynman und seine Mitstudenten aufbauen und wurden so zur ersten Physikergeneration, die die neue Quantenmechanik bereits in ihrem Studium ausführlich kennen lernten.

Feynman hat seinen eigenen Kopf

Wie schon auf der Highschool lernte Feynman auch am MIT vieles eigenständig aus Büchern und durch die Zusammenarbeit mit anderen begabten Studenten. Er interessierte sich dabei nicht nur für Physik, sondern auch für andere Naturwissenschaften wie Chemie oder Metallurgie und meisterte alle naturwissenschaftlichen Prüfungen mit sehr guten Ergebnissen. Ein Problem waren die drei Pflichtfächer aus dem geisteswissenschaftlichen oder sprachlichen Bereich. Glücklicherweise gehörte aus historischen Gründen Astronomie dazu – das war in Ordnung für ihn. Das ungeliebte Englisch war Pflichtfach, und als drittes Fach wählte er notgedrungen Philosophie. Die Vorlesungen am MIT in diesen Fächern vertieften seine Abneigung noch und bestärkten ihn in seiner Überzeugung,

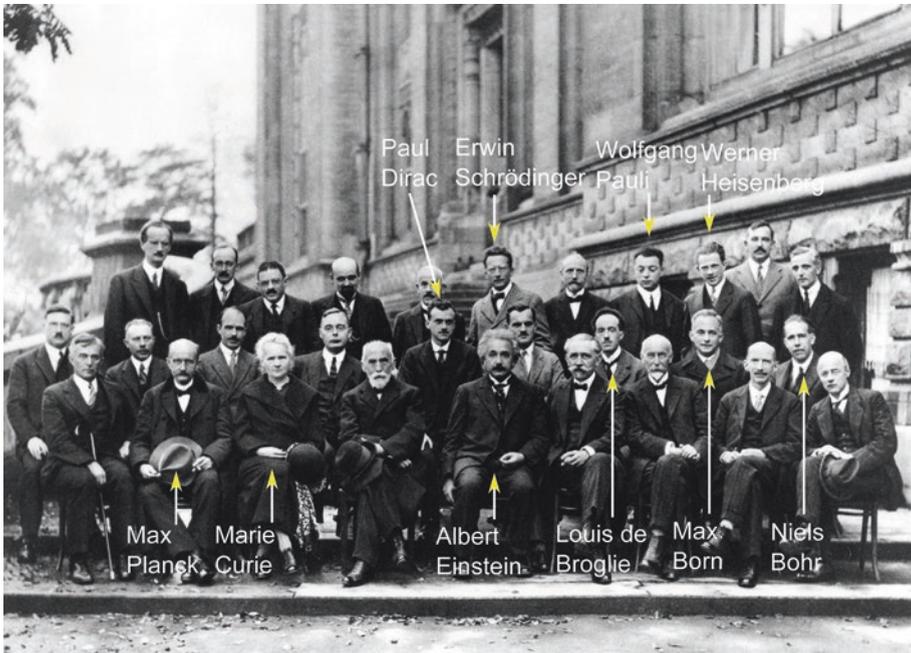


Abb. 1.5 Teilnehmer der Solvay-Konferenz von 1927 zur Quantentheorie. Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solvay_conference_1927.jpg; eigene Beschriftung hinzugefügt; gemeinfrei

dass insbesondere die Philosophie sinnloses Geschwätz sei. Später, als etablierter Physikprofessor, nutzte er in seinen Vorlesungen immer wieder gerne die Gelegenheit für kleinere und größere Seitenhiebe gegen die Philosophen – wir haben oben in dem kleinen Ausschnitt aus seiner QED-Vorlesung ein entsprechendes Beispiel gesehen. Es muss ihm ein inneres Bedürfnis gewesen sein.

Feynmans geistige Eigenständigkeit zeigte sich auch beispielsweise darin, dass er es ablehnte, mechanische Übungsaufgaben mithilfe der sogenannten Lagrange-Methode zu lösen (siehe Infobox 2). Er bestand darauf, das ursprüngliche Bewegungsgesetz von Newton anzuwenden und alle auftretenden Kräfte so in verschiedene Anteile zu zerlegen, dass sie zu dem gestellten Problem passten. Die Lagrange-Methode hat das gewissermaßen schon eingebaut, sodass man ganz schematisch an die Lösung herangehen kann, doch das war Feynman zu langweilig. Vielleicht war es ihm damals noch nicht so bewusst, dass die Lagrange-Methode eng mit dem Prinzip der kleinsten Wirkung verbunden ist, das ihn schon an der Highschool so fasziniert