

2

Princeton, Pfadintegrale und das Manhattan-Projekt

Der Wechsel nach Princeton war für Feynman der Beginn einer intensiven Zeit. Es gelang ihm, über den Begriff der *Wirkung* eine vollkommen neue Sichtweise auf die Quantenmechanik zu finden. Außerdem beteiligte er sich am Manhattan-Projekt, mit dem die USA versuchten, im zweiten Weltkrieg Deutschland beim Bau einer Atombombe zuvorkommen. Und schließlich hatte er eine private Tragödie zu verkraften, denn Arline, seine Jugendliebe und spätere Frau, erlag kurz vor Ende des Kriegs ihrer Tuberkulose-Erkrankung.

Doch bevor wir uns diesen dramatischen Ereignissen zuwenden, sehen wir uns erst einmal an, wie Feynman in Princeton aufgenommen wurde. Wie gefiel es ihm, dem unabhängigen Freigeist, an dieser sehr traditionellen Universität?

2.1 Feynman in Princeton

Im Herbst 1939 fuhr Feynmans Vater Melville seinen Sohn zur altherwürdigen Universität von Princeton, die knapp zwei Autostunden südwestlich von New York liegt. Mit seinen neugotischen Gebäuden wirkte Princeton auf Feynman wie die Nachahmung der englischen Eliteuniversitäten Oxford und Cambridge. Sogar der britische Akzent wurde imitiert, wenn nachmittags zum Tee geladen wurde. Es gab einen Portier, und während der gemeinsamen Mahlzeiten in der großen Halle trug man akademische Talare. Wer unwillkürlich an die Zauberschule Hogwarts aus den Harry-Potter-Filmen denkt, liegt gar nicht so falsch (Abb. 2.1).



Abb. 2.1 Die Alexander Hall der Princeton University. (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Princeton_University_Alexander.jpg)

Princeton war also nicht gerade der ideale Ort für einen unkonventionellen Menschen wie Feynman. Doch Feynman hatte sich vorgenommen, „nett“ zu sein, wie er in *Surely You're Joking, Mr. Feynman* schreibt. Er tat also sein Bestes, um sich soweit wie möglich an die dortigen Regeln und Gebräuche anzupassen, was ihm nicht immer leichtfiel – schließlich hasste er Formalitäten aller Art. Mit der Zeit erkannte er immerhin, dass manche Gepflogenheiten auch ihre Vorteile hatten. So brauchte man sich für das gemeinsame Abendessen nicht groß umzuziehen – man warf einfach den Talar über und schon war man fertig.

Was Feynman besonders beeindruckte: Princeton besaß ein Zyklotron – also einen nach heutigen Maßstäben kleinen Teilchenbeschleuniger –, das viele wichtige experimentelle Resultate produzierte. Als Feynman es in einem Kellerraum des Physik-Gebäudes fand, wusste er, dass er in Princeton am richtigen Platz war: Das war handfeste Physik, wie er sie sich vorstellte. Der Raum war vollgestopft mit allen möglichen Geräten, Kabeln und Schaltern, und Feynman fühlte sich spontan an sein eigenes kleines Heimlabor aus Kindertagen erinnert. In diesem Chaos konnte man nur dann die Übersicht

behalten, wenn man ständig aktiv mit den Geräten arbeitete und genau wusste, was man tat. Gut, dass Slater ihm empfohlen hatte, das MIT zu verlassen und zu sehen, was die Welt sonst noch zu bieten hatte.

Princeton hatte noch einen anderen Vorteil: Neben der Physik, auf die wir gleich zu sprechen kommen, hatte Feynman viele Gelegenheiten, auch mit anderen Fachrichtungen in Kontakt zu kommen. Es gab zwar keine Pflichtfächer wie am MIT – wofür Feynman sehr dankbar war – aber jeden Mittwoch kamen die unterschiedlichsten Leute ins Graduate College und hielten Vorträge über Themen wie Gedichte, Religion oder auch Hypnose. Natürlich war Feynman als einer der Ersten bereit, sich hypnotisieren zu lassen, und tatsächlich – es funktionierte! In *Surely You're Joking* beschreibt er seine Erfahrung damit folgendermaßen: „Man befindet sich in einem gewissen Dämmerzustand, und wenn der Hypnotiseur sagt ‚Du kannst Deine Augen nicht öffnen!‘ dann sagt man sich: ‚Ich könnte es tun, aber ich werde es nicht tun‘ – was nichts anderes bedeutet, als dass man es nicht tun kann.“

Feynman und die Philosophen: Wann ist ein Objekt real?

Da Feynman vielseitig interessiert war, machte er es sich zur Regel, im großen Speisesaal nicht nur bei der Gruppe der Physiker zu sitzen, sondern auch andere Gruppen kennenzulernen. Auch vor den Philosophen schreckte er nicht zurück, und so kam es zu einem Erlebnis, dass seine Vorurteile gegenüber der Philosophie erneut bestätigte: Eines Tages geriet er in eine Diskussion über das Buch *Prozess und Realität* des britischen Philosophen und Mathematikers *Alfred North Whitehead*. Feynman wurde zu einem entsprechenden Seminar eingeladen und schwor sich, den Mund zu halten – schließlich war er nicht gerade ein Experte in Philosophie. In dem Seminar fiel dann ständig der Begriff *essential object*, und nach einiger Diskussion wandte sich der Professor an Feynman und fragte ihn: „Würden Sie sagen, ein Elektron ist ein *essential object*?“ Feynman hatte keine Ahnung, was ein *essential object* sein mochte, und so rettete er sich mit einer Gegenfrage: „Ist denn ein Backstein ein *essential object*?“ Eine wilde Diskussion entbrannte, in der die unterschiedlichsten Ansichten geäußert wurden: Ging es Whitehead um den einzelnen Stein, oder um die Stein-Artigkeit, oder um das mentale Bild, das wir uns von einem Stein machen, oder um noch etwas anderes? Das war aus Feynmans Sicht typisch für philosophische Diskussionen – sie wussten selbst auf so eine grundlegende Frage keine eindeutige Antwort. Welchen Sinn machte da ein Seminar über das ganze Buch?

Feynman selbst hätte die Frage nach dem Stein oder dem Elektron so beantwortet: Beides sind theoretische Konstrukte, die wir verwenden, um die Natur besser zu verstehen. Sie sind so nützlich, dass wir einen Stein oder ein Elektron in gewissem Sinn als *real* ansehen können. Zum theoretischen Konstrukt eines Steins gehört beispielsweise, dass er ein Inneres besitzt, was man vom Elektron übrigens nach heutigem Wissen nicht sagen kann. Allerdings hat noch niemals jemand das Innere eines Steins gesehen, denn wenn man ihn zerbricht, sieht man doch nur wieder eine Oberfläche des Steins. Ähnlich ist es beim Elektron, wenn man von seinen Eigenschaften wie Masse, Energie, Impuls, Ort, Spin oder Ladung spricht. All dies sind begriffliche Konstrukte, die im Rahmen bestimmter physikalischer Theorien Sinn machen und dadurch helfen, Materie besser zu verstehen. Aber noch nie hat jemand ein einzelnes Elektron in gleicher Weise anfassen oder sehen können, wie man es bei einem Stein tun kann.

Die Ansichten darüber, was man in der Physik als *real* ansehen kann, haben sich im Lauf der Zeit immer wieder gewandelt. So hat der österreichischer Physiker und Philosoph Ernst Mach noch um das Jahr 1900 die reale Existenz von Atomen in Zweifel gezogen und schnippisch gefragt: „Ham se welche g’sehn?“ Heute sind Atome so unentbehrlich für die Beschreibung der Natur geworden, sodass wohl jeder Naturwissenschaftler sie ohne zu zögern als reale Objekte akzeptiert.

Die Frage, ob ein physikalischer Begriff etwas Reales darstellt, wird uns in diesem Buch noch an mehreren Stellen begegnen. Ist beispielsweise ein elektromagnetisches Feld *real*? Viele Physiker würden laut „ja“ rufen, kann man doch einem solchen Feld beispielsweise eine Energie- und Impulsdichte zuordnen. Und dennoch kann man die Elektrodynamik auch komplett ohne den Feldbegriff formulieren, wie wir bald sehen werden. Für Feynman ist das kein Problem, denn auch ein Feld ist für ihn nur ein theoretisches Konstrukt, dessen Nützlichkeit zum Verständnis der Natur darüber entscheidet, für wie *real* wir es halten können.

Wheeler war schon immer verrückt

Mit der Philosophie wurde Feynman also auch in Princeton nicht so recht warm. Das war bei der Physik ganz anders! Princeton hatte ihm eine Stelle als Assistent von Eugene Wigner angeboten, wodurch er finanziell einigermaßen abgesichert war – sehr zur Erleichterung seines Vaters, der zunehmend unter gesundheitlichen Problemen litt und befürchtete, den Unterhalt seiner



Abb. 2.2 Der junge John Archibald Wheeler (1911–2008). (© Emilio Segre Visual Archives/American Institute of Physics/Science Photo Library)

Familie irgendwann nicht mehr finanzieren zu können. Auch wenn Wigner sicher ein herausragender Physiker war, so war es für Feynman wohl ein Glück, dass er stattdessen John Archibald Wheeler zugeordnet wurde (Abb. 2.2), der nur sieben Jahre älter als Feynman war. Wheeler passte perfekt zu Feynman, denn unter der Oberfläche eines seriösen Gentlemans verbarg sich einer der kreativsten Köpfe der modernen Physik. Er schreckte auch vor bizarr anmutenden Ideen nicht zurück, seien es nun Paralleluniversen, Quantenschaum, Wurmlöcher oder Schwarze Löcher – wobei die letzten drei Begriffe bezeichnenderweise von ihm geprägt wurden. Feynman sagte später einmal über Wheeler: „Manche Leute glauben, Wheeler wurde in seinen späteren Jahren verrückt – aber er war schon immer verrückt!“¹

Am Anfang sah es allerdings gar nicht so aus, als ob Feynman und Wheeler gut miteinander auskommen würden. Wheeler war noch jung und hatte wohl den Eindruck, dass er seine Autorität in der wissenschaftlichen Hackordnung

¹ „Some people think Wheeler’s gotten crazy in his later years, but he’s always been crazy“, zitiert in Dennis Overbye: *John A. Wheeler, Physicist Who Coined the Term Black Hole, Is Dead at 96*, New York Times (14. April 2008).

sicherstellen müsse. Also stellte er klar, dass er nur eine begrenzte Zeit für Feynman übrighabe. Um dies zu unterstreichen, legte er beim ersten Treffen demonstrativ seine Taschenuhr auf den Tisch. Man kann sich vorstellen, wie diese formelle herablassende Art auf den unkonventionellen Feynman gewirkt haben muss. Dieser kaufte sich daraufhin eine billige Taschenuhr, und als Wheeler beim nächsten Treffen erneut seine Uhr auf dem Tisch platzierte, tat Feynman es ihm gleich und demonstrierte so, dass seine Zeit ebenso wertvoll sei wie die Zeit Wheelers. Bei manch anderem Professor hätte dies schiefgehen können, doch Wheeler war keineswegs der aufgeblasene Wichtigtuer, für den er sich ausgegeben hatte. Wheeler und Feynman erkannten die Komik der Situation und brachen in lautes Gelächter aus. Das Eis war gebrochen und eine lang anhaltende Freundschaft und fruchtbare Zusammenarbeit entwickelte sich zwischen diesen beiden brillanten Physikern.

2.2 Elektrodynamik ohne Felder

Die ersten Aufgaben, die Wheeler seinem neuen Doktoranden Feynman stellte, hingen eng mit Wheelers eigenen Forschungsarbeiten zusammen. Wheeler hatte sich intensiv mit der quantenmechanischen Beschreibung von sogenannten Streuprozessen befasst, bei denen man beispielsweise Atome mit hochenergetischen Photonen beschießt oder andere Teilchen miteinander kollidieren lässt. Feynman lernte aus diesen Aufgaben eine Menge über Quantenmechanik. Aber er hatte auch seinen eigenen Kopf und begann, erneut über eine Idee nachzudenken, die ihn schon am MIT beschäftigt hatte.

Rätselhafte QED

Der Hintergrund ist folgender: Zur damaligen Zeit war man intensiv damit beschäftigt, die Quantentheorie mit den Gesetzen der Elektrodynamik zu vereinen und eine *Quantenelektrodynamik (QED)* zu formulieren. Die Schrödinger-Gleichung ist dazu ungeeignet, denn sie beschränkt sich auf den nichtrelativistischen Bereich, bei dem Geschwindigkeiten weit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit liegen. Für die Beschreibung der Elektronen in den Hüllen der Atome ist das meist genau genug. In der Elektrodynamik geht es jedoch unter anderem um Lichtwellen, die sich sogar genau mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen. Dafür braucht man eine Beschreibung, die sich im Einklang mit Einsteins Spezieller Relativitätstheorie befindet – nicht umsonst hatte Einstein seine Theorie entdeckt, als er sich mit der Elektrodynamik beschäftigte.

Zwei relativistische Quantengleichungen haben wir bereits kennengelernt: Die Klein-Gordon-Gleichung und die Dirac-Gleichung. Doch damit ist man noch nicht am Ziel. Diese Gleichungen können zwar die Bewegung von Teilchen wie beispielsweise Elektronen durch relativistische Wahrscheinlichkeitswellen beschreiben, doch die auf sie einwirkenden elektromagnetischen Kräfte werden nach wie vor klassisch durch die potenzielle Energie der Teilchen in einem Kraftfeld dargestellt. In den Atomen bewegen sich also die Elektronen auch nach der Dirac-Gleichung im elektrischen Potenzial des Atomkerns.

Aber warum soll das unbefriedigend sein? Der entscheidende Punkt liegt darin, dass elektromagnetische Felder nicht statisch sein müssen. Wenn beispielsweise eine elektrische Ladung in einer Antenne hin- und herschwingt, dann verändern sich die Felder periodisch und können sich als elektromagnetische Welle von der Antenne ablösen. Auch Licht ist eine solche elektromagnetische Welle. Nun wissen wir aber dank Planck und Einstein, dass die Beschreibung von Licht durch eine solche Welle nur eine klassische Näherung ist. Schaut man genau hin, so besteht Licht aus einem Strom von Teilchen – den Photonen.

Offenbar braucht man für elektromagnetische Wellen ebenfalls eine Quantenbeschreibung, die den Wellencharakter von Licht mit seinem Teilchencharakter verbindet, analog zu Elektronen und allen anderen Teilchen. Da elektromagnetische Wellen aber nur ein Spezialfall elektromagnetischer Felder sind, liegt es nahe, dass ganz allgemein alle elektromagnetischen Felder quantenmechanisch durch Photonen beschrieben werden müssen. Die elektrische Anziehungskraft des Atomkerns auf die Elektronen kann dann nicht mehr einfach durch ein kontinuierliches elektrisches Feld dargestellt werden, sondern sie muss durch die Wirkung von diskreten Photonen zustande kommen, die irgendwie zwischen dem Atomkern und den Elektronen hin- und herpendeln.

Die Formulierung der Quantenelektrodynamik mithilfe von Photonen erwies sich jedoch als ausgesprochen komplex, und man stieß auf gravierende Schwierigkeiten, die das ganze Vorhaben grundsätzlich infrage stellten. Solange man nur einfache Rechnungen anstellte, bei denen beispielsweise nur ein Photon hin- und herwanderte, schien alles in Ordnung zu sein und man erhielt vernünftige Ergebnisse. Sobald jedoch mehrere Photonen gleichzeitig im Spiel waren, erhielt man oft unsinnige Resultate. So schien beispielsweise die Ladung des Elektrons unendlich groß zu werden.

Ein anderes Problem war die Selbstwechselwirkung des Elektrons. Wenn ein Elektron ein Photon aussendet, so muss sich dieses nicht unbedingt hinüber zum Atomkern bewegen. Es kann auch in einer Schleife zurück zum Elektron laufen und von diesem wieder eingefangen werden. Das Elektron

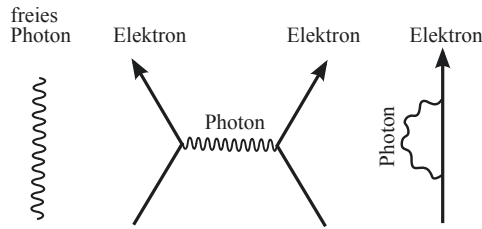


Abb. 2.3 In der Quantentheorie wird die elektromagnetische Wechselwirkung durch Photonen beschrieben. Diese können als freie Teilchen auftreten (links), zwischen Ladungen wirken (Mitte) oder zur Selbstwechselwirkung eines Teilchens führen (rechts).

wechselwirkt gleichsam mit sich selbst bzw. mit dem von ihm ausgesandten Photon (Abb. 2.3).

Nun besitzen die Photonen der Selbstwechselwirkung eine gewisse Energie, die in der Nähe des Elektrons lokalisiert ist. Nach Einsteins Spezieller Relativitätstheorie entspricht jede lokalisierte Energie einer Masse: Führt man einem ruhenden Objekt die Energiemenge E zu, so wächst seine Masse um den Betrag E/c^2 an. Umgekehrt schrumpft seine Masse um diesen Betrag, wenn es die Energiemenge E freisetzt. Es gibt sogar Prozesse in der Natur, bei denen sich die komplette Masse m eines Teilchens nach der Formel $E = m \cdot c^2$ in Energie umwandelt. Ein Beispiel ist der radioaktive Zerfall eines neutralen Pions in zwei Photonen, die zwar Energie und Impuls besitzen, aber keine Masse mehr haben (siehe Infobox 1).

Ein reales Elektron besteht in der QED also immer aus dem eigentlichen Elektron plus einer Wolke aus Photonen, die es ständig aussendet und wieder einfängt. Die Energie dieser Photonenwolke muss mit einbezogen werden, wenn wir von der Masse des realen Elektrons sprechen. Und da entsteht das Problem: Die Rechnungen ergeben eine unendlich große Energie für die Photonenwolke, sodass die Masse des realen Elektrons unendlich groß sein müsste. Das kann so natürlich nicht stimmen! Das Problem wird auch nicht erst durch die Quantentheorie verursacht. Schon in der klassischen Elektrodynamik ist die Energie des elektrischen Feldes bei einer punktförmigen Ladung unendlich groß, wie wir noch sehen werden.

Infobox 1: Welchen Impuls haben masselose Teilchen?

Wie ist es möglich, dass Photonen keine Masse besitzen, aber dennoch Energie und Impuls tragen und damit beispielsweise Elektronen aus einer Metalloberfläche herauschlagen können?

In der klassischen Mechanik nach Newton kann es solche Teilchen nicht geben, denn dort hätte ein Teilchen ohne Masse auch keine Energie und keinen Impuls.

Es besäße keinerlei Trägheit und würde einer einwirkenden Kraft nicht den geringsten Widerstand entgegensetzen. Ein solches Teilchen macht physikalisch keinen Sinn.

Das ändert sich, wenn wir die Spezielle Relativitätstheorie berücksichtigen: In [Abschn. 1.3](#) hatten wir gesehen, dass die Trägheit eines Teilchens nicht alleine durch seine konstante Masse gegeben ist. Sie wird vielmehr umso größer, je mehr sich seine Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit annähert.

Wir können uns nun Folgendes überlegen: Was muss geschehen, damit ein Teilchen eine bestimmte Trägheit beibehält, obwohl wir seine Masse immer kleiner machen? Es muss immer schneller werden und immer näher an die Lichtgeschwindigkeit heranrücken, sodass der Geschwindigkeitszuwachs die kleiner werdende Masse genau kompensiert und die Trägheit konstant bleibt. Im Grenzfall unendlich kleiner Masse rückt dabei die Geschwindigkeit unendlich nahe an die Lichtgeschwindigkeit heran, sodass wir letztlich sagen können, dass masselose Teilchen immer mit Lichtgeschwindigkeit fliegen müssen. Das gilt nicht nur für Photonen, sondern für alle masselosen Teilchen.

Masselose Teilchen machen also dank der Relativitätstheorie durchaus Sinn! Sie bewegen sich grundsätzlich mit Lichtgeschwindigkeit und besitzen trotz ihrer verschwindenden Masse eine Trägheit und daher auch eine Energie und einen Impuls.

Feynman hatte von diesen Schwierigkeiten bei der Formulierung der Quantenelektrodynamik erfahren, als er die entsprechenden Bücher von Heitler und Dirac am MIT studierte. Zu dieser Zeit war er zwar noch nicht soweit, dass er die technischen Details der Rechnungen verstehen konnte, aber er gewann doch einen guten Eindruck dieser Probleme, wobei ihm besonders ein Satz aus Diracs Buch im Gedächtnis geblieben war: „Es scheint so, als ob hier einige grundsätzlich neue physikalische Ideen notwendig sind.“²

Elektronen ohne Selbstwechselwirkung – geht das?

Damals reifte in Feynman eine Idee, die sich aus heutiger Sicht letztlich als Seitenzweig der wissenschaftlichen Entwicklung entpuppte. Da sie aber Feynman schließlich dazu motivierte, einen ganz neuen Zugang zur Quantentheorie zu formulieren, wollen wir sie uns genauer ansehen.

Der grundlegende Gedanke ist folgender: Die Ursache der Probleme mit der QED schien darin zu liegen, dass beliebig viele Photonen an einem Prozess beteiligt sein können und dass das Elektron mit sich selbst (also mit

² „It seems that some essentially new physical ideas are here needed“ aus Paul Dirac: *The Principles of Quantum Mechanics*

der von ihm ausgesendeten Photonenwolke) wechselwirkt. Warum aber sollte ein Teilchen überhaupt mit sich selbst wechselwirken? Das erschien Feynman absurd und unnötig, denn Ladungen sollten nur mit anderen Ladungen interagieren, nicht aber mit sich selbst.

Wäre es nicht vielleicht möglich, schon die klassische Theorie so umzuformulieren, dass die Selbstwechselwirkung von Elektronen wegfällt und sie nur mit anderen Elektronen wechselwirken? Wie müsste man vorgehen?

Nun, man müsste wohl auf das gewohnte elektrische (und magnetische) Feld verzichten. Normalerweise geht man nämlich so vor, dass man anhand aller vorhandenen Ladungen ein gemeinsames Feld berechnet, zu dem jede Ladung beiträgt. Damit wirkt aber auf jede Ladung das Feld aller Ladungen zurück, einschließlich seiner selbst. Verwendet man ein einziges gemeinsames Feld, so ist die Selbstwechselwirkung unvermeidbar.

Aber kann man wirklich auf elektrische und magnetische Felder verzichten? Sind sie nicht ein reales Element der Wirklichkeit? Besteht Licht denn nicht aus einer elektromagnetischen Welle? Sogar Albert Einstein hat einmal gesagt: „Das elektromagnetische Feld ist für den modernen Physiker nicht minder wirklich als der Stuhl, auf dem er sitzt.“

Doch Vorsicht! Diese Gedanken erinnern doch sehr an die Diskussion über *essential objects*, die Feynman bei den Philosophen in Princeton erlebt hatte. Elektromagnetische Wellen sind aber nach Feynman lediglich theoretische Konstrukte, die nützlich für die Beschreibung der Wirklichkeit sind – so wie übrigens auch Einsteins Stuhl. Anstatt zu sagen, dass wir mit unseren Augen Licht sehen, können wir stattdessen auch sagen, dass wir den elektromagnetischen Einfluss eines leuchtenden Objekts auf die Sinneszellen unseres Auges wahrnehmen. Licht wird immer von irgendeinem Objekt ausgesandt, und genau dieses Objekt sehen wir auch. Zuerst schwingen beispielsweise elektrische Ladungen in der Sonne, und acht Minuten später werden dadurch Ladungen in unseren Augen zu einer Schwingung angeregt, die wir als Helligkeit wahrnehmen. Vielleicht können wir also auf Licht und andere elektromagnetische Felder als Vermittler verzichten und direkt den wechselseitigen Einfluss von Ladungen aufeinander beschreiben, welcher mit einer gewissen Zeitverzögerung stattfindet, die der Lichtlaufzeit entspricht.

Als man begann, die mathematischen Gesetze für die Kräfte zwischen statischen Ladungen zu formulieren, ist man auch ganz ähnlich vorgegangen. Dieses Konzept wird als *Fernwirkung* bezeichnet. Es folgt dem Vorbild von Newtons Gravitationsgesetz, nach dem sich zwei Massen gegenseitig anziehen, ohne dass man angibt, wie diese Kraft zwischen den beiden Massen vermittelt wird. Allerdings hatte sogar Newton selbst Bedenken gegen eine solche unmittelbare Fernwirkung zwischen den Massen geäußert und gehofft, dass irgendwann jemand erklären würde, wie die Kraft übermittelt wird.

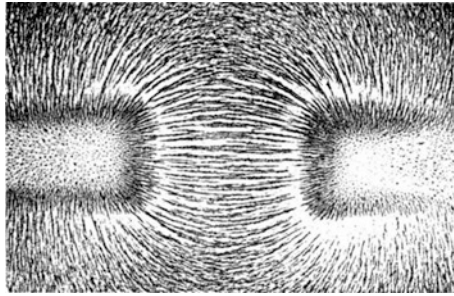


Abb. 2.4 Eisenfeilspäne richten sich in einem Magnetfeld entlang der magnetischen Feldlinien aus. (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetic_field_of_bar_magnets_attracting.png Credit: Alexander Wilmer Duff)

Um das Jahr 1852 führte der englische Experimentalphysiker Michael Faraday dann den Begriff des elektrischen und magnetischen Feldes ein. Er stellte sich dabei ganz anschaulich vor, dass Kraftlinien den Raum wie ein Medium durchdringen und auf die Bewegung von Ladungen einwirken (siehe Abb. 2.4). Der Raum war für ihn von unsichtbaren Feldlinien erfüllt, aus denen sich die Kräfte auf Ladungen am Ort der Feldlinien ergeben. „Faraday sah im Geiste die den ganzen Raum durchdringenden Kraftlinien, wo die Mathematiker fernwirkende Kraftzentren sahen; Faraday sah ein Medium, wo sie nichts als Abstände sahen“ – so beschrieb es James Clerk Maxwell im Jahr 1873.³

Eben diesem James Clerk Maxwell gelang es im Jahr 1864, aufbauend auf den Arbeiten Faradays die komplette Wechselbeziehung zwischen Feldern und Ladungen in einigen wenigen mathematischen Gleichungen zusammenzufassen (siehe Infobox 2). Das elektromagnetische Feld ist dabei als Vermittler für die Kräfte zwischen Ladungen so nützlich, dass wir es oft für unverzichtbar und damit für real halten. Aber es könnte auch ohne diesen Vermittler gehen!

Infobox 2: Die Maxwell-Gleichungen

Die Maxwell-Gleichungen beschreiben die gegenseitigen Wechselbeziehungen zwischen elektromagnetischen Feldern und elektrischen Ladungen und Strömen. So erzeugen elektrische Ladungen wie beispielsweise Elektronen ein elektrisches Feld in ihrer Umgebung – man sagt auch, die Ladungen bilden die Quellen des elektrischen Felds. Im Gegensatz dazu haben Magnetfelder keine solchen Quellen. Es gibt also keine magnetischen Ladungen, die man als magnetische

³ James Clerk Maxwell: *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, 1873

Monopole bezeichnen könnte, wenn es sie gäbe. Das merkt man daran, dass jeder Magnet einen Nord- und einen Südpol hat. Einen einzelnen Nordpol ohne Südpol gibt es nicht.

Allgemein werden Magnetfelder von elektrischen Strömen erzeugt. Jedes stromführende Kabel erzeugt ein solches Magnetfeld, das man beispielsweise mit einer Kompassnadel nachweisen kann. Wenn man das Kabel aufwickelt, kann man daraus einen Elektromagneten bauen.

Umgekehrt ruft ein Magnetfeld, das sich zeitlich verändert, einen elektrischen Strom in einem Kabel hervor. Genau genommen erzeugt das veränderliche Magnetfeld zunächst ein elektrisches Feld, das dann wiederum die Elektronen im Kabel in Bewegung setzt. Auf diese Weise können wir beispielsweise mit einem Dynamo elektrischen Strom erzeugen.

Die entscheidende Erkenntnis Maxwells war, dass auch veränderliche elektrische Felder selbst wieder Magnetfelder erzeugen. Dadurch ergibt sich eine faszinierende Möglichkeit: Ein schwingendes elektrisches Feld kann ein schwingendes magnetisches Feld erzeugen, das wiederum ein schwingendes elektrisches Feld hervorruft und so fort. Die schwingenden elektrischen und magnetischen Felder können sich dadurch von den Ladungen lösen und als elektromagnetische Wellen in den Raum ausbreiten, wo sie sich gegenseitig am Leben erhalten. Maxwell sagte also mithilfe seiner Gleichungen die Existenz elektromagnetischer Wellen voraus, was im Jahr 1886 von dem deutschen Physiker Heinrich Hertz in einem berühmten Experiment glänzend bestätigt wurde.

Feynman hoffte, dass mit dem Verzicht auf ein allgemeines elektromagnetisches Feld alle Probleme gelöst werden könnten – auch in der entsprechenden Quantentheorie: Das Elektron würde nicht mehr mit sich selbst wechselwirken, also gäbe es keine unendliche Selbstenergie mehr. Und selbst wenn man sich gedanklich vom elektromagnetischen Feld als Vermittler nicht trennen möchte, so wäre dieses Feld komplett durch die vorhandenen Ladungen festgelegt und hätte keinerlei unabhängiges Eigenleben. Freie elektromagnetische Wellen ohne Quelle und Empfänger gibt es in diesem Bild nicht – sie wären immer nur Ausdruck der Wechselwirkung zwischen den Ladungen eines Senders und Empfängers. Entsprechend sollten auch alle Probleme verschwinden, die mit dem Auftreten von irgendwelchen Photonen zu tun haben, deren Verhalten nicht komplett durch Ladungen festgelegt ist.

Das war also der Plan, wie Feynman in seiner Nobelpreisrede schreibt: Formuliere die klassische Elektrodynamik so um, dass Elektronen nicht mehr mit sich selbst wechselwirken, und hoffe, dass dann in der zugehörigen Quantentheorie keine Probleme mehr auftreten. Diese Idee erschien Feynman so naheliegend und elegant, dass er sich geradezu in sie verliebte: „The idea seemed so obvious to me and so elegant that I fell deeply in love with it.“

Der Strahlungswiderstand schwingender Elektronen

In Princeton machte er sich daran, diese Idee weiterzuverfolgen. Er hatte in den Jahren zuvor viel dazugelernt und war dabei auf ein Problem gestoßen, das seine wunderbare Idee infrage zu stellen drohte:

Wenn ein Elektron beispielsweise in einer Sendeantenne hin und her schwingt, so strahlt es Energie in Form einer elektromagnetischen Welle ab. Das Elektron verliert also beim Schwingen ständig Energie. Dadurch wird seine Schwingung gedämpft, ähnlich wie eine Reibungskraft dies bewirken würde – man spricht hier vom sogenannten *Strahlungswiderstand*. Um die Schwingung aufrecht zu erhalten, muss man dem Strahlungswiderstand entgegenwirken und so dem Elektron die abgestrahlte Energie wieder zuführen.

Der Vergleich des Strahlungswiderstandes mit einer Reibungskraft hinkt etwas, denn es gibt einen wichtigen Unterschied: Eine Reibungskraft entsteht durch die Geschwindigkeit eines Objektes. Der Strahlungswiderstand wird jedoch durch die ständige Änderung der Beschleunigung bei der Schwingung verursacht. Ein sich gleichmäßig bewegendes Elektron strahlt nicht, ebenso wenig wie ein gleichmäßig beschleunigtes Elektron. Den Strahlungswiderstand spürt man nur dann, wenn sich die Beschleunigung ändert, so wie bei einem schwingenden Elektron.

Der niederländische Mathematiker und Physiker Hendrik Antoon Lorentz hatte untersucht, wo dieser Strahlungswiderstand genau herkommt, und war zu dem Ergebnis gekommen, dass sein Ursprung in der Selbstwechselwirkung des Elektrons liegt. Genau die wollte Feynman aber loswerden, da sie zu einer unendlichen Selbstenergie und damit zu einer unendlichen Masse des Elektrons führt. Feynman war also gerade dabei, das Kind mit dem Bade auszuschütten.

Es ist sehr lehrreich, sich den Gedankengang von Lorentz zu Selbstenergie und Strahlungswiderstand des Elektrons etwas genauer anzusehen. Die Grundidee ist folgende:⁴

Man stellt sich das Elektron zunächst nicht punktförmig vor, sondern geht von einer kleinen kugelförmigen Ladungsverteilung aus. Ein einfaches Modell ist beispielsweise eine Kugel, auf deren Oberfläche sich die negative Ladung des Elektrons gleichmäßig verteilt. Dabei stoßen sich die einzelnen Bereiche der negativ geladenen Kugeloberfläche gegenseitig ab – das ist die Selbstwechselwirkung der Kugel. Wegen dieser Abstoßung kostet es Energie,

⁴ siehe auch Feynman Lectures, Band II, Kap. 28

die Ladungen von außen auf die Kugeloberfläche zu bringen. Man kann sich vorstellen, dass diese Energie im elektrischen Feld der Kugel gespeichert ist. Sie trägt nach Einsteins Formel $E = m \cdot c^2$ zur Masse des realen Elektrons inklusive Feld bei.

Wenn man nun die Kugel kleiner macht, so muss man gegen die elektrische Abstoßung der Ladung auf ihrer Oberfläche arbeiten – es kostet also Energie, die Kugel zu verkleinern. Dabei wird die Abstoßung umso stärker, je kleiner die Kugel ist, sodass beim Verkleinern immer mehr Energie hineingesteckt werden muss und im Feld gespeichert wird. Entsprechend nimmt die Masse, die dieser Energie entspricht, immer weiter zu. Würde man die Kugel auf einen Punkt schrumpfen lassen, so wäre die Energie und damit die Masse der Kugel unendlich groß. Ein punktförmiges Elektron müsste nach dieser Vorstellung also eine unendlich große Masse und Energie haben, verursacht durch die Wechselwirkung seiner Ladung mit seinem eigenen Feld.

Nun gut – vielleicht ist das Elektron ja in Wirklichkeit gar nicht punktförmig. Wie groß müsste die Kugel also sein, damit die komplette Masse des Elektrons alleine durch sein elektrisches Feld verursacht würde? Die Rechnung ist nicht allzu schwierig – es kommt heraus, dass die Kugel ungefähr so groß wie ein Proton sein müsste, also grob etwa $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$. Im Experiment findet man jedoch bis heute keinerlei Hinweise für solch eine Ausdehnung des Elektrons. Die Obergrenze liegt momentan bei etwa 10^{-19} m , d. h., das Elektron muss mindestens zehntausendmal kleiner sein, als es nach dem Kugelmodell sein dürfte.

Das Modell kann also in dieser Form nicht der Wirklichkeit entsprechen, die klassische Elektrodynamik verträgt sich nicht mit punktförmigen geladenen Teilchen. Da mag es überraschen, dass das Kugelmodell sehr wohl in der Lage ist, den oben angesprochenen Strahlungswiderstand zu erklären, und zwar so:

Solange die Kugel ruht oder sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit bewegt, gleichen sich die gegenseitigen Abstoßungskräfte auf verschiedene Teile der Kugeloberfläche gegenseitig aus, wie man nachrechnen kann.

Das ändert sich, wenn die Kugel beschleunigt wird, denn der Einfluss von einer Stelle der geladenen Kugeloberfläche braucht Zeit, um sich auf die anderen Teile der Oberfläche auszuwirken. Auch elektrische Kräfte können sich nach Einsteins Relativitätstheorie maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Die immer größer werdenden Positionsänderungen der einzelnen Teile der Oberfläche wirken sich also nur zeitlich verzögert auf die anderen Teile aus, sodass sich die elektrischen Kräfte insgesamt nicht mehr gegenseitig ausgleichen. Es entsteht in Summe eine Selbstkraft, die der Beschleunigung entgegenwirkt (Abb. 2.5). Das Elektron hält sich gewissermaßen mit seiner

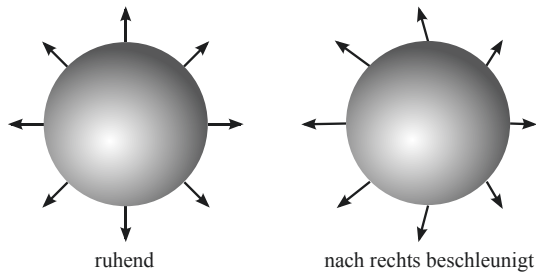


Abb. 2.5 Selbstkräfte auf eine ruhende und eine beschleunigte geladene Kugel

Selbstwechselwirkung am eigenen Schopfe fest und versucht, sich einer Beschleunigung zu widersetzen.

Man kann diese Selbstkraft ausrechnen und in mehrere Anteile zerlegen.⁵ Dabei gibt es einen Anteil, der proportional zur Beschleunigung ist und mit schrumpfendem Kugelradius immer weiter anwächst. Diesen Anteil kennen wir schon: Er repräsentiert die Trägheit der Kugel, wobei diese Trägheit alleine durch die Selbstwechselwirkung der Kugel zustande kommt und der im Feld gespeicherten Selbstenergie entspricht. Je kleiner die Kugel wird, umso größer wird diese Selbstenergie und damit die Trägheit der Kugel, bis sie schließlich für Kugelradius null unendlich groß wird. Eben diesen Anteil wollte Feynman loswerden, indem er die Selbstwechselwirkung verneinte.

Daneben gibt es noch weitere Anteile, die durch die Selbstwechselwirkung entstehen. Bis auf einen Term verschwinden sie alle, wenn die Kugel zu einem Punkt schrumpft. Dieser übrigbleibende Anteil ist proportional zur zeitlichen Änderung der Beschleunigung und repräsentiert genau den Strahlungswiderstand, der notwendig ist, um die Energieabstrahlung eines schwingenden Elektrons zu erklären. Zudem hängt er überhaupt nicht von der Größe der Kugel ab – es ist also für den Strahlungswiderstand der Kugel kein Problem, diese auf einen Punkt schrumpfen zu lassen. Damit ließe sich der Strahlungswiderstand des Elektrons im Kugelmodell problemlos erklären, auch wenn man von einem punktförmigen Elektron ausgeht.

Feynman stand also vor einem Dilemma: Die Selbstwechselwirkung der elektrisch geladenen Kugel führt einerseits dazu, dass die Kugel eine Trägheit aufweist, die sich bei einer Beschleunigung auswirkt. Darüber hinaus führt die Selbstwechselwirkung zu einem Strahlungswiderstand, der sich bei einer

⁵ die genaue Formel dazu findet man in den Feynmans Lectures Band II in Abschn. 28.4 unter der Formel-Nummer 28.9

zeitlichen Änderung der Beschleunigung bemerkbar macht – beispielsweise bei der schwingenden Bewegung in einer Antenne.

Um im Kugelmodell das Verhalten des Elektrons erklären zu können, muss man die Kugel kleiner als 10^{-19} m werden lassen – das ist die gemessene Obergrenze für die Ausdehnung des Elektrons. Dann wird aber aufgrund der Selbstwechselwirkung die Trägheit der Kugel – also ihre Masse – viel größer als die tatsächliche Masse des Elektrons. Schrumpft die Kugel zu einem Punkt, so wird die Masse sogar unendlich groß.

Um dies zu vermeiden, muss man davon ausgehen, dass die Selbstwechselwirkung der Kugel nicht existiert. Dann aber existiert auch der Strahlungswiderstand der Kugel nicht, den ein reales Elektron aber aufweisen muss, um bei einer schwingenden Bewegung trotz Energieabstrahlung die Energieerhaltung sicherzustellen.

Im Rahmen der klassischen Elektrodynamik scheint es nur wenige Alternativen zum Kugelmodell oder ähnlichen Modellen für das Elektron zu geben. Irgendwie muss man sich das Elektron und seine Ladungsverteilung ja vorstellen, und sei es, dass man die Kugel zu einem Punkt schrumpfen lässt. Dann aber scheinen Widersprüche unvermeidbar: Mit Selbstwechselwirkung ist die Trägheit der Kugel zu groß und bei einer punktförmigen Kugel sogar unendlich. Ohne Selbstwechselwirkung fehlt dagegen der Strahlungswiderstand. War Feynmans Idee, eine klassische Elektrodynamik ohne Selbstwechselwirkung eines Elektrons auf sich selbst zu formulieren, damit widerlegt, da es in ihr keinen Strahlungswiderstand des Elektrons gab?

Wenn Elektronen nur auf andere Elektronen einwirken können, nicht aber auf sich selbst, dann kann es nur eine Rettung geben: Der Einfluss der anderen Elektronen im Universum auf das schwingende Elektron muss für dessen Strahlungswiderstand verantwortlich sein. Feynman überlegte sich: Wenn das Elektron für einen kurzen Moment hin- und herschwingt, so würde es ein anderes Elektron in seiner Umgebung mit seiner elektromagnetischen Kraft ebenfalls in Schwingung versetzen. Dieses würde wiederum mit seiner elektromagnetischen Kraft auf das erste Elektron zurückwirken und könnte es so abbremsen, was vielleicht den Strahlungswiderstand erklären würde. Voller Zuversicht stellte Feynman die entsprechenden Berechnungen an, doch es haute nicht richtig hin. Also ging Feynman zu Wheeler und fragte ihn um Rat.

Wheeler erfasste mit seiner größeren Erfahrung sofort, was nicht stimmte: Die Rückwirkung hing von der Masse und Ladung des zweiten Elektrons ab und würde außerdem umso schwächer werden, je weiter die beiden Elektronen voneinander entfernt waren. Die Formel für den Strahlungswiderstand enthielt aber keine dieser Abhängigkeiten. Außerdem passte das zeitliche

Zusammenspiel nicht: Der Strahlungswiderstand ist sofort da, sobald das erste Elektron zu schwingen beginnt. Bis sich aber die Schwingung auf das zweite Elektron auswirkt und dessen Rückwirkung wieder das erste Elektron erreicht, vergeht Zeit, denn diese gegenseitigen Beeinflussungen breiten sich maximal mit Lichtgeschwindigkeit aus. Was Feynman berechnet hatte, war nichts anderes als die gewöhnliche Reflexion oder Streuung von Licht am zweiten Elektron.

Das hätte es dann für Feynmans Idee gewesen sein können. Aber Wheeler war nicht umsonst dafür bekannt, sich auch für scheinbar merkwürdige Ideen begeistern zu können. Er verwarf also Feynmans Idee nicht einfach, sondern er erkannte das Potenzial darin: Was war zu tun, um die Idee zu retten?

Die Abhängigkeit vom gegenseitigen Abstand der beiden Elektronen könnte man loswerden, indem man annimmt, dass sich überall im Raum genug Elektronen befinden, um all die abgestrahlte Energie aufzunehmen, die das erste Elektron bei seiner Vibration abgestrahlt hat. Es ist ganz ähnlich, wie wenn man sich im Inneren einer gleichmäßig leuchtenden Kugelfläche befindet. In jeder Richtung blickt man auf sie und sieht sie leuchten, und es spielt dabei keine Rolle, wie weit sie entfernt ist – sie sieht immer gleich hell aus. Denkt man weiter darüber nach, so entfallen auch die Abhängigkeiten von den Massen und Ladungen der anderen Elektronen.

Retardierte und avancierte Felder: vorwärts und rückwärts durch die Zeit

Bleibt noch das Problem mit der zeitlichen Verzögerung. Hier hatte Wheeler einen scheinbar verrückten Einfall: Was wäre, wenn die Rückwirkung der anderen Elektronen auf das erste Elektron sich nicht nur vorwärts in der Zeit ausbreiten würde – man spricht hier von *retardierten* Feldern – sondern auch rückwärts in der Zeit? Das wären dann sogenannte *avancierte* Felder. Die retardierten Felder repräsentieren dann wie gewohnt die Reflexion und Streuung von Licht. Die avancierte Rückantwort käme dagegen genau im richtigen Moment am ersten Elektron an, wenn dieses seine Schwingung ausführt, und könnte so den Strahlungswiderstand erzeugen.

Macht so etwas irgendeinen Sinn? Wie können sich Felder oder elektromagnetische Wellen rückwärts in der Zeit ausbreiten? Nun ja – mathematisch sind die Maxwell-Gleichungen des elektromagnetischen Feldes zeitsymmetrisch. Sie machen keinen Unterschied zwischen Zukunft und Vergangenheit. Wenn wir einen rein elektromagnetischen Vorgang auf einem Film aufzeichnen und diesen Film dann rückwärts abspielen, so sehen wir wieder einen physikalisch möglichen elektromagnetischen Vorgang.

Trotzdem hat es sich in der Physik eingebürgert, nur die retardierten Felder von Ladungen zu verwenden. Das hängt damit zusammen, dass normalerweise elektrische Ladungen durch bestimmte andere Einflüsse bewegt werden. Die Ladungen sind dann die Ursache und die Reaktion der Felder die zeitlich verzögerte Auswirkung. Ein Beispiel ist unsere Sonne: Die Kernfusion erzeugt darin große Energiemengen, die elektrische Ladungen in den Atomen in Schwingungen versetzen, worauf die Atome elektromagnetische Wellen in den kalten Weltraum abstrahlen.

Würde die Sonne auch avancierte Wellen in die Vergangenheit abstrahlen, so entspräche das in zeitlicher Vorwärtsrichtung gesehen dem Bild, dass elektromagnetische Wellen aus dem Weltraum auf die Sonne zukämen und dort absorbiert würden. Die Wellen sind dann die Ursache und deren Absorption die Wirkung. Die Maxwell-Gleichungen verbieten das nicht, aber es kommt in unserem Universum normalerweise nicht vor, denn der Weltraum ist kalt und dunkel.

Niemand verbietet es uns aber, dass wir auch über avancierte Felder und Wellen nachdenken. Feynman beschreibt es in seinem Nobelvortrag sinngemäß so: „Manchmal ist eine Idee, die zunächst vollkommen paradox aussieht, überhaupt nicht mehr paradox, wenn man sie in allen Details und in realen Situationen bis zum Ende ausanalysiert.“

Wie sieht es aus, wenn eine kurzzeitig vibrierende Ladung zum Zeitpunkt null sowohl eine retardierte Welle in die Zukunft als auch eine avancierte Welle in die Vergangenheit aussendet? In einem zeitlich vorwärts laufenden Film wäre der Ablauf folgendermaßen (siehe Abb. 2.6): Zunächst bewegt sich die avancierte Welle kugelförmig von allen Seiten auf die Ladung zu, wobei der Kugelradius immer kleiner wird. Zum Zeitpunkt null ist der Kugelradius auf null geschrumpft und die Ladung absorbiert die avancierte Welle, wobei sie vibriert und eine retardierte kugelförmige Welle aussendet. Diese breitet sich mit der Zeit kugelförmig nach allen Seiten aus.

Dieser Vorgang ist vollkommen zeitsymmetrisch: Würde man den Film rückwärts laufen lassen, so sähe der Ablauf ganz genauso aus, es würden nur retardierte und avancierte Wellen ihre Rollen tauschen.

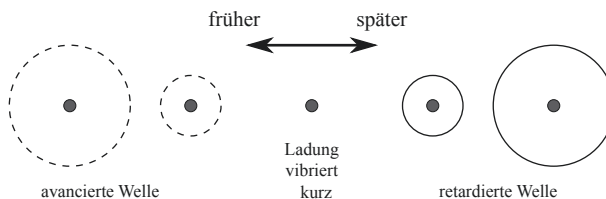


Abb. 2.6 Retardierte und avancierte Welle einer kurzzeitig vibrierenden Ladung. Die Zeitachse verläuft von links nach rechts.

Feynman und Wheeler stellten sich nun vor, dass das erste Elektron auf diese Weise am Zeitpunkt null kurz vibriert und dabei eine avancierte und eine retardierte Welle aussendet. Dabei soll es in jeder Richtung von sehr vielen anderen Elektronen umgeben sein, sodass jeder Teil der ausgesendeten retardierten Welle zu einer späteren Zeit auf ein solches Elektron trifft und von diesem absorbiert wird. Jedes absorbierende Elektron wird dadurch in eine kurze Vibration versetzt und sendet nun seinerseits eine avancierte und eine retardierte Kugelwelle aus. Die neuen retardierten Kugelwellen entsprechen dann einfach der Beugung und Reflexion der ursprünglichen retardierten Welle des ersten Elektrons.

Bei den neu erzeugten avancierten Wellen wird es nun spannend, denn sie laufen rückwärts in der Zeit und treffen das erste Elektron genau zum Zeitpunkt null, als dieses seine Wellen aussendet. In einem vorwärts laufenden Film sähe das Ganze dann so aus:

Für Zeiten kleiner als Null ist jedes Elektron von einer schrumpfenden avancierten Kugelwelle umgeben (siehe das linke Bild in [Abb. 2.7](#), die retardierten Wellen sind gestrichelt dargestellt). Wenn wir uns dem Zeitpunkt null nähern, so schrumpft die avancierte Kugelwelle des ersten Elektrons zu einem Punkt. Gleichzeitig nähern sich diesem Elektron von allen Seiten die avancierten Wellenfronten der anderen Elektronen und überstreichen es zum Zeitpunkt null. Da es sehr viele avancierte Wellen sind, ergibt deren Überlagerung eine Kugelwelle, die sich synchron mit der avancierten und später der retardierten Welle des ersten Elektrons bewegt und mit dieser überlagert.

Und jetzt kommt die Überraschung: Feynman rechnete aus, dass sich bei negativen Zeiten die avancierten Wellen der anderen Elektronen und die avancierte Welle des ersten Elektrons in dessen Nähe gegenseitig auslöschen. Bei positiven Zeiten verstärken sie jedoch die retardierte Welle des ersten Elektrons (rechtes Bild in [Abb. 2.7](#)). Es sieht in Summe so aus, als würde

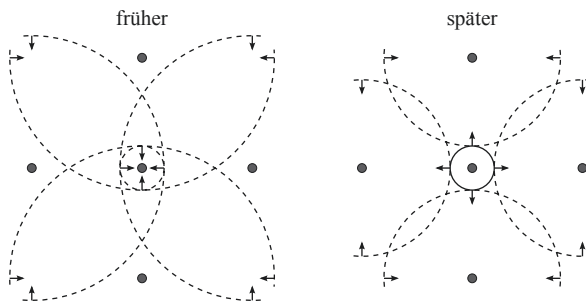


Abb. 2.7 Retardierte und avancierte Wellen bei vier absorbierenden Elektronen. Details siehe Haupttext.

das erste Elektron gar keine avancierte Welle in die Vergangenheit aussenden, sondern nur eine retardierte Welle in die Zukunft – genau so, wie man das von einer vibrierenden Ladung erwartet, die Energie abstrahlt. Die avancierte Rückantwort der anderen Ladungen sorgt also dafür, dass das vibrierende Elektron Energie verliert und einen entsprechenden Strahlungswiderstand erfährt – ganz ohne Selbstwechselwirkung. Der scheinbar paradoxe Ansatz hatte ein vernünftiges Gesamtergebnis geliefert!

Eines erscheint allerdings merkwürdig: Obwohl der gesamte Ansatz zeit-symmetrisch ist, scheint das Endergebnis der Wellenüberlagerung eine Zeitrichtung zu bevorzugen. Es sieht in Summe so aus, als ob das vibrierende erste Elektron eine Welle in die Zukunft aussendet, die von den anderen Elektronen absorbiert wird.

Würden wir uns das Ganze zeitlich rückwärts ansehen, so sähen wir folgendes: Alle Elektronen bis auf das erste senden koordiniert im richtigen Moment je eine Kugelwelle aus, die in ihrer Überlagerung so aussehen wie eine einzige Kugelwelle, die sich um das erste Elektron zusammenzieht und zur Zeit null von diesem absorbiert wird. Physikalisch ist das möglich. Es ist aber sehr unwahrscheinlich, denn es erfordert die koordinierte Aktion sehr vieler Elektronen. Hier wird deutlich, woher die zeitliche Asymmetrie kommt, die wir normalerweise beobachten: Der zeitlich umgekehrte Vorgang ist nicht verboten, aber er ist aufgrund der vielen beteiligten Teilchen so unwahrscheinlich, dass wir ihn in der Realität nie sehen. Damit befindet sich die Theorie von Feynman und Wheeler genau auf einer Linie mit anderen Erklärungen für die Ausbildung des Zeitpfeils, wie wir sie beispielsweise aus der Thermodynamik kennen.

Feynmans und Wheelers Theorie sah also vielversprechend aus. Feynman steckte noch weiteren Aufwand hinein, um seine Idee an einer Vielzahl von Beispielen zu erproben. Welche Anforderungen musste man an die Verteilung der umgebenden anderen Elektronen genau stellen? Machten die avancierten Wellen wirklich keine Probleme, die mit der Erfahrung in Widerspruch standen? Doch es schien alles wunderbar aufzugehen – die Theorie funktionierte.

Elektrodynamik ohne Felder und das Prinzip der kleinsten Wirkung

Bei ihren Untersuchungen stießen Feynman und Wheeler auf eine bemerkenswerte Eigenschaft ihrer Theorie: Man konnte sie über das Prinzip der kleinsten Wirkung formulieren, wobei die Wirkung nur von den Bahnen aller

Elektronen abhing und keinerlei elektromagnetische Felder mehr enthielt. Die Bahnen der Elektronen würden sich in der Realität dann so einstellen, dass diese Wirkung minimal wird.

Das war genau das ursprüngliche Ziel, das Feynman im Sinn gehabt hatte: Das elektromagnetische Feld sollte als Vermittler der Kräfte verschwinden und durch die Fernwirkung der Ladungen untereinander ersetzt werden. Wenn man retardierte und avancierte Felder gleichberechtigt verwendet, so kann man erreichen, dass die Felder schließlich komplett verschwinden und nur noch zeitlich verzögerte Wechselwirkungen der Ladungen untereinander existieren.

Die Bahnen der geladenen Teilchen sind dabei sehr eng miteinander verwoben, denn die Position einer Ladung zu einer bestimmten Zeit beeinflusst die anderen Ladungen zu Zeitpunkten, die sowohl in der Zukunft als auch in der Vergangenheit liegen, wobei sich der Einfluss mit Lichtgeschwindigkeit vorwärts und rückwärts in der Zeit ausbreitet. Diese Ladungen üben nun ihrerseits Einflüsse auf alle anderen Ladungen aus usw., sodass insgesamt ein sehr dichtes Netz von gegenseitigen Einflüssen entsteht (Abb. 2.8). So etwas mit Bewegungsgleichungen zu erfassen, mit denen man sich in winzigen Schritten von Zeitpunkt zu Zeitpunkt vorwärts hangelt, ist sehr schwierig. Es erfordert die Einführung von Hilfsvariablen, die man wieder als spezielle Felder interpretieren kann und die eine Art Buchführung über das Gewirr der wechselseitigen Einflüsse ermöglichen. Das Prinzip der kleinsten Wirkung ist dagegen für eine solche Situation wie geschaffen und braucht diese Hilfsfelder nicht. Es erfasst

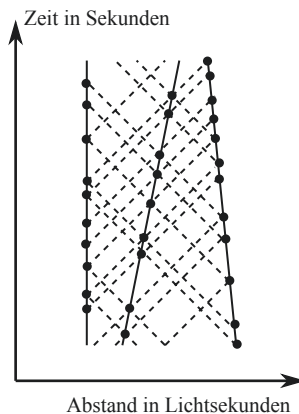


Abb. 2.8 Wechselwirkungsnetz zwischen drei Elektronen (durchgezogene Linien) nach der Theorie von Feynman und Wheeler. Die Wechselwirkungen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit in die Zukunft und in die Vergangenheit aus (gestrichelte diagonale Linien).

die kompletten Teilchenbahnen in Raum und Zeit in einer einzigen Formel und fordert dann, dass das gesamte Ensemble von Bahnen eine bestimmte Eigenschaft aufweisen soll – nämlich eine minimale Gesamtwirkung.

Offenbar lässt sich die Elektrodynamik auf ganz unterschiedliche Weise formulieren. Man kann Felder verwenden und diesen die wechselseitigen Einflüsse der Ladungen gewissermaßen aufprägen, sodass sie als Vermittler wirken. Man kann aber auch auf die Felder verzichten und über das Prinzip der kleinsten Wirkung eine Bedingung an die Bahnen der Ladungen in Raum und Zeit stellen. Das zeigt sehr schön, wie nützlich Feynmans Sichtweise über theoretische Konstrukte in der Physik ist: Statt zu fragen, ob elektromagnetische Felder *real* sind, fragt er, wie nützlich sie sind, und kommt je nach Formulierung zu unterschiedlichen Ergebnissen: In der einen Formulierung sind sie unverzichtbar und in der entsprechenden Vorstellungswelt dann auch gewissermaßen real. In der anderen Sichtweise tauchen sie dagegen gar nicht erst auf. Die Frage, ob Felder real sind, ist also gegenstandslos und führt zu nichts.

Es ist schon ein wenig merkwürdig, dass sich ein so fundamentales Gebiet wie die Elektrodynamik auf so unterschiedliche Weise mathematisch ausdrücken lässt. Ganz ähnlich ist es auch bei der Mechanik, wenn wir an Newtons Gesetze, Lagranges Formulierung oder das Prinzip der kleinsten Wirkung denken. Bei der Quantenmechanik wird sich dies ebenfalls wiederholen. Und moderne Theorien wie die Stringtheorie leben geradezu davon, dass sie verschiedene sogenannte *duale* Formulierungen besitzen, denen man ihre Gleichwertigkeit kaum ansieht. Was bedeutet das? „Keine Ahnung“, sagt Feynman in seiner Nobelpreisrede und spekuliert, dass es ein Zeichen für Einfachheit sein könnte: „Vielleicht ist etwas einfach, wenn man es auf vollkommen verschiedene Arten vollständig beschreiben kann, ohne dass man auf Anhieb merkt, dass es sich um dieselbe Sache handelt.“ Ein faszinierender Gedanke, zu dem das letzte Wort noch lange nicht gesprochen ist!

Monster Minds – Auge in Auge mit den Geistesgrößen

Schließlich war Feynmans und Wheelers alternative Formulierung der Elektrodynamik so weit ausgereift, dass man sie einem größeren Publikum vorstellen konnte. Wheeler bat Feynman, ein entsprechendes Seminar abzuhalten, um Übung im Präsentieren wissenschaftlicher Ergebnisse zu bekommen, und arrangierte zusammen mit Eugene Wigner einen Termin. Es war Feynmans erstes Seminar dieser Art.

Wenige Tage vor dem Seminar traf Feynman auf Wigner und erfuhr, dass Wigner den bekannten Astronomen Henry Norris Russell eingeladen hatte.

Doch nicht nur das: auch John von Neumann würde zu dem Seminar kommen. Von Neumann war ein berühmter Mathematiker und Mitbegründer der Informatik, der ebenso wie Einstein am nahegelegenen Institute of Advanced Study arbeitete.

Feynman wurde langsam nervös, aber es ging noch weiter: Auch Wolfgang Pauli (Abb. 2.9) war eingeladen – er war einer der genialsten Physiker der damaligen Zeit und hatte entscheidende Beiträge zur Quantentheorie geleistet. Und damit nicht genug: sogar der große Albert Einstein würde zum Seminar erscheinen.

Feynman war mittlerweile ziemlich blass geworden, sodass Wigner ihn beruhigte: er sei ja auch noch da und werde notfalls die Fragen beantworten.

Schließlich kam der große Tag und Feynman füllte vor Seminarbeginn die Tafeln mit komplizierten Formeln, um sich an irgendetwas orientieren und festhalten zu können. Feynman war sehr nervös – diese Geistesriesen würden ihn durch den Fleischwolf drehen! Doch als das Seminar begann und er sich auf die Physik konzentrieren musste, fiel alle Nervosität von ihm ab. Es war ihm egal, wer in dem Raum saß – nur die physikalischen Ideen zählten noch. Diese Fähigkeit behielt Feynman sein Leben lang bei. Sie war sicher eine der Hauptgründe dafür, warum seine Vorträge so einzigartig waren.

Als Feynman seinen Vortrag beendet hatte und die Fragerunde begann, war Pauli der erste, der seine Bedenken äußerte. Er war als scharfer Kritiker



Abb. 2.9 Paul Dirac (1902–1984, links), Wolfgang Pauli (1900–1958, Mitte) und Rudolf Peierls (1907–1994, rechts) bei einer Konferenz in Birmingham (© Science Museum London/Science and Society Picture Library)

bekannt. Einstein war dagegen der neuen Theorie gegenüber aufgeschlossen. Vor vielen Jahren hatte er sich selbst mit der Zeitsymmetrie der Elektrodynamik befasst. In einem Disput mit dem Schweizer Mathematiker und Physiker Walter Ritz hatte er den Standpunkt vertreten, dass die fundamentalen Gesetze der Elektrodynamik keine Zeitrichtung bevorzugen. Ritz war anderer Ansicht gewesen: Seiner Meinung nach musste man auf avancierte Felder verzichten – dadurch wäre die Elektrodynamik eine der Ursachen für den prinzipiellen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft. In einer gemeinsamen Publikation aus dem Jahr 1909 mit dem Titel *Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems* schreiben sie:

„Ritz betrachtet die Einschränkung auf die Form der retardierten Potenziale als eine der Wurzeln des zweiten Hauptsatzes, während Einstein glaubt, dass die Nichtumkehrbarkeit ausschließlich auf Wahrscheinlichkeitsgründen beruhe.“

Dabei steht der sogenannte zweite Hauptsatz der Wärmelehre für die Auszeichnung einer Zeitrichtung, während die retardierten Potenziale für die Felder und Wellen stehen, die sich von einer Ladung ausgehend nur in die Zukunft ausbreiten. Die Theorie von Feynman und Wheeler unterstützte also Einsteins damalige Ansichten. Allerdings gab Einstein im Seminar auch zu bedenken, dass man wohl Schwierigkeiten hätte, Feynmans und Wheelers Theorie auf die Gravitation zu übertragen. Dort ist die Krümmung von Raum und Zeit als Vermittler der Kräfte so tief verankert, dass sie sich wohl kaum entfernen ließe.

Feynman bedauerte es später, dass er sich nicht mehr an Paulis Einwände erinnern konnte – er war damals einfach nur froh gewesen, dass er nicht darauf antworten musste. Womöglich waren diesem erfahrenen Quantenphysiker einige Probleme aufgefallen, die Feynman erst später bemerken würde, als er versuchte, seine Theorie in eine Quantentheorie zu übersetzen. Nach dem Ende des Seminars wandte sich Pauli noch einmal an Feynman und fragte ihn, was Wheeler in dem geplanten Folgeseminar über die Quantenversion ihrer Theorie sagen würde. Wheeler hatte vorgehabt, relativ zügig diese Quantentheorie nach bewährten Vorbildern auszuarbeiten und zu präsentieren. Feynman musste zugeben, dass er es nicht wusste, da Wheeler ihm noch nichts darüber verraten hatte.

„Oh?“ sagte Pauli darauf hin. „Der Mann arbeitet daran und sagt seinem Assistenten nicht, was er bezüglich der Quantentheorie tut?“ Dann kam er näher und flüsterte geheimnisvoll: „Wheeler wird dieses Seminar niemals abhalten.“ Er sollte Recht behalten, denn Wheeler fand keinen Weg, wie sich eine Quantenversion ihrer Theorie formulieren ließ. Auch Feynman gelang es

letztlich nicht, dieses Problem befriedigend zu lösen. Die Arbeit daran sollte ihm jedoch völlig neue Einsichten in die Struktur von Quantentheorien ermöglichen, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden.

2.3 Die Wirkung in der Quantenmechanik

Feynman und Wheeler war es also tatsächlich gelungen, die unendliche Selbstwechselwirkung der Elektronen aus der klassischen Elektrodynamik zu verbannen. Dafür hatten sie einen Preis bezahlt: Sie mussten auf das gemeinsame elektromagnetische Feld aller Ladungen verzichten und es war schwierig, so etwas wie Bewegungsgleichungen für die geladenen Teilchen zu formulieren. Immerhin hatten sie eine Wirkung erhalten, die für die physikalisch realisierten Bahnen ein Minimum annimmt.

Den ersten Schritt seiner Idee hatte Feynman also zusammen mit Wheeler umsetzen können. Nun musste der zweite Schritt folgen: die Übersetzung ihrer Theorie in eine Quantentheorie. Schließlich wollte Feynman ja die Unendlichkeiten in der Quantenelektrodynamik beseitigen und damit das Kernproblem dieser Theorie lösen.

Dieses Vorhaben erwies sich allerdings als schwierig. Nachdem es dem erfahreneren Wheeler nicht gelungen war, eine Quantenversion ihrer Theorie zu formulieren, machte sich auch Feynman an dieses Problem heran. Doch auch er kam nicht weiter – an Paulis Bedenken war offenbar etwas dran! Die damals bekannten Kochrezepte, mit denen sich eine klassische Theorie normalerweise in eine Quantentheorie umwandeln lässt, funktionierten einfach nicht. Sie setzen nämlich voraus, dass man für die Dynamik alle Teilchen zur selben Zeit betrachten kann. In der klassischen Mechanik kann man beispielsweise simultan die kinetischen und die potenziellen Energien aller Teilchen zu einem Zeitpunkt berechnen, die Differenz bilden und dann die Summe (genauer: das Zeitintegral) über alle Zeitpunkte ausrechnen – schon hat man die Wirkung der Teilchenbahnen.

Bei der Wirkung von Wheeler und Feynman geht das nicht, denn sie verknüpft die Orte und Geschwindigkeiten der Teilchen zu *verschiedenen* Zeitpunkten miteinander. Das liegt daran, dass sich jeder Teilchenort wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit nur mit einer zeitlichen Verzögerung (oder mit einem zeitlichen Vorlauf) auf alle anderen Teilchen auswirkt. Man muss also die Positionen vieler Teilchen zu unterschiedlichen Zeiten simultan berücksichtigen. Das ist in der Standardversion der Quantenmechanik nicht vorgesehen.

Diracs geniale Idee

Feynman probierte viele Ideen aus, doch er half alles nichts. Da kam ihm der Zufall zu Hilfe: Im Frühjahr 1941 ging er eines Abends zu einer Party in die Nassau-Taverne in Princeton, wo er auf den deutschen Physiker Herbert Jehle traf. So wie viele andere war auch er vor dem Naziterror in Deutschland geflohen. Sie kamen ins Gespräch und Feynman fragte den gut zehn Jahre älteren Jehle, ob er einen Weg wüsste, wie man eine Quantentheorie direkt auf der Wirkung aufbauen könnte – eine Wirkung hatten Feynman und Wheeler ja für ihre Theorie schon gefunden.

Jehle kannte keinen solchen Weg – niemand kannte ihn damals – doch ihm fiel etwas anderes ein: Paul Dirac hatte bereits im Jahr 1932 in der *Physikalischen Zeitschrift der Sowjetunion* eine Arbeit mit dem Titel *The Lagrangian in Quantum Mechanics* veröffentlicht, in der er den Zusammenhang zwischen Lagrange-Funktion und Quantenmechanik aufzeigt. Vielleicht erinnern Sie sich: In der klassischen Mechanik war die Lagrange-Funktion die Differenz zwischen der kinetischen und der potenziellen Energie eines Teilchens, und die Wirkung war das Zeitintegral über diese Funktion entlang der Bahnkurve des Teilchens. Lagrange-Funktion und Wirkung sind, wie wir schon wissen, eng miteinander verwandt!

Am nächsten Tag gingen die beiden zusammen in die Bibliothek der Universität und Jehle zeigte Feynman die Veröffentlichung von Dirac. Darin ging es um die Frage, wie sich eine Quantenwelle in Analogie zum Huygensschen Prinzip über ein sehr kurzes Zeitintervall fortentwickelt. Zur Startzeit würde demnach an jedem Ort der Quantenwelle eine winzige Elementarwelle entstehen und sich ausbreiten. Die Wellenfunktion zu einer etwas späteren Zeit an einem anderen Ort wäre dann die Überlagerung all dieser Elementarwellen.

Die spannende Frage lautete nun: Wie groß ist eine solche Elementarwelle an diesem Ort, wenn sie kurz zuvor an einem anderen Ort entstanden ist? Entscheidend ist dabei insbesondere, wie oft die Elementarwelle in der kurzen Zeitspanne auf- und abschwingt und ob eher ein Wellenberg oder ein Wellental am Zielort ankommt. Dirac hatte herausgefunden, dass die Anzahl der Schwingungen mit der Lagrange-Funktion eines Teilchens zusammenhängt, das wie die Elementarwelle in der kurzen Zeitspanne von deren Entstehungsort zum Zielort wandert. Wenn Sie die konkrete Formel einmal sehen wollen: Die Anzahl n der Schwingungen in der kurzen Zeitspanne dt ist gegeben durch $n = dt \cdot L/h$ mit der Lagrange-Funktion L und dem Planckschen Wirkungsquantum h . Mit anderen Worten: Die Elementarwelle schwingt umso öfter, je größer die Lagrange-Funktion und

je länger die Zeitspanne ist, wobei das Plancksche Wirkungsquantum den Vergleichsmaßstab festlegt. Da ist sie also: die Lagrange-Funktion, die entscheidende Zutat zur Wirkung.

Allerdings drückte sich Dirac in seiner Veröffentlichung etwas ungenau aus: Er schrieb, dass die genaue Stärke der Elementarwelle analog zu einer bestimmten Formel sei – nur was sollte *analog* bedeuten? Bedeutete es *gleich*, oder *ähnlich*, oder was sonst? Feynman wollte es sofort herausfinden, und so stürzte er sich auf die einfachste Möglichkeit, dass Dirac *gleich* gemeint haben könnte. Er ging also an eine Tafel, setzte Diracs Formel ein und verwendete, dass das Zeitintervall dt sehr klein ist. Relativ schnell sah er, dass er noch eine Konstante A einfügen musste. Wenn er diese Konstante passend wählte, so gelang es ihm tatsächlich, die quantenmechanische Schrödinger-Gleichung abzuleiten. Damit war klar, was Dirac gemeint hatte: Nicht gleich oder ähnlich, sondern *proportional*!

Als Jehle dies sah, traute er seinen Augen kaum: Offenbar hatte dieser junge amerikanische Physiker an der Tafel mal eben eine zukunftsweisende Entdeckung gemacht, was Feynman selbst vielleicht gar nicht klar war. Jehle zückte ein kleines Notizbuch und begann hastig, die Rechnung von der Tafel abzuschreiben.

Im Jahr 1946 – also erst gut fünf Jahre später – traf Feynman bei der Zweihundertjahrfeier von Princeton endlich auf Dirac und erzählte ihm von seiner damaligen Entdeckung, dass die Elementarwellen proportional zu Diracs Formel sind. „Sind sie?“ soll Dirac gesagt haben. „Ja!“ entgegnete Feynman. „Oh, das ist interessant!“ kommentierte Dirac und ging nach einer kurzen Pause seines Wegs.

Hatte der große Theoretiker es tatsächlich nicht gewusst? Schwer zu sagen – Dirac war zwar sehr wortkarg, aber er war zugleich auch ein genialer Wissenschaftler, dem die Physik des zwanzigsten Jahrhunderts viel zu verdanken hat. Es ist schwer, hinter die Fassade dieses zurückhaltenden Mannes zu blicken, der am liebsten alleine und in Ruhe nachdachte, vor sich hinarbeitete und Fragen gerne mit einem kurzen *ja* oder *nein* beantwortete.

Diracs Schweigsamkeit konnte auf seine Kollegen bisweilen recht irritierend wirken, wie die folgende kleine Anekdote zeigt: In den 1930er Jahren war der junge Paul Dirac zu einem Forschungsaufenthalt bei Niels Bohr nach Kopenhagen gereist. Der redselige Bohr wunderte sich schon bald über seinen jungen Gast und beschwerte sich bei seinem neuseeländisch-britischen Kollegen Ernest Rutherford: „Dirac sagt nie etwas!“ Rutherford erzählte ihm daraufhin eine kurze Geschichte, in der sich ein unzufriedener Kunde in einer Tierhandlung über einen Papagei beschwert, den er dort gekauft hatte: „Der Papagei sagt nie etwas!“ Der Verkäufer entschuldigt sich daraufhin mit den

Worten: „Oh, verzeihen Sie bitte. Sie wollten wohl den sprechenden Papagei haben, und ich habe Ihnen den denkenden gegeben!“

Und Denken konnte Dirac ganz gewiss. An Genialität waren sich Feynman und Dirac wohl ebenbürtig, menschlich trennten sie jedoch Welten. Robert Oppenheimer zitiert in einem Brief aus dem Jahr 1943 dazu Wigner mit den folgenden Worten: „He (Feynman) is a second Dirac, only this time human.“ Ihre charakterlichen Unterschiede hielten Feynman jedoch nicht davon ab, den sechzehn Jahre älteren Dirac für seine Fähigkeiten zu bewundern. Aus Diracs Buch *The Principles of Quantum Mechanics* hatte Feynman als junger Student die Quantenmechanik gelernt – Diracs klar strukturierte Vorgehensweise ist selbst heute noch wegweisend. Wenn Dirac etwas sagte oder aufschrieb, so hatte es Gewicht. Im Jahr 1986 sagt Feynman in seiner Dirac Memorial Lecture zu Ehren des zwei Jahre zuvor verstorbenen Diracs: „Als ich ein junger Mann war, war Dirac mein Held. Ihm gelang ein Durchbruch, eine neue Methode, Physik zu betreiben. Er hatte den Mut, die Form einer Gleichung einfach zu erraten – die Gleichung, die wir heute als Dirac-Gleichung bezeichnen – und erst später zu versuchen, sie zu interpretieren.“ Das war genau der Stil, den auch Feynman bevorzugte: Versuche, die Lösung intuitiv zu erraten, und kümmere dich erst später um die Details.

Pfadintegrale: ein neuer Zugang zur Quantentheorie

Dank Dirac hatte Feynman nun also eine Verbindung zwischen der quantenmechanischen Wellenfunktion und der klassischen Lagrange-Funktion in der Hand. Konnte er damit auch eine Verbindung zwischen Quantenwellen und der klassischen Wirkung herstellen? Nun, für die Wirkung muss man die Lagrange-Funktion über die Zeit aufintegrieren, d. h., man darf sich nicht nur auf ein sehr kurzes Zeitintervall beschränken, sondern muss auch längere Zeitabschnitte betrachten. Feynman dachte in den Tagen nach seinem Treffen mit Jehle darüber nach, wie sich das bewerkstelligen ließ, und erkannte schließlich die Lösung: Wenn man sehr viele kurze Zeitintervalle aneinanderfügt und sich so von einem Punkt zum nächsten Punkt, dann weiter zu einem anderen Punkt usw. hangelt, so summieren sich die Schwingungszahlen der einzelnen Elementarwellen, die die Punkte miteinander verbinden (Abb. 2.10). Bei unendlich vielen infinitesimalen Zeitintervallen wird aus der Summe dann ein Zeitintegral über die Lagrange-Funktion entlang des Weges durch die betrachteten Punkte, und das ist dann genau die Wirkung S dieses Weges.

Die Situation ist nun vollkommen analog zu der Betrachtung, die wir beim Fermatschen Prinzip in Abschn. 1.2 kennengelernt haben: Angenommen,

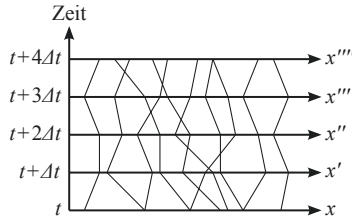


Abb. 2.10 Entstehung des Pfadintegrals bei einer Raumdimension

eine Quantenwelle startet an einem Ort A und wir wollen berechnen, welchen Wert sie später an einem Ort B aufweist. Dann können wir alle Wege zwischen den beiden Punkten A und B betrachten. Jeder dieser Wege liefert einen Wellenbeitrag zum Wert der Quantenwelle am Ort B – die Quantenwelle durchläuft in diesem Sinn alle möglichen Wege zwischen den beiden Punkten. Ob ein Weg am Endpunkt B einen Wellenberg oder ein Wellental zum Gesamtwert der Welle beisteuert, hängt davon ab, wie viele Schwingungen dieser Wellenbeitrag aufweist. Feynman sagt nun, dass es n Schwingungen sind mit $n = S/\hbar$.

Die klassische Wirkung S eines jeden Wegs, angegeben als Vielfaches des Planckschen Wirkungsquantums \hbar , legt also fest, ob dieser Weg am Endpunkt einen Wellenberg, ein Wellental oder etwas dazwischen zur Gesamtwelle beiträgt. Die Summe all dieser Wege-Wellenbeiträge – das sogenannte *Pfadintegral* – bestimmt dann den Wert der Wellenfunktion am gemeinsamen Endpunkt der Wege.

Eigentlich hätte man dieses Ergebnis auch fast erraten können, wenn man sich das Fermatsche Prinzip noch einmal genauer ansieht. Erinnern wir uns:

Wenn die möglichen Lichtwege sehr viel länger als die Lichtwellenlänge sind und ein Kontinuum an Wegen möglich ist (Grenzfall der geometrischen Optik), so wählt das Licht den schnellsten Weg zwischen zwei Punkten, also denjenigen Weg, den es in der kürzestmöglichen Zeit zurücklegen kann.

Dieses Gesetz folgte aus der Tatsache, dass eine Lichtwelle im obigen Sinne alle möglichen Wege zwischen zwei Punkten nimmt und dass sich die einzelnen Wege-Wellenbeiträge am Endpunkt überlagern, wobei die Lichtlaufzeit eines jeden Wegs darüber entscheidet, ob der Weg am Endpunkt einen Wellenberg, ein Wellental oder etwas dazwischen zur Gesamtwelle beiträgt.

In der klassischen Mechanik tritt an die Stelle des Fermatschen Prinzips das Prinzip der kleinsten Wirkung: Ein Teilchen wählt die Flugbahn mit der kleinsten Wirkung zwischen zwei Punkten, wobei Start- und Ankunftszeit vorgegeben sind. Die Lichtlaufzeit wird also durch die Wirkung des Weges ersetzt. Wenn man nun annimmt, dass auch das Prinzip der kleinsten Wirkung

sich durch die Überlagerung von vielen Wege-Wellenbeiträgen ergibt, so muss die Zahl der Schwingungen für den jeweiligen Weg proportional zu dessen Wirkung sein. Genau das hat Feynman herausgefunden.

Feynmans Ergebnis geht allerdings noch darüber hinaus, denn er konnte die Zahl der Schwingungen eines Wege-Wellenbeitrags exakt angeben: Sie ist gleich der Wirkung, angegeben als Vielfaches des Planckschen Wirkungsquantums. Mit anderen Worten: Der Wellenbeitrag eines Weges schwingt so oft auf und ab, wie die Wirkung des Weges Plancksche Wirkungsquanten enthält.

Damit wird auch klar, wann die Beschreibung einer Teilchenbewegung durch eine klassische Teilchenbahn nicht mehr ausreicht, sondern durch eine Quantenwelle ersetzt werden muss: Wenn die relevanten Wege so kurz sind, dass ihre Wirkung nur noch die Größe von wenigen Planckschen Wirkungsquanten hat, dann sind all diese Wege ungefähr gleich wichtig. Das ist beispielsweise für die Bewegung eines Elektrons in einem Atom der Fall. Jeder relevante Weg in einem Atom liefert einen Wellenbeitrag, der nur maximal einige wenige Schwingungen umfasst. Wenn es nur wenige Schwingungen gibt, werden Welleneffekte sichtbar!

Wenn jedoch im sogenannten klassischen Grenzfall die Wege lang sind und ihre Wirkung sehr viel größer als das Plancksche Wirkungsquantum ist, ändert sich das: Die Wirkungen benachbarter Wege unterscheiden sich dann meist um deutlich mehr als das Plancksche Wirkungsquantum voneinander, sodass die Wege fast wie zufällig mal Wellenberge und mal Wellentäler am gemeinsamen Endpunkt beisteuern und sich daher weitgehend gegenseitig auslöschen. Nur diejenigen Wege, die in der unmittelbaren Nachbarschaft des Wegs mit der kleinsten Wirkung liegen, haben sehr ähnliche Wirkungen und damit ähnliche Wellenamplituden, die einander verstärken können. Das Teilchen nimmt also im Wesentlichen den Weg mit der kleinsten Wirkung und wir beobachten eine klassische Teilchenbahn. Es ist exakt dieselbe Argumentation wie bei der Erklärung der klassischen Lichtstrahlen durch das Fermatsche Prinzip in [Abschn. 1.2](#).

An dieser Stelle möchte ich noch eine kleine Zusatzbemerkung einfügen – sie richtet sich an diejenigen Leser, die sich schon tiefer mit Mathematik und Physik auskennen, insbesondere mit komplexen Zahlen (ansonsten können Sie den folgenden Absatz auch problemlos überspringen):

Wenn man es genau nimmt, so genügt es bei Quantenwellen nicht, von Wellenbergen und Wellentälern zu reden, denn Quantenwellen sind durch komplexe Zahlen an jedem Ort gegeben, die man sich als Pfeile oder Uhrzeiger in einer zweidimensionalen Ebene vorstellen kann – wir sind in Kap. 1 kurz darauf eingegangen. Man muss also statt einer Wellenhöhe überall Pfeillängen und Drehwinkel angeben. Jeder Weg steuert einen solchen Pfeil

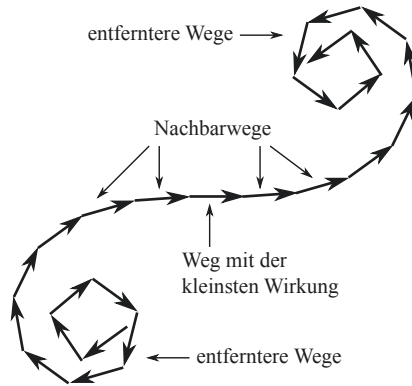


Abb. 2.11 Summe der Wellenfunktionspfeile der verschiedenen Wege an ihrem gemeinsamen Endpunkt, siehe Text. Feynman hat solche Bilder immer wieder verwendet, um zu erklären, wie sich das Prinzip der kleinsten Wirkung aus der Quantenmechanik ergibt.

am Endpunkt bei, dessen Drehwinkel durch die Wirkung des Wegs bestimmt ist. Die Gesamtwellen am Endpunkt ist dann die Summe all dieser Pfeile, wobei man für die Summenbildung die Pfeile alle aneinanderfügen muss. Wie man in [Abb. 2.11](#) sieht, ist es der Weg mit der kleinsten Wirkung und seine unmittelbaren Nachbarwege, die im klassischen Grenzfall den Hauptbeitrag liefern. Bei den entfernteren Wegen drehen sich die Pfeile von Weg zu Weg immer schneller, je weiter weg sie vom Weg mit der kleinsten Wirkung liegen, denn die Wirkung dieser Wege wächst zunehmend schneller an. In Summe ergeben sie keinen nennenswerten Beitrag mehr, denn ihre aneinandergefükten Wellenfunktionspfeile kringeln sich in der Grafik spiralförmig ein.

Mit seinen Pfadintegralen war es Feynman gelungen, einen vollkommen neuen Zugang zur Quantenmechanik zu finden, der in vielen Aspekten deutlich eleganter war als die bis dahin bekannten Formulierungen. Hat man erst die Wirkung einer klassischen Theorie gefunden, so sollte sich über die Pfadintegrale die zugehörige Quantentheorie formulieren lassen. Dabei war glasklar zu sehen, wie sich das Prinzip der kleinsten Wirkung der klassischen Theorie aus der Quantentheorie ergibt – nämlich genauso, wie sich das Fermatsche Prinzip für Lichtstrahlen aus der Wellenbeschreibung von Licht ableitet.

Feynmans Formulierung hat noch einen weiteren Vorteil, der besonders zum Tragen kommt, wenn man die Spezielle Relativitätstheorie einbezieht: Die Formulierung basiert nicht auf Differenzialgleichungen wie beispielsweise der Schrödinger-Gleichung, mit denen man die zeitliche Änderung eines Systems zu jedem Zeitpunkt beschreibt. Solche Differenzialgleichungen setzen nämlich voraus, dass man das System im Raum zu einer bestimmten Zeit angeben kann,

beispielsweise durch eine Wellenfunktion. In der Speziellen Relativitätstheorie hängt es jedoch vom Bewegungszustand eines Beobachters ab, welche Ereignisse in Raum und Zeit für ihn gleichzeitig geschehen. Jeder Beobachter sieht in der Raumzeit andere „Scheiben“ der Gleichzeitigkeit. Wenn also ein Beobachter eine Wellenfunktion im Raum zu einer bestimmten Zeit angibt, so ist diese Wellenfunktion für einen anderen Beobachter so nicht zu gebrauchen, denn für ihn umfasst sie Raumpunkte zu verschiedenen Zeiten. Das führt natürlich zu Komplikationen, denn man sieht nicht auf Anhieb, wie man die Wellenfunktion zwischen verschiedenen Beobachtern umrechnen muss, damit sie für diese Beobachter nur Raumpunkte zu einer festen Zeit umfasst.

Bei Feynmans Formulierung gab es dieses Problem nicht, denn sie basiert auf den kompletten Wegen in Raum und Zeit. Es ist leicht, diese Wege zwischen verschiedenen Beobachter-Perspektiven (man sagt auch „Bezugssystemen“) hin und her zu rechnen, sodass Feynmans Pfadintegrale wie geschaffen dafür sind, die Spezielle Relativitätstheorie mit einzubeziehen.

Etwas stimmt nicht

Feynman war also zuversichtlich, dass sich mit seiner Methode die Probleme der Quantenelektrodynamik lösen ließen, für die ja das Einbeziehen der Speziellen Relativitätstheorie unerlässlich ist. Ausgerüstet mit der neuen Wirkung für Elektronen ohne Selbstwechselwirkung machte er sich ans Werk – und stieß schon wieder auf Probleme. Es war beispielsweise schwierig, den Spin der Elektronen – also ihren Quanteneigendrehimpuls – konsistent zu berücksichtigen. Außerdem führte der Umstand, dass in Feynmans Wirkung mehrere Zeitpunkte simultan berücksichtigt wurden, dazu, dass man nicht mehr mit Wellenfunktionen arbeiten konnte. Das Gesamtsystem aus wechselwirkenden Elektronen ließ sich nicht mehr zu jeder festen Zeit durch eine Wellenfunktion beschreiben.

Doch Feynman fand einen Ausweg: Es war gar nicht nötig, solche Wellenfunktionen komplett in Raum und Zeit anzugeben, sondern man musste sich das Ganze als Streuprozess vorstellen. Quantenmechanische Streuprozesse waren bekanntlich Wheelers Spezialgebiet, und Feynman hatte von ihm insbesondere gelernt, dass sich praktisch jedes quantenmechanische Problem als Streuprozess behandeln lässt.

Bei einem Streuprozess beschießt man typischerweise ein System – beispielsweise ein Atom – mit energiereichen Teilchen und misst mit einem Detektor, in welchen Richtungen dieses oder andere Teilchen den Kollisionspunkt verlassen bzw. „gestreut“ werden. Man kann auch schnelle Teilchen direkt

aufeinander schießen. Am Large Hadron Collider LHC lässt man sehr energiereiche Protonen miteinander kollidieren und interessiert sich beispielsweise für die Frage, ob dabei zwei hochenergetische Photonen entstehen, welche Energie diese haben und in welche Richtungen sie die Wechselwirkungszone verlassen. Wenn nämlich beispielsweise bei der Kollision zweier Protonen ein kurzlebiges Higgs-Teilchen entsteht und direkt wieder in zwei Photonen zerfällt, so besitzt dieses Photonenpaar eine charakteristische Gesamtenergie, die der Masse des Higgs-Teilchens entspricht. Auf diese Weise ist im Jahr 2012 das Higgs-Teilchen entdeckt worden (Abb. 2.12).

Der Vorteil bei Streuprozessen ist, dass man sich nicht dafür interessiert, wann die Teilchen abgeschossen, aufeinandertreffen oder vom Detektor registriert werden. Der genaue zeitliche Ablauf spielt keine Rolle. Daher kann man auf eine Wellenfunktion verzichten, die diesen zeitlichen Ablauf darstellt. Es genügt, quantenmechanische Wahrscheinlichkeiten für das Gesamtexperiment anzugeben, also beispielsweise dafür, dass bei der Kollision der Protonen am LHC zwei Photonen in bestimmte Richtungen ausgesendet werden.

Es sah also zeitweise ganz so aus, als ließen sich mit der Betrachtung als Streuprozess alle Probleme in den Griff kriegen. Doch dann schlich sich bei Feynman langsam das Gefühl ein, dass irgendetwas immer noch nicht stimmte. In seinem Nobelpreisvortrag drückt er es so aus: “I got a kind of funny feeling that things weren’t exactly right.”

Im Jahr 1942 veröffentlichte Feynman dann seine Doktorarbeit mit dem Titel *The Principle of Least Action in Quantum Mechanics*, in der er seinen

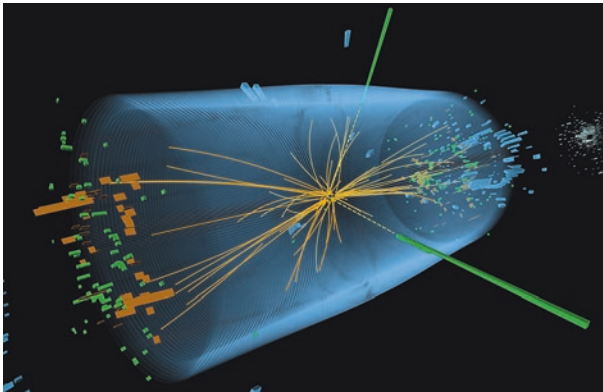


Abb. 2.12 Kollisionsereignis im CMS-Detektor am LHC mit zwei erzeugten hochenergetische Photonen (helle Linien nach oben und rechts unten), die beim Zerfall eines unmittelbar zuvor entstandenen Higgs-Teilchens emittiert wurden (© CERN, CMS-Experiment; siehe auch <http://cms.web.cern.ch/news/observation-new-particle-mass-125-gev>)

neuen Zugang zur Quantenmechanik über das Pfadintegral darlegt. Die konkrete Anwendung auf die Quantenelektrodynamik bleibt darin noch außen vor. Während des Krieges hatte er auch wenig Zeit, sich intensiver mit dem Thema auseinanderzusetzen, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden. Dennoch gelang es ihm, sein merkwürdiges Gefühl zu konkretisieren: Einige Dinge liefen tatsächlich verkehrt – sie waren sogar fatal!

So lieferte die Quantentheorie mit der Wirkung von Feynman und Wheeler Energiewerte, die durch komplexe Zahlen beschrieben werden mussten. Doch auch in der modernen Physik müssen Energien ganz gewöhnliche reelle Zahlen sein. Komplexe Energiewerte sind ein Zeichen für Instabilitäten in der Theorie. Außerdem zeigte es sich, dass sich Wahrscheinlichkeiten nicht zu 100 % aufaddierten. Die Wahrscheinlichkeit, dass *irgendetwas* geschah – egal was, gegebenenfalls auch gar nichts – war also nicht 100 %. Das konnte nicht sein. Wolfgang Pauli schien mit seinen Bedenken, die er im Seminar geäußert hatte, Recht zu behalten.

Nach dem Krieg würde sich Feynman erneut diesen Problemen zuwenden und dabei seine Herangehensweise an die Quantenelektrodynamik immer weiter ausarbeiten. Es würde ihm zwar nicht gelingen, seinen und Wheelers Ansatz einer Wirkung ohne Selbstwechselwirkung in die Quantentheorie zu retten, aber sein halbintuitives Pfadintegralverfahren würde sich auf andere Weise als sehr nützlich erweisen.

Zunächst standen jedoch andere Dinge im Vordergrund. Amerika befand sich im Krieg mit Deutschland und Japan. Außerdem hatte man die grundsätzliche Machbarkeit einer Atombombe erkannt. Kaum auszudenken, wenn das nationalsozialistische Deutschland eine solche Bombe entwickeln und einsetzen würde. Dem wollte Amerika zuvorkommen und startete ein gigantisches militärisches Forschungsprojekt, an dem auch Richard Feynman teilnahm.

2.4 Radioaktivität und Manhattan-Projekt

Es gibt viele gute Gründe dafür, die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts als das Zeitalter der Kernphysik zu bezeichnen. Noch heute ist die Kernphysik von einer Aura des Geheimnisvollen umgeben und sie hat nicht zuletzt durch die Atombombe und die Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima tiefe Spuren im Bewusstsein der Menschheit hinterlassen.

Dabei fing alles ganz harmlos an, als im Jahr 1896 der französische Physiker Antoine Henri Becquerel herausfand, dass Uran eine besondere Form von Strahlen aussendet, die heute als radioaktive Strahlung bekannt ist. Ähnlich wie die kurz zuvor entdeckte Röntgenstrahlung konnte auch diese Strahlung fotografische Platten schwärzen, undurchsichtige Materie durchdringen und



Abb. 2.13 Pierre und Marie Curie in ihrem Labor um das Jahr 1898. (© The Print Collector/picture alliance/Heritage Images)

Luft ionisieren. Wenig später entdeckte das Physiker-Ehepaar Marie und Pierre Curie ([Abb. 2.13](#)), dass auch das Element Thorium radioaktiv war. Außerdem entdeckten sie zwei neue Elemente, die sogar noch deutlich stärker radioaktiv strahlten als Uran oder Thorium, und taufen sie auf die Namen Radium und Polonium (Marie Curie stammte aus Polen).

Im Lauf der nächsten Jahre gelang es, die Natur dieser Strahlung zu entschlüsseln. Es handelte sich um drei verschiedene Strahlungsarten mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften: die kurzreichweitige Alphastrahlung, die aus positiv geladenen Alphateilchen (Heliumkernen) besteht, dann die sogenannte Betastrahlung, bei der es sich um hochenergetische Elektronen (und manchmal Positronen) handelt, und schließlich die durchdringende Gammastrahlung, die genau wie die Röntgenstrahlung eine elektromagnetische Welle ist, nur noch kurzwelliger und energiereicher.

Radioaktivität: Atomkerne suchen das Gleichgewicht

Im Jahr 1910 gelang es Ernest Rutherford und seinem Doktoranden Ernest Marsden, den Herkunftsort dieser Strahlung mit ihrem berühmten Streuexperiment aufzuspüren. Die Strahlung kommt aus dem Atomkern, dem winzigen positiv geladenen Zentrum eines jeden Atoms, zehntausendmal

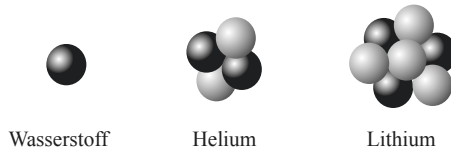


Abb. 2.14 Die häufigsten Atomkerne der ersten drei Elemente im Periodensystem. Protonen sind als dunkle, Neutronen als helle Kugeln dargestellt. Es gibt auch Wasserstoff mit einem oder zwei Neutronen oder Helium mit nur einem Neutron, diese sind jedoch deutlich seltener

kleiner als das Atom selbst. Dieser Atomkern enthält das fast die gesamte Masse des Atoms und ist von den leichten, negativ geladenen Elektronen der Atomhülle umgeben.

Viele weitere Experimente waren nötig, um die Struktur der Atomkerne zu entschlüsseln (Abb. 2.14): Atomkerne bestehen aus zwei verschiedenen Teilchensorten, den positiv geladenen Protonen und den elektrisch neutralen Neutronen, wobei die Neutronen erst im Jahr 1932 durch James Chadwick nachgewiesen werden konnten. Eine sehr starke Kraft – die sogenannte starke Kernkraft oder auch starke Wechselwirkung – hält diese Teilchen gegen die elektrische Abstoßung der Protonen im Kern zusammen. Dabei besitzt die starke Kernkraft nur eine sehr kurze Reichweite, sie wirkt nur zwischen unmittelbar benachbarten Protonen bzw. Neutronen, wobei sie keinen Unterschied zwischen diesen Teilchen macht. Ähnlich wie die Moleküle in einem Wassertropfen werden die Protonen und Neutronen von der starken Kernkraft im Atomkern zusammengehalten – man kann sich Atomkerne daher als winzigste Flüssigkeitströpfchen vorstellen, besonders wenn sie viele Protonen und Neutronen enthalten.

Wenn Atomkerne sehr viele Protonen enthalten, macht sich die elektrische Abstoßung zwischen diesen gleichnamigen elektrischen Ladungsträgern immer stärker bemerkbar, denn diese nimmt bei wachsendem Abstand zwischen den Kernteilchen viel langsamer ab als die starke Kernkraft. Jedes Proton spürt also die elektrische Abstoßung aller anderen Protonen im Kern, wird aber nur von seinen unmittelbaren Nachbarn im Kern festgehalten. Ab einer bestimmten Protonenzahl kippt dann die Situation – die elektrische Abstoßung wird zu groß. Der Kern wird instabil und versucht, Protonen abzustößen, wobei er diese meist nicht einzeln hinauswirft, sondern ein besonders stabiles Paket aus zwei Protonen und zwei Neutronen schnürt und abstrahlt – also ein Alphateilchen (Heliumkern). Der größte gerade noch stabile Atomkern ist der von Blei mit 82 Protonen und zwischen 124 und 126 Neutronen. Wie wir sehen, kann die Anzahl an Neutronen bei einem Element variieren, denn allein

die Protonenzahl legt das chemische Element fest. Man spricht von verschiedenen Isotopen eines Elements, in diesem Fall von Blei-206, -207 und -208, wobei man durch die angehängte Zahl die Gesamtanzahl der Kernteilchen (Nukleonen) – also Protonen sowie Neutronen – angibt.

Der Ursprung der Alphastrahlung ist damit klar: große Atomkerne wollen Protonen loswerden. Bei der Betastrahlung ist das anders. Sie hat ihren Ursprung in der Umwandlung von Neutronen in Protonen, wobei ein hochenergetisches Elektron sowie ein sogenanntes Neutrino entstehen und aus dem Kern abgestrahlt werden (Abb. 2.15). Das ist günstig für Atomkerne mit sehr vielen Neutronen, denn ein Neutron ist etwas schwerer als ein Proton, sodass bei seiner Umwandlung in ein Proton plus Elektron etwas Masse in Energie umgewandelt und freisetzt wird, was den Kern stabilisiert.

Die Gammastrahlung verändert dagegen die Anzahl der Protonen und Neutronen in einem Atomkern nicht. Sie entsteht vielmehr dann, wenn ein energetisch angeregter Atomkern, der bei einem Zerfallsprozess entstanden ist und den man sich wie einen vibrierenden Wassertropfen vorstellen kann, diese Anregungsenergie in Form hochenergetischer Photonen abstrahlt. Es ist ganz ähnlich wie bei angeregten Elektronen in der Hülle eines Atoms, welche die Anregungsenergie als sichtbares Licht abstrahlen, nur dass die Photonen der Gammastrahlung aus dem Atomkern millionenfach energiereicher sind als sichtbare Lichtquanten.

Wo kommt das Photon her, das von einem Atom als Licht oder von einem Atomkern als Gammastrahlung abgestrahlt wird? Und wo kommt das Elektron her, das bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton entsteht und als radioaktive Betastrahlung wahrgenommen wird? Muss das Photon oder das Elektron dann nicht schon zuvor im Atom bzw. Atomkern vorhanden gewesen sein? Genau diese Frage stellte Richards Vater Melville seinem mittlerweile studierten Sohn, als dieser einmal seine Eltern zu Hause besuchte. Melville war immer sehr an den Naturwissenschaften interessiert gewesen, wie wir wissen, auch wenn er nie die Gelegenheit dazu hatte,

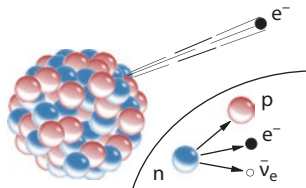


Abb. 2.15 Beim Betazerfall wandelt sich ein Neutron (n) in ein Proton (p) um, wobei ein hochenergetisches Elektron e^- und ein Neutrino abgestrahlt werden. (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta-minus_Decay.svg?uselang=de)

selbst Wissenschaftler zu werden. Nun, da sein Sohn Physiker geworden war, erhoffte er sich von ihm eine anschauliche Erklärung.

Feynman tat sich schwer damit, eine für seinen Vater zufriedenstellende Antwort zu finden.⁶ Photon und Elektron entstehen neu aus der Energie, die zur Verfügung steht. Sie sind vorher noch nicht da, nur wie kann man das anschaulich machen? Wie muss man das Ganze betrachten, damit ein Teilchen wie ein Photon oder ein Elektron herauskommen kann, ohne dass es zuvor bereits drinnen war?

Nach einigen Minuten des Nachdenkens gab Feynman auf: „I’m sorry; I don’t know. I can’t explain it to you.“ Melville war ziemlich enttäuscht – so viele Jahre des Studiums, und dann derart armselige Antworten auf so einfache Fragen. Aber mehr hat die Quantenphysik nicht zu bieten! Sie liefert keinen detaillierten Mechanismus dafür, wie ein Photon oder ein Elektron bei einem Zerfallsprozess entsteht. Alles was zählt ist, dass die Energie für die Entstehung ausreicht, dass die Erhaltungssätze für Ladungen, Impulse etc. erfüllt sind und dass man die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis berechnen kann. Es mag enttäuschend sein, aber mehr kann die Physik auf Quantenniveau nach heutigem Wissen nicht leisten. Auch ein so versierter Lehrer wie Richard Feynman konnte daran nichts ändern.

Manche Atomkerne lassen sich spalten

In den ersten drei Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts galt die Kernphysik noch eher als eine etwas exotische „reine“ Wissenschaft, fernab von ernst zu nehmenden Anwendungen. Doch das begann sich spätestens im Jahr 1938 zu ändern, als Otto Hahn (Abb. 2.16) und seinem Assistenten Fritz Straßmann am Berliner Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie der Nachweis einer vollkommen neuen Art von Kernreaktion gelang. Sie hatten Uran mit Neutronen bestrahlt und erwartet, dass diese Neutronen von den Urankernen eingefangen bzw. in ihnen stecken bleiben würden. Anschließend sollten sie sich per Betazerfall in Protonen umwandeln, sodass neue schwerere Elemente mit mehr Protonen als Uran – sogenannte Transurane – entstünden.

Man kann sich vorstellen, wie überrascht sie waren, als sie stattdessen die mittelschweren Elemente Barium und Krypton nachweisen konnten. Wo kamen diese Elemente plötzlich her?

Ein Blick auf die Protonenzahlen liefert die Antwort: Barium besitzt 56 Protonen und Krypton 36, was zusammen genau die 92 Protonen eines

⁶ Siehe in *What is Science?* auf http://www.fotuva.org/feynman/what_is_science.html (entnommen aus *The Physics Teacher* aus dem Jahr 1969),



Abb. 2.16 Lise Meitner und Otto Hahn im Labor im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie (1913). (© picture alliance/Everett Collection)

Urankerns ergibt. Offenbar waren Urankerne in zwei Teile zerplatzt, als sie von den Neutronen getroffen wurden. Die Neutronen hatten Urankerne gespalten. Damit hatte niemand gerechnet!

Physikalisch kann man sich diese Kernspaltung ungefähr folgendermaßen vorstellen, wie die damals bereits aus Deutschland vertriebene Physikerin Lise Meitner ([Abb. 2.16](#)) zusammen mit ihrem Neffen Otto Frisch kurz nach der Entdeckung vorschlug: Der Urankern ist mit seinen 92 Protonen bereits ein relativ instabiles Gebilde, das von der starken Kernkraft nur mühsam gegen die elektrische Abstoßung der 92 Protonen zusammengehalten wird und immer wieder einmal durch Abstrahlung eines Alphateilchens in das Element Thorium zerfällt. Fängt nun ein Urankern ein vorbeifliegendes Neutron ein, wird er wie ein Wassertropfen in Schwingungen versetzt. Bei einer solchen Schwingung kann die elektrische Abstoßungskraft der Protonen kurzzeitig die Oberhand über die starke Kernkraft gewinnen und den Kern in zwei Teile zerrreißen ([Abb. 2.17](#)). Die beiden Bruchstücke fliegen dann mit hoher Energie auseinander, angetrieben von ihrer sehr starken elektrischen Abstoßung. Dabei wird millionenfach mehr Energie frei als bei chemischen Reaktionen, da die im Kern wirkenden Kräfte viel größer sind als die Kräfte in der Atomhülle, die für die Chemie relevant sind.

Bei der Spaltung eines Urankerns werden neben den beiden Spaltprodukten meist auch zwei bis drei Neutronen freigesetzt. Diese können nun ihrerseits

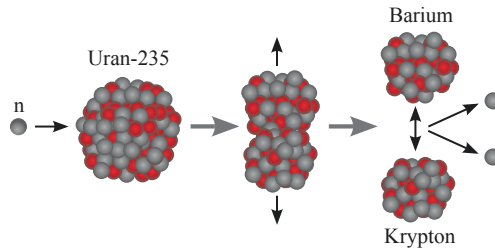


Abb. 2.17 Kernspaltung von Uran

weitere Kernspaltungen auslösen, die weitere Neutronen freisetzen usw. Wenn man also genügend spaltbares Uran ansammelt, sodass insgesamt mehr Neutronen neu entstehen als verloren gehen, so könnte eine verheerende Kettenreaktion in Gang kommen, die schlagartig wesentlich mehr Energie freisetzen würde als jede chemische Bombe.

Schon bald nach der Entdeckung der Kernspaltung wurde man sich der gewaltigen Gefahr bewusst, die von einer solchen nuklearen Atombombe ausging. Wäre das nationalsozialistische Deutschland in der Lage, eine solche Bombe zu bauen? Gut möglich – immerhin war die Kernspaltung in Berlin entdeckt worden!

Einige Physiker in Amerika waren alarmiert und sahen die Notwendigkeit, ihre Regierung über die mögliche Gefahr zu informieren. Im Juli 1939 verfasste der aus Ungarn stammende Physiker Leó Szilárd zusammen mit Edward Teller und Eugene Wigner im Namen von Albert Einstein einen entsprechenden Brief an den amerikanischen Präsidenten Franklin D. Roosevelt. Einstein war zunächst überrascht, als er von der Möglichkeit einer nuklearen Kettenreaktion erfuhr – an so etwas hatte er noch gar nicht gedacht! Wenn das Naziregime eine derart verheerende Bombe in die Hand bekäme, wäre das fatal. Einstein hatte aufgrund seiner jüdischen Abstammung und liberalen Geisteshaltung keine guten Erfahrungen mit den Nazis gemacht – früher als die meisten hatte er die verbrecherischen Absichten der Nationalsozialisten erkannt und bereits 1933 Deutschland den Rücken gekehrt.

Also unterzeichnete der ansonsten pazifistisch eingestellte Einstein den Brief und brachte damit den Stein ins Rollen.⁷ Als dann nach dem Krieg klar wurde, dass man die Gefahr einer deutschen Atombombe überschätzt hatte, bedauerte Einstein seine damalige Entscheidung: „Had I known that the

⁷ man findet den Brief sowie Einsteins späteren Kommentar dazu beispielsweise in der englischen Wikipedia unter *Einstein–Szilárd letter*

Germans would not succeed in developing an atomic bomb, I would have done nothing.“ (Hätte ich gewusst, dass die Deutschen beim Bau der Atombombe nicht erfolgreich sein würden, hätte ich gar nichts unternommen.)

Amerika baut die Bombe

Die Vereinigten Staaten waren entschlossen, den Deutschen beim Bau einer Atombombe zuvorzukommen, und starteten das Manhattan-Projekt, in das nach und nach die meisten Physiker der USA einbezogen wurden. Der wissenschaftliche Betrieb in den USA stand praktisch still und fast alle versuchten, ihren Beitrag zu leisten, um das vermeintliche Wettrennen zu gewinnen.

Im Jahr 1942 wurde auch Feynman in Princeton angesprochen. Robert (kurz: Bob) Wilson – damals Experimentalphysiker in Princeton – suchte ihn in seinem Büro auf und fragte, ob er an einem hochgeheimen Projekt zum Bau einer Atombombe mitarbeiten wolle.⁸ Zuerst war Feynman wenig begeistert, doch Wilson ignorierte seine Ablehnung: „Wir haben um drei Uhr ein Meeting – bis gleich!“

Damit hatte Wilson Feynman richtig eingeschätzt, denn dieser konnte keiner Herausforderung lange widerstehen. Die Deutschen hatten Hitler und die Möglichkeit einer Atombombe lag auf der Hand. Die Aussicht, dass die Deutschen eine solche Bombe vor den Amerikanern entwickelten, hatte etwas Furchtbares an sich. Also ging er zu dem Meeting. Um vier Uhr hatte er bereits ein eigenes Büro mit einem Schreibtisch und versuchte, auszurechnen, ob Wilsons Idee funktionieren konnte.

Worum ging es? Als wir oben gesagt haben, dass ein Neutron einen Urankern spalten kann, war das nur die halbe Wahrheit. Uran kommt nämlich in der Natur im Wesentlichen in zwei Varianten bzw. Isotopen vor: Als Uran-235 sowie als Uran-238 mit drei Neutronen mehr – die Protonenzahl ist in beiden Fällen 92, denn sonst wäre es kein Uran.

Die drei zusätzlichen Neutronen im Uran-238 stabilisieren den Atomkern, denn sie lassen die positiv geladenen Protonen etwas weiter auseinanderrücken, sodass ihre elektrische Abstoßung etwas schwächer wird. Entsprechend ist die Halbwertszeit dieses Isotops mit 4468 Milliarden Jahren recht groß (zufällig ungefähr gleich dem Alter der Erde). Von allen Uran-238-Atomen, die sich bei ihrer Entstehung auf der Erde befanden, ist also bis heute ungefähr die Hälfte zerfallen.

⁸ siehe *Los Alamos From Below* (<http://calteches.library.caltech.edu/34/3/FeynmanLosAlamos.htm>)

Uran-235 ist deutlich weniger stabil – seine Halbwertszeit ist mit rund 704 Millionen Jahren etwa sechsmal kleiner als die von Uran-238, sodass sich während der Existenz der Erde die auf ihr befindliche Uran-235-Menge gut sechsmal halbiert hat und heute nur noch $\frac{1}{64}$ oder etwas über 1 % ihrer ursprünglichen Menge beträgt. Das in der Natur vorkommende Uran besteht daher zu etwa 99,3 % aus dem stabileren Uran-238 und nur zu 0,7 % aus dem instabileren Uran-235.

Nun ist es aber gerade der instabilere Uran-235-Kern, der sich durch Neutronen gut spalten lässt – Uran-238 ist zu stabil dafür. Um eine Atombombe zu bauen, muss man daher den Anteil an spaltbarem Uran-235 künstlich erhöhen – man muss das Uran *anreichern*. Chemische Methoden kommen dafür nicht in Betracht, denn beide Uranisotope haben dieselbe Elektronenhülle und reagieren damit chemisch gleich.

Man muss die Isotope also physikalisch trennen, indem man ihre leicht unterschiedliche Masse ausnutzt. Glücklicherweise, wie man heute sagen muss, ist das nicht einfach und erfordert einen ziemlich großen technischen Aufwand. Grundsätzlich kommen dafür mehrere verschiedene Methoden infrage – eine davon hatte Wilson entwickelt.

Feynman wurde von dem neuen Projekt vollkommen in Beschlag genommen. Ein unglaublicher Aufwand wurde betrieben, um die Trennung der Uranisotope voranzubringen. Fast jeder hatte seine Forschungsarbeiten gestoppt und versuchte, mit seinem Wissen und seinen technischen Ressourcen zum Erfolg beizutragen. Auch Feynman hatte die endgültige Fertigstellung seiner Dissertation zunächst aufgeschoben, und er musste zwischendurch sechs Wochen Auszeit vom Projekt nehmen, um sie abzuschließen – Wheeler hatte darauf bestanden.

Hochzeit mit Arline

Kaum hatte er seine Doktorurkunde in den Händen, löste Feynman sein Versprechen gegenüber Arline ein und arrangierte ihre Hochzeit gegen den Widerstand seiner und ihrer Eltern. Diese sahen angesichts Arlines schwerer Tuberkulose-Erkrankung keine gemeinsame Zukunft für das junge Paar und fürchteten, Richard könne sich anstecken. Doch Richard und Arline waren anderer Meinung und weigerten sich, pessimistisch in die Zukunft zu sehen. Sie würden eine glückliche gemeinsame Zeit als verheiratetes Paar haben, und sei die Zeit auch noch so kurz!

Am Hochzeitstag ließ sich Richard einen Kombiwagen und legte eine Matratze hinein, sodass sich Arline auf der Fahrt ausruhen konnte. Dann

holte er sie ab und sie fuhren zu ihrer einsamen Hochzeits-Zeremonie, an der weder Eltern noch Bekannte teilnahmen. Für Flitterwochen war Arline bereits zu krank, und so brachte Richard seine junge Frau anschließend direkt in ein Krankenhaus nahe Princeton in New Jersey. Es bricht einem fast das Herz, wenn man sieht, wie hartnäckig sich Richard und Arline dem Schicksal entgegenstellten. Aufgrund der Ansteckungsgefahr war selbst ein Kuss gefährlich, und eine anstrengende Schwangerschaft wäre für Arline eine medizinische Katastrophe gewesen. Dennoch würde man sich wünschen, das Paar hätte mehr Unterstützung von seinen und ihren Eltern erhalten, die die Bedeutung der außergewöhnlichen Beziehung zwischen Richard und Arline wohl unterschätzt hatten. Es sollte eine Weile dauern, bis sich Richards Verhältnis insbesondere zu seiner Mutter wieder normalisieren würde – sie hatte sich in Sorge um ihren Sohn besonders vehement gegen die Heirat ausgesprochen, erkannte aber nach Arlines Tod ihren Fehler und suchte die Versöhnung mit ihrem Sohn.

Als Feynman nach der Hochzeit wieder in Princeton ankam, hatte man entschieden, Wilsons Trennungungsverfahren dort nicht weiter zu verfolgen, da andere Verfahren mehr Erfolg versprachen. Für Feynman war die Entscheidung nachvollziehbar. Er hatte selbst an entsprechenden Meetings teilgenommen und bewunderte die Effizienz, mit der Männer wie Compton, Tolman, Smyth, Urey, Rabi und Oppenheimer die Argumente abwogen und dann zügig eine rationale Entscheidung trafen. „These were very great men indeed“, schreibt er in *Los Alamos From Below*, und er war froh, dass ihm das Projekt die Gelegenheit gab, solche Männer zu treffen und mit ihnen zusammenzuarbeiten. Genau dies war der Gewinn, den Feynman aus dem Manhattan-Projekt ziehen sollte: Er würde die Chance haben, mit den bedeutendsten Physiker der damaligen Zeit zu kooperieren, und sie hatten umgekehrt die Gelegenheit, die Qualitäten des jungen Feynmans zu erkennen. Nach dem Krieg würde sich Feynman vor Angeboten verschiedener Universitäten kaum retten können.

Aufbruch nach Los Alamos

Außerdem hatte man sich dazu entschlossen, in einer abgelegenen kleinen Ortschaft namens *Los Alamos* in New Mexico nahe bei Santa Fe das Projekt zu starten, das schließlich die eigentliche Bombe bauen sollte. Da die Gebäude in Los Alamos noch nicht fertig waren, wurde Feynman von Wilson zunächst zu Enrico Fermi und Wheeler nach Chicago geschickt, wo damals viele Projektaktivitäten stattfanden. Als sich die Fertigstellung der Labors in Los

Alamos weiter verzögerte, entschloss man sich in Princeton ungeduldig dazu, dennoch nach Los Alamos aufzubrechen, denn es gab in Princeton nichts mehr zu tun – vielleicht ließ sich ja die Fertigstellung beschleunigen, wenn man erst einmal vor Ort war. Robert Oppenheimer (Abb. 2.18 rechts) hatte die wissenschaftliche Leitung, und er erwies sich als eine sehr glückliche Wahl. Er sorgte sich um jedes Mitglied seines Teams, und die Leute einschließlich Feynman liebten ihn. So kümmerte er sich auch darum, dass Arline in einem Krankenhaus im etwa 100 Meilen entfernten Albuquerque unterkam, wo Feynman sie so oft wie möglich besuchte.

Nach und nach wurden die Gebäude und Labors fertiggestellt und das Projekt nahm Fahrt auf. Feynman wurde der Theoriegruppe von Hans Bethe (Abb. 2.18 links) zugeordnet, zu dem er eine enge freundschaftliche Beziehung entwickelte. Sie ergänzten sich gut: Der 12 Jahre ältere Bethe, dessen ausgeprägten deutschen Akzent man sich auf vielen Videos im Internet anhören kann, war ruhig und besonnen, während Feynman eher impulsiv und sprunghaft reagierte. Wie Einstein war auch Bethe schon früh vor den Nazis geflohen und 1933 nach Großbritannien und später in die USA ausgewandert. In den 1930er Jahren war er einer der führenden Kernphysiker, was ihn für das Projekt besonders wertvoll machte. So hatte er im Jahr 1939 die



Abb. 2.18 Hans Bethe (1906–2005, links) und Robert Oppenheimer (1904–1967, rechts). (© picture alliance/akg images)

Kernfusionsprozesse entschlüsselt, mit denen unsere Sonne und andere Sterne ihre Energie erzeugen.

Oft gerieten Bethe und Feynman in angeregte physikalische Diskussionen, in denen Feynman wie immer komplett vergaß, mit welch herausragendem Physiker er es zu tun hatte, und Ausrufe wie „No, no, you’re crazy. It’ll go like this“ von sich gab. Doch Bethe nahm ihm dies nicht übel, denn dies war genau die Art von intensiver Diskussion, die er suchte. Bald kannten ihre Kollegen das Spiel und lästerten: „The battleship and the Mosquito boat“, wobei Feynman eindeutig nicht das „battleship“ (also Schlachtschiff) war. Auch Feynman genoss diese Diskussionen und er bewunderte Bethe für dessen Findigkeit und seinen unerschöpflichen Vorrat an nützlichen mathematischen Tricks. Bethe wusste ebenfalls, was er an Feynman hatte, und schon bald wurde Feynman Gruppenleiter eines vierköpfigen Teams.

Auch andere Physiker suchten diese Art von Diskussion mit Feynman. Als Niels Bohr und sein Sohn Aage eines Tages von Dänemark nach Los Alamos kamen, gab es zunächst große Meetings, in denen Probleme beim Bau der Bombe diskutiert wurden. Jeder wollte den berühmten Mann sehen, und die Meetings waren entsprechend voll. Feynman bekam ihn daher kaum zu Gesicht.

Am nächsten Morgen erhielt Feynman dann einen Anruf: Niels und Aage Bohr wollten gerne alleine mit ihm sprechen. Feynman war überrascht, denn er war damals nur ein junger und relativ unbedeutender Physiker. Dennoch war er dem berühmten Niels Bohr aufgefallen. Feynman ging also zu den beiden dänischen Physikern, und sie begannen ungestört über das Design der Bombe zu diskutieren. Die Bohrs hatten einige Ideen, wie man die Bombe effektiver machen könnte, und sie suchten jemanden, der nicht in Ehrfurcht vor ihnen erstarrte, sondern der offen und ehrlich seine Meinung äußerte. Da waren sie bei Feynman genau richtig, denn dieser nahm nie ein Blatt vor den Mund, wenn es um die Physik ging – völlig egal, wen er vor sich hatte! Auch in späteren Jahren behielt Feynman dies bei, selbst wenn er es damit gelegentlich etwas übertrieb und so manchen Vortragenden aus dem Konzept brachte.

Ein weiterer Star der Physikergemeinschaft war der aus Italien stammende Enrico Fermi ([Abb. 2.19](#)). Er reiste aus Chicago an, und Feynman diskutierte ein Resultat komplizierter Rechnungen mit ihm, das er bisher nicht verstand. Fermi dachte nach und konnte Feynman nach kurzer Zeit eine anschauliche Begründung für das Resultat liefern, auf die Feynman nicht gekommen war, obwohl er sich seit längerem damit beschäftigt hatte. „Fermi tat das, worin ich eigentlich gut sein sollte, nur zehnmal besser als ich“, schreibt Feynman in *Los Alamos From Below*.

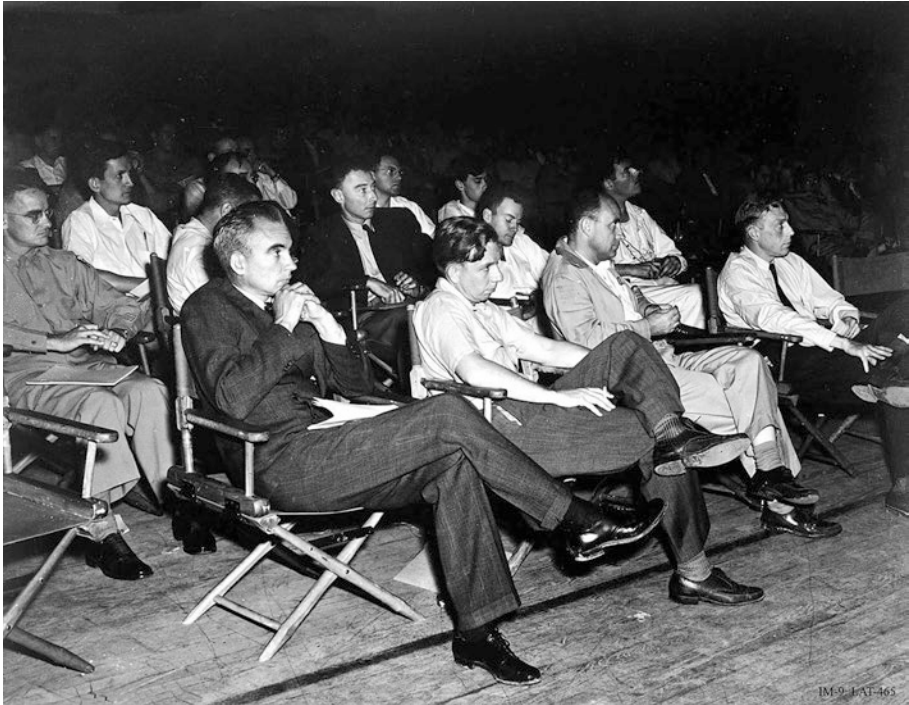


Abb. 2.19 Kolloquium in Los Alamos 1946. In der ersten Reihe sitzen (von links nach rechts): Norris Bradbury, John Manley, Enrico Fermi, J.M.B. Kellogg. Zweite Reihe: Colonel Oliver G. Haywood, unbekannt, Robert Oppenheimer, Richard Feynman, Phil B. Porter. (Quelle: Los Alamos National Laboratory)

Mit John von Neumann, dem großen Mathematiker und Informatiker, ging Feynman gerne sonntags spazieren, wobei auch Bethe oft mitkam. Feynman genoss diese Begegnungen. Dabei gab ihm von Neumann eine interessante Lebensweisheit mit auf den Weg: „You don’t have to be responsible for the world that you’re in“ (Du musst nicht verantwortlich sein für die Welt, in der du lebst). Dieser Satz sollte in seinem späteren Leben sehr befreiend auf Feynman wirken – man wird unglücklich, wenn man sich zu viele Dinge zu Herzen nimmt und sich für alles verantwortlich fühlt: „It’s made me a very happy man ever since“, wie es Feynman selbst ausdrückt.

Man muss wissen, was man tut

Die Zeit in Los Alamos muss für Feynman sehr kräftezehrend gewesen sein, auch wenn er dies in seinen eigenen Büchern und Vorträgen durch viele lustige Anekdoten meist überspielt hat. Man war unter Zeitdruck, denn man wollte

den Deutschen zuvorkommen. Es gab sehr viel zu lernen, viele Probleme mussten gelöst und das Zusammenspiel vieler unterschiedlicher Menschen organisiert werden. Wie berechnet man beispielsweise die Sprengkraft einer Atombombe? Zusammen mit Bethe gelang es ihm eine entsprechende Formel aufzustellen, die als Bethe-Feynman-Formel bekannt geworden ist – vermutlich werden selbst heute noch bestimmte Aspekte dieser Formel geheim gehalten.

Eine von Feynmans Aufgaben war das Organisieren und Durchführen umfangreicher numerischer Berechnungen. Heute würde man dies mithilfe moderner Computer tun, doch damals war man noch auf mechanische Rechenmaschinen und später die ersten IBM-Computer mit Lochkarten angewiesen. Immer wieder gab es technische und organisatorische Probleme, doch hier war Feynman in seinem Element – er mochte Computer, und er liebte es, Problemen auf den Grund zu gehen und nicht nachzulassen, bis er eine Lösung gefunden hatte.

Dabei bestand Feynman darauf, dass es für eine effiziente Zusammenarbeit notwendig war, die Leute voll einzubeziehen und ihnen klar zu machen, warum sie das alles taten. Die US-Army verfolgte aus Geheimhaltungsgründen genau den entgegengesetzten Ansatz: Jeder sollte nur das wissen, was er für seine Aufgabe unbedingt wissen muss – das konnte nicht effizient funktionieren. Also erzählte Feynman der Gruppe, die die numerischen Rechnungen durchführte und täglich mit Stapeln von Lochkarten zu kämpfen hatten, wozu ihre Arbeit gebraucht wurde: „We’re fighting a war!“ Damit war der Ehrgeiz der Leute geweckt, sie dachten mit und fanden selbst viele Möglichkeiten, wie sich die numerischen Rechnungen beschleunigen ließen.

Ähnlich war es in der großen Anlage in Oak Ridge ([Abb. 2.20](#)) in Tennessee, wo die Reinigung und Trennung der Uran-Isotope zur Anreicherung des Urans durchgeführt wurde. Auch hier wussten die Leute nicht, wofür ihre Arbeit gebraucht wurde. Sie waren nicht über den physikalischen Hintergrund informiert worden, sondern folgten nach dem Willen der Army blind den Anweisungen, die sie erhalten hatten. Entsprechend mager waren die Ergebnisse – nur wenig Uran-235 wurde konzentriert. Außerdem lagerten sie große Mengen Urannitrat-Lösung in Tanks und hatten keine Ahnung, welche Gefahr davon ausging. Emilio Segrè, der bei Enrico Fermi promoviert hatte und 1938 vor den Faschisten aus Italien geflohen war, reiste nach Oak Ridge und war entsetzt. Wenn sie später mit dem angereicherten Uran genauso umgingen, könnte die Menge ausreichen, um eine nennenswerte Kettenreaktion auszulösen. Eine Explosion oder zumindest die Verseuchung der Anlage mit radioaktiven Spaltprodukten wären die möglichen Folgen. Als Segrè die Verantwortlichen auf die Gefahr aufmerksam machte, waren sie alarmiert. Eine Explosion?

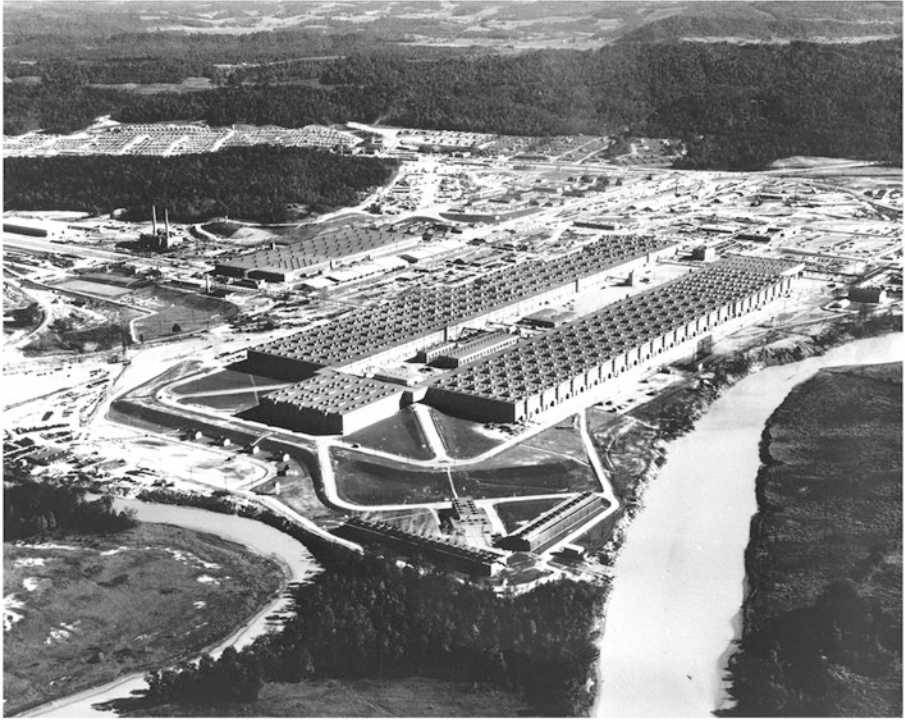


Abb. 2.20 Luftbild der K-25-Gasdiffusionsanlage zur Urananreicherung in Oak Ridge. (Quelle: American Museum of Science and Energy, James E. Westcott, official US Army Manhattan Project photographer)

Hatte die Army das nicht berücksichtigt, als sie die Anlage bauen ließen? Nun, die Army wusste, dass man einige zehn Kilogramm angereichertes Uran für eine Atombombe brauchte, und so viel würde sich zu keiner Zeit in der Anlage befinden – also war man unbesorgt. Dabei hatte man aber etwas übersehen: In Wasser werden die bei der Spaltung entstehenden Neutronen abgebremst und können zehn- bis hundertmal effektiver von den Uran-235-Kernen eingefangen werden und diese spalten. Also braucht man in einer Urannitrat-Lösung sehr viel weniger angereichertes Uran, um eine Kettenreaktion auszulösen.

In Los Alamos stellte man fieberhaft die notwendigen Berechnungen an – wie viel Uransalz-Lösung und wie viel getrocknetes Uransalz konnte man unbedenklich an einem Ort lagern? Schließlich schickte man Feynman nach Oak Ridge, um dort die Ergebnisse vorzustellen und die entsprechende Physik zu erklären. Feynman war etwas besorgt, ob man auf einen jungen Physiker wie ihn hören würde, und so gab ihm Oppenheimer eine

Formulierung mit auf den Weg, die wahre Wunder wirkte: „Los Alamos kann keine Verantwortung für die Sicherheit der Anlage in Oak Ridge übernehmen, außer wenn ...“ Man sieht, wie wichtig etwas Psychologie in solchen Situationen sein kann!

Feynman erklärte also den Managern und technischen Experten in Oak Ridge, warum das Uran angereichert wurde, wie effektiv schnelle und langsame Neutronen eine Kettenreaktion auslösen, wie sie sich abschirmen lassen und so fort. Nun war den Leuten vor Ort klar, welche Fehler sie unwissentlich gemacht hatten und was in Zukunft unbedingt beachtet werden musste.

Zensoren ärgern und Safes knacken

Bei all diesen Herausforderungen und angesichts der ständigen Sorge um seine kranke Frau war klar, dass Feynman ein Ventil brauchte. Er fand es, indem er sich beispielsweise kleine Gefechte mit den Zensoren der Army lieferte, die alle ein- und ausgehenden Briefe nach Los Alamos kontrollierten und zensierten – was ziemlich lästig und sogar gesetzeswidrig war und deshalb auf „freiwilliger Basis“ durchgeführt wurde.

Besonders besorgt waren die Zensoren immer dann, wenn sie geheime Codes in den Briefen vermuteten. So schrieb Richard einmal an Arline, die sich in ihrer Klinik langweilte, über eine Beobachtung, die er beim Herumspielen mit den Rechenmaschinen in Los Alamos gemacht hatte: Wenn man 1 durch 243 dividiert, so ergibt sich eine Dezimalzahl, bei der sich die 27 Ziffern 411522633744855967078189300 immer wiederholen:⁹

$$\frac{1}{243} = 0,004115226337448559670781893004115226337448559\dots$$

Feynman fand das amüsant und auch etwas merkwürdig: erst 411, dann 522 und 633, schließlich 744 und 855, bevor es nach 96 etwas chaotisch wird und dann wieder von vorne losgeht. Die Zensoren vermuteten allerdings in dieser Ziffernfolge eine geheime Botschaft, und es kostete Feynman einige Mühe, sie davon zu überzeugen, dass er lediglich das Ergebnis von 1 durch 243 aufgeschrieben hatte.

⁹ wenn Sie es nachrechnen wollen, versuchen Sie es beispielsweise auf der Webseite <http://www.wolframalpha.com/>

Feynman machte sich auch einen Spaß daraus, die Sicherheitskombinationen der Schlösser an den Schränken und Safes seiner Kollegen zu entschlüsseln, in denen sie ihre geheimen Dokumente aufbewahrten, und erwarb sich bald eine gewisse Reputation als Safeknacker. In *Los Alamos From Below* schildert er diese Anekdoten auf sehr humorvolle Weise und man könnte fast den Eindruck gewinnen, das ganze Projekt sei für ihn ein einziger großer Spaß gewesen.

Abschied von Arline

Doch dann holte ihn die Wirklichkeit brutal wieder ein: Arline ging es immer schlechter, und alle Bemühungen Feynmans, irgendwo eine erfolgreiche Behandlung für ihre Krankheit zu finden, liefen ins Leere. Mitte Juni 1945 lieh er sich das Auto von seinem Freund Klaus Fuchs, der später als Spion enttarnt wurde, und fuhr zu ihr, um in ihrer letzten Stunde bei ihr zu sein. Sie schlief sanft ein, ihr Atem wurde immer flacher, bis kein Atem mehr zu spüren war. Sie war nur 25 Jahre alt geworden. Feynman nahm ihre Sachen an sich, kümmerte sich um die Formalitäten und fuhr zurück ins Büro, als wäre nichts gewesen. Tief im Inneren muss ihn Arlines Tod furchtbar getroffen haben: „Von mir wurde erwartet, alles zu überwachen, aber ich war drei Tage lang nicht dazu in der Lage.“ Einen Monat später erfasste ihn dann die Trauer, als er in Oak Ridge in einem Ladenfenster ein schönes Kleid sah und dachte, das könnte Arline gefallen – sie würde es nicht mehr tragen können.

Wie tief seine Trauer um Arline über eine lange Zeit hinweg gewesen sein muss, wird aus einem Brief klar, den er am 17. Oktober 1946 – also 16 Monate nach ihrem Tod – an Arline schrieb, in einen Umschlag steckte und verschloss. Erst nach seinem Tod fand man den Brief in seinem Nachlass. Es ist ein sehr privater Brief, der einem ans Herz geht, und man traut sich kaum, ihn zu lesen. Heutzutage findet man ihn im Internet, beispielsweise bei <http://www.lettersofnote.com>. Wir haben einige kurze Ausschnitte des Briefs in Infobox 3 in englischer Originalsprache widergegeben, denn aus ihm wird deutlich, wie sehr Richard seine Arline auch nach vielen Monaten noch liebte, wie alleine er sich ohne sie fühlte und dass keine andere Frau damals eine Chance hatte, die Lücke zu füllen, die Arline hinterlassen hatte. „You, dead, are so much better than anyone else alive“, schreibt Feynman und schließt mit den hilflosen Worten: „PS Please excuse my not mailing this — but I don't know your new address.“

Infobox 3: Feynmans Brief an seine verstorbene Frau Arline

October 17, 1946

D'Arline,

[...]

It is such a terribly long time since I last wrote to you – almost two years but I know you'll excuse me because you understand how I am, stubborn and realistic; and I thought there was no sense to writing.

[...]

I find it hard to understand in my mind what it means to love you after you are dead – but I still want to comfort and take care of you – and I want you to love me and care for me. [...] Can't I do something now? No. I am alone without you and you were the „idea-woman“ and general instigator of all our wild adventures.

[...] you can give me nothing now yet I love you so that you stand in my way of loving anyone else – but I want you to stand there. You, dead, are so much better than anyone else alive.

[...] I have met many girls and very nice ones and I don't want to remain alone – but in two or three meetings they all seem ashes. You only are left to me. You are real.

My darling wife, I do adore you.

I love my wife. My wife is dead.

Rich.

PS Please excuse my not mailing this – but I don't know your new address.

Die Bombe explodiert

Der einfühlsame Bethe merkte, dass Feynman nach Arlines Tod dringend eine Pause brauchte, und schickte ihn nach Hause zu seinen Eltern nach Long Island. Rund vier Wochen später erhielt er dort ein verschlüsseltes Telegramm, das ihn nach Los Alamos zurückrief. Am 15. Juli traf er dort ein, und kurz darauf wurden er und seine Kollegen zu einer verlassenen Wüstengegend gefahren, in der in den Morgenstunden des 16. Juli 1945 der erste Atombombentest stattfinden sollte – der Trinity-Test ([Abb. 2.21](#)).

Feynman gehörte zu der Gruppe, die sich 20 Meilen (32 km) vom Explosionsort entfernt befand. Alle erhielten dunkle Brillen, um ihre Augen vor dem grellen Licht zu schützen, doch Feynman entschied, dass auch eine Windschutzscheibe genug Schutz vor den UV-Strahlen bieten würde. So sah er als einer der wenigen – vielleicht sogar als einziger – die Explosion mit bloßen Augen.

Die Bombe, die übrigens aus dem ebenfalls spaltbaren Plutonium und nicht aus Uran bestand, explodierte mit einer Sprengkraft von rund zwanzigtausend

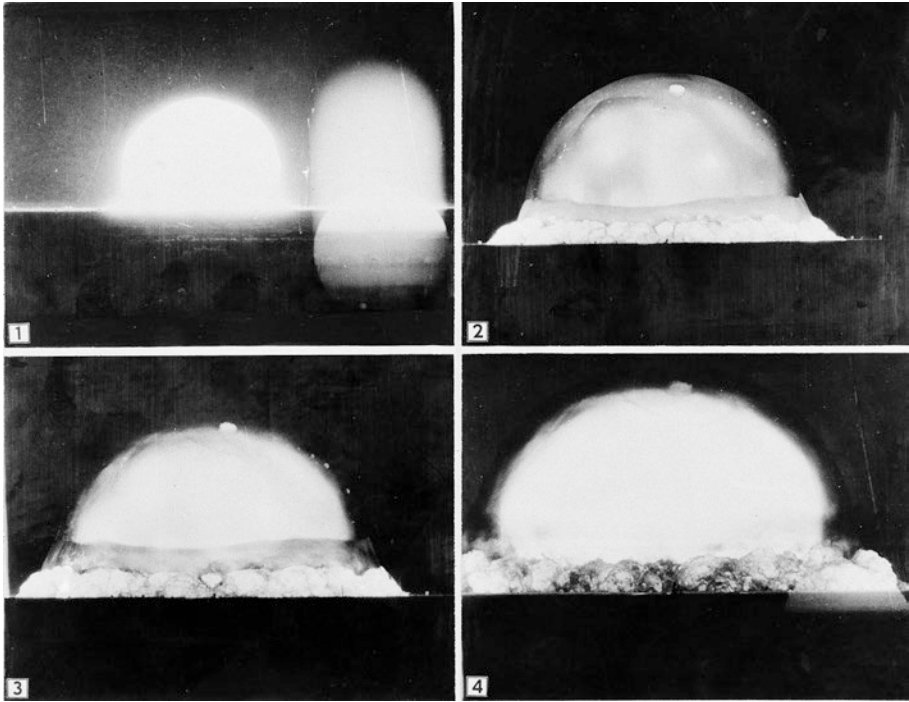


Abb. 2.21 Fotoreihe der U. S. Army vom Trinity-Test aus etwa zehn Kilometern Entfernung. (© picture alliance/AP Images)

Tonnen TNT. Der Lichtblitz war so grell, dass Feynman sich unwillkürlich duckte und einen violetten Fleck als Nachbild auf dem Fußboden sah. Dann sah er, wie das grellweiße Licht langsam schwächer wurde und seine Farbe ins Gelbliche und dann ins Orangefarbene wechselte. Wolken formten sich aus dem Nichts und verschwanden wieder als Folge der durchlaufenden Druckwelle. Schließlich stieg eine große orangefarben glühende Kugel empor und formte den bekannten Atompilz.

Jeder starrte wie gebannt auf das leuchtende Spektakel am Horizont. Feynman war fasziniert von den physikalischen Phänomenen, die die gewaltige Explosion ausgelöst hatte. Nach etwa eineinhalb Minuten erreichte sie die Schall- und Druckwelle, man hörte einen scharfen Knall und dann ein Donnerrollen.

Erst diese akustische Wahrnehmung befreite die Beobachter aus ihrer Erstarrung – es hatte tatsächlich funktioniert. Alle ihre Mühen waren endlich belohnt worden. Man kann sich vorstellen, was danach in Los Alamos los war. Es wurde gefeiert, getrunken, getanzt und viel gelacht. Aber ein Mann fiel Feynman auf, der dabei nicht mitmachte. Es war Bob Wilson, der Feynman

vor drei Jahren überredet hatte, beim Bau der Bombe mitzuhelfen, und der nun trübsinnig dasaß. „It’s a terrible thing that we made“ (Es ist ein furchtbares Ding, das wir erschaffen haben), sagte er. Erst da realisierte Feynman, was geschehen war: Sie hatten aus guten Gründen angefangen, die Bombe zu bauen, und sie hatten hart daran gearbeitet, das Projekt zum Erfolg zu führen. Es war anstrengend und aufregend gewesen, und sie hatten aufgehört zu denken. „And you stop thinking, you know; you just stop“, schreibt Feynman.

Am 6. August 1945 wurde eine erste Atombombe über der japanischen Stadt Hiroshima abgeworfen, und drei Tage später eine zweite Atombombe über Nagasaki. Dieses verheerende Ereignis muss in Feynmans Unterbewusstsein etwas ausgelöst haben. Er beschreibt, wie er wenig später in einem Restaurant in New York saß und sich ausmalte, welchen Schaden die Hiroshima-Bombe in New York anrichten würde. Alle Gebäude, die er sah, wären zerstört. Dann sah er Leute, die unbeirrt eine Straße oder eine Brücke bauten, und er dachte: „Sie sind verrückt, sie verstehen es einfach nicht. Warum bauen sie neue Dinge? Es ist so sinnlos.“

Feynman glaubte, dass ein vernichtender Atomkrieg irgendwann nahezu unvermeidlich sei. Die Eindrücke des gerade erst beendeten Krieges und die verheerende Wirkung der Atombomben in Japan taten ihre Wirkung. Warum noch irgendetwas aufbauen? Warum noch die grundlegenden Gesetze der Natur erforschen? Dieses Gefühl der Sinnlosigkeit sollte Feynman noch viele Monate begleiten, nachdem er Los Alamos im Oktober 1945 verlassen hatte, um wieder an sein altes Leben als Naturwissenschaftler an einer Universität anzuknüpfen.

Feynman und die Physik
Leben und Forschung eines außergewöhnlichen
Menschen

Resag, J.

2018, XIV, 342 S. 101 Abb., 17 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-54796-0