



Hans-Hennig von Grünberg

1924–1927: Der Frühling der Quantenmechanik



SACHBUCH

 Springer

1924–1927: Der Frühling der Quantenmechanik

Hans-Hennig von Grünberg

**1924–1927:
Der Frühling
der Quanten-
mechanik**

Unter Mitwirkung von Alexander
Griffiths



Springer

Hans-Hennig von Grünberg
Universität Potsdam
Potsdam, Brandenburg, Deutschland

ISBN 978-3-662-68503-7 ISBN 978-3-662-68504-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68504-4>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

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

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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

Einbandabbildung: © stock.adobe.com/helgoland

Planung/Lektorat: Andreas Rüdinger
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Prolog: Die acht Protagonisten dieser Geschichte

Wir wollen die Helden unserer Geschichte kennenlernen und haben sie im Sommer 1925 in einen großen, hellgelb gestrichenen und sonnendurchfluteten Gartensaal mit Ausblick in einen angrenzenden Park geladen. Auf einem Sofa hinten rechts in der Ecke sitzen die zwei wichtigsten Figuren unseres Stückes zusammen und sind in ein ange-regtes Gespräch vertieft: Werner Heisenberg, 23 Jahre alt, und Wolfgang Pauli, 25 Jahre alt. In dieser Geschichte sind sie, obwohl gleichfalls glänzende Mathematiker, vor allem die Herzblut-Physiker. Und sie sind die eigentlichen Treiber, sind diejenigen, die neue Ideen als Erste haben und sie bereitwillig mit anderen teilen. Von ihrem Wesen, ihrem Charakter sind sie grundverschieden, wie Katze und Hund, obwohl sie bemerkenswert parallele Lebenswege haben. So sind sie zum Beispiel beide von dem berühmten Professor Arnold Sommerfeld von der Universität München an die Physik herangeführt worden.

VI Prolog: Die acht Protagonisten dieser Geschichte

Links an der Tür zur Bibliothek stehen zwei weitere Herren, die beide 22 Jahre alt sind: Pascual Jordan und Paul Dirac. Sie sind beide frisch promoviert, der eine in Göttingen, der anderen in Cambridge. Sie sehen ziemlich unbeholfen aus, wirken in sich gekehrt und scheinen vor sich hin zu denken, hören aber mit einem Ohr dem Gespräch von Pauli und Heisenberg zu. Sprechen tun sie sicherlich nicht. Jordan mit seiner enorm dicken Brille spricht nicht, weil er stottert. Und der Engländer Dirac spricht grundsätzlich nicht. Die beiden sind die Mathematiker in diesem Stück; enorm begabt, bringen sie in mathematisch perfekte Form, was ihnen die Physiker nahebringen. Leider kommen sie immer zeitgleich auf dieselben Ideen und sind fast so etwas wie Konkurrenten.

Das sind zunächst einmal die vier Zwanzigjährigen in dieser Geschichte.

Nun betreten die Herren Max Born, 42 Jahre, und Niels Bohr, 39 Jahre, den Raum. Beide sind sehr bekannte Professoren, der eine in Göttingen, der andere in Kopenhagen. Max Born geht jetzt rüber zu Pascual Jordan, dem er freundschaftlich auf die Schulter klopft. Born ist der Chef der Theoretiker in Göttingen, Pascual Jordan sein Assistent. Auch er ist jemand, der sehr mathematisch denkt. Da steht er also bei Jordan und Dirac ganz richtig. Der Däne Niels Bohr hingegen geht stracks rüber zu Pauli und Heisenberg und fällt in seiner lauten Art auch sofort in deren Gespräch ein. Er ist durch und durch Physiker und für die beiden auf dem Sofa ist er so etwas wie eine Vaterfigur.

Jetzt erst nimmt man wahr, dass gleich vorne links ein junger, sehr feiner Franzose mit übergeschlagenen Beinen auf einem Sessel sitzt und still für sich einen Mokka trinkt. Es ist der Prinz Louis de Broglie, 32 Jahre alt, von dem die sechs Herren im Raum irgendwie kaum Kenntnis zu neh-

men scheinen. Doch jetzt betritt Prof. Erwin Schrödinger, 37 Jahre alt, den Raum. Er meidet die Physiker hinten bei Bohr, will auch nicht in die Ecke von Max Born gehen, sondern geht direkt auf Louis de Broglie zu, bei dem er sich für eine zündende Idee bedanken möchte.

Das ist unsere Partygesellschaft. Die Party dauert von September 1924 bis zum Oktober 1927. Obwohl es der Sommer 1925 ist, überblicken unsere 8 Partygäste schon den gesamten Zeitraum von drei Jahren und wir können sie also fragen, ob sie uns vielleicht mit einem Satz sagen könnten, was ihr Anteil an der Geschichte ist bzw. sein wird. Niels Bohr nimmt sich sofort das Wort. Er habe mit Arnold Sommerfeld zusammen ein Atommodell entwickelt, nach dem Elektronen um Atomkerne kreisen wie Planeten um die Sonne. Er habe ganz früh verstanden, dass das Modell nichts taue und durch eine umfassende neue Theorie ersetzt werden müsse. Und deswegen habe er junge Leute für die Aufgabe gewonnen und auf die Spur gesetzt. Er sei schon so etwas wie der zentrale Koordinator des gesamten Manövers. Dann sagt der Prinz de Broglie mit leiser Stimme und sehr knapp, dass von ihm die Idee stamme, dass ein Elektron auch eine Materiewelle sein könne. Wolfgang Pauli spricht als Dritter und erzählt selbstbewusst von seiner Rolle als Impulsgeber, erzählt von seinem Ausschließungsprinzip und vor allem die Geschichte von dem Elektronenspin. Dann endlich ergreift, worauf schon alle gewartet haben, Werner Heisenberg das Wort: Er habe den Anfang hinbekommen, habe den entscheidenden Anstoß für die Matrizenmechanik gegeben und später die Unschärferelation entdeckt. Mit weichem Wiener Tonfall berichtet nun Erwin Schrödinger knapp, aber erkennbar stolz, dass er die Idee von de Broglie ausgearbeitet, die Schrödingergleichung und mit ihr die Wellenfunktion entdeckt habe. Max Born spricht als Nächstes.

VIII Prolog: Die acht Protagonisten dieser Geschichte

Er erläutert, dass er mit Jordan und Heisenberg zusammen die Matrizenmechanik ausgearbeitet und die Wellenfunktion von Schrödinger als Wahrscheinlichkeitswelle gedeutet habe. Ein etwas unangenehme Pause entsteht, weil Jordan sprechen soll, es aber nicht kann. Dann endlich sagt Pascual Jordan sehr vorsichtig, das Stottern unterdrückend, dass mit der Transformationstheorie von ihm und Dirac die Ansätze von Heisenberg und Schrödinger hätten vereinigt werden können. Und während nun alle ihn ehrfürchtig anschauen, setzt endlich Pauli Dirac an. Sehr leise spricht er. Er habe mit seiner Dirac Gleichung die Relativitätstheorie und die Quantentheorie zusammengeführt und dabei hätte sich ganz am Ende auch der sonderbare Elektronenspin von selbst erklärt.

Ein Engländer, ein Österreicher, ein Däne, ein Franzose und vier Deutsche. Jedem der acht Gäste wird ein Glas gegeben, gefüllt natürlich mit Champagner. Auf sieben dieser acht Gläser ist ein Abbild des Nobelpreises eingraviert. Einer wird leer ausgehen. Aber im Sommer 25 weiß nur einer der acht, dass er sicher diesen Preis haben wird. Und das ist Niels Bohr. Der hat nämlich schon einen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| 1924, Einführung: Vorarbeiten | 1 |
| 1925, These: Matrizenmechanik | 35 |
| 1926, Antithese: Wellenmechanik | 109 |
| 1927, Synthese: Dualismus und Unschärfe | 201 |
| Die acht Protagonisten im Gartensaal | 269 |
| Epilog | 273 |
| Zeitstrahl | 275 |
| Literatur | 283 |



1924, Einführung: Vorarbeiten

September 1924, Kopenhagen

Eine Zugfahrt von München nach Kopenhagen: was für eine Tortur! 20 Stunden saß Werner Heisenberg nun schon im Zug und Kopenhagen war immer noch nicht erreicht. Er hätte mal direkt von Göttingen aus fahren sollen, statt noch mal in München vorbeizuschauen. Aber es hatte sich gelohnt. Schöne Augusttage im Garten der Eltern, erholsame Tage, dringend erforderlich nach den Anstrengungen der Habilitation in Göttingen. Die alten Pfadfinderfreunde wiedergesehen, Zeit verbummelt. Was will man mehr? Und das bedeutet dann halt eine Zugfahrt von München nach Kopenhagen. Dafür aber würde er nun ganze sieben Monate bei dem weltberühmten Niels Bohr zubringen und bei sieben Monaten Aufenthalt lohnt sich so eine lange Zugfahrt ja dann auch wieder.

Wenn Wolfgang Pauli und Werner Heisenberg lästerten, dann nannten sie Niels Bohr den „Papst der

Quantenphysik“ und dessen Assistenten „Seine Eminenz, den Kardinal.“ Damit meinten sie den Vertrauten von Niels Bohr, nämlich Hendrik Anthony Kramers. Der launenhafte Hendrik Kramers hielt nicht viel von den Arbeiten des jungen Heisenbergs und ließ ihn das in seiner herablassenden Art auch durchaus spüren. Die Rivalität zwischen Kramers und Heisenberg war für jeden Beobachter offensichtlich. Aber, Gott sei's gelobt und gepfiffen, Kramers war den ganzen September verreist und die ersten Wochen in Kopenhagen würden für Heisenberg schon deswegen leicht und angenehm. Immerhin war er – wenn auch nur vertretungsweise für die Dauer der Abwesenheit von Kramers – nun offiziell der Assistent von Niels Bohr. Und das hatte in Kopenhagen schon etwas zu bedeuten.

Mit dem Niederländer Hendrik Kramers hatte übrigens das Verhältnis zwischen Niels Bohr und Werner Heisenberg auch begonnen. Vor zwei Jahren nämlich, als Bohr in Göttingen seine legendäre Vorlesungsreihe zur Atomtheorie gehalten hatte, die als die „Bohr-Festspiele“ in die Geschichte der Physik eingegangen sind. Alles, wirklich alles, was in der Physik Rang und Namen hatte, war zu diesen Bohr Festspielen nach Göttingen angereist. So eben auch der zwanzigjährige Heisenberg, damals noch Student im vierten Semester an der Universität München. Sein Förderer, Professor Arnold Sommerfeld, hatte ihm dafür eigens die Zugfahrkarte bezahlt.

Es muss die dritte von insgesamt sieben Vorlesungen von Niels Bohr gewesen sein, als dieser den Stark Effekt und die neuesten Ausarbeitungen seines Assistenten Hendrik Kramers vorstellte. Da meldete sich ein völliger Nobody aus München zu Wort, der Student Heisenberg. Und zerpfückte vor der illustren und staunenden Zuhörerschaft die theoretischen Überlegungen von Hendrik Kramers, was allerdings, auch das muss gesagt sein, so von langer Hand vorbereitet war, denn er hatte, was niemand

wusste, die Kramerschen Ausarbeitungen schon vorab in dem Seminar von Sommerfeld referieren müssen. Jedenfalls fiel Heisenberg auf. Heisenberg erinnert sich:

Nach dem Ende der Diskussion sprach Bohr mich an und schlug einen gemeinsamen Spaziergang zu zweit auf den Göttinger Hainberg vor. Diese Unterredung, die uns kreuz und quer über die bewaldeten Höhen des Hainbergs führte, war das erste intensive Gespräch über die physikalischen und philosophischen Grundfragen der modernen Atomtheorie, an das ich mich erinnern kann; und es hat meinen späteren Lebensweg entscheidend mitbestimmt. Ich verstand zum ersten Mal, dass Bohr seiner eigenen Theorie viel skeptischer gegenüberstand als manch anderer Physiker jener Zeit, z. B. Sommerfeld, und dass die Kenntnis der Zusammenhänge für ihn nicht aus einer mathematischen Analyse der zugrunde gelegten Annahmen entsprang, sondern aus einer intensiven Beschäftigung mit den Phänomenen, die es ihm ermöglichte, die Zusammenhänge mehr intuitiv zu erfühlen als abzuleiten. So also entsteht Naturerkenntnis, und erst im zweiten Schritt kann es gelingen, das Erkannte mathematisch zu präzisieren und der vollen rationalen Analyse zugänglich zu machen.¹

Mathematik kommt immer erst hinterher, wenn man es irgendwie schon verstanden hat. Man ringt mit dem Neuen und dem Unbekannten mit einfachen, eigenen, inneren Bildern. Und eben das hat ihm Bohr beigebracht. Nach der Rückkehr von diesem Spaziergang soll Bohr zu seinen Freunden über Heisenberg ehrfürchtig gesagt haben: „Er versteht alles!“ Werner Heisenberg hat die Menschen wohl immer schnell zu beeindrucken gewusst. Im Herbst 1920 war Heisenberg noch ein bloßer Studienanfänger, am 20. September 1925 schrieb Einstein an seinen Freund Ehrenfest: „Heisenberg hat ein großes Quantenei gelegt!“. Dazwischen liegen gerade einmal fünf Jahre! Mit 21 Jahren promovierte Heisenberg bei Arnold

Sommerfeld, mit 22 Jahren habilitierte er sich bei Max Born. Im Jahre 1925, also mit 23 Jahren, war er berühmt.

Seit diesem legendären Spaziergang wollten Bohr und Heisenberg einmal längere Zeit zusammenarbeiten. Hat-ten es sich in die Hand versprochen. Nun endlich, end-lich, Mitte September 1924, hatte es geklappt: Heisenberg war in Kopenhagen für einen längeren Postdoc Aufent-halt angekommen. In Hinsicht auf den Lebenserfolg von Werner Heisenberg kann die Bedeutung von Bohr gar nicht hoch genug eingeschätzt werden. Viele Jahre später, nach Erhalt seines Nobelpreises, schreibt Heisenberg an Bohr:

Ich weiß, dass ich eigentlich von Dir gelernt habe, wie man Wissenschaft treibt und dass ich die geringen Beiträge, die ich zur Physik hab' liefern dürfen, zum allergrößten Teil der Kopenhagener Atmosphäre verdanke, in der ich aufgewachsen und von Dir aufgezogen worden bin. Wahrscheinlich ver-danke ich auch die jetzige Anerkennung zum großen Teil di-rekt oder indirekt Dir. Also hab' für alles, was Du für mich getan hast, den herzlichsten Dank.²

Oktober 1924, Cambridge

The London, Edinburg and Dublin Philosophical Maga-zine and Journal of Science publiziert einen Artikel³ des 26 jährigen Edmund Clifton Stoner: „The distribution of electrons among atomic levels“. Stoner arbeitete am be-rühmten Cavendish-Laboratorium in der Gruppe von Ernst Rutherford, war kein besonders erfolgreicher Ex-perimentalphysiker, dafür hatte er aber eine Leidenschaft für die Arbeiten von Niels Bohr und für die entstehende Quantentheorie. In dieser Arbeit nun fordert er den gro-ßen Bohr heraus: Das Bohrsche Verteilungsschema von

Elektronen auf gefüllte Unterschalen basiere auf etwas willkürlichen Argumenten. Er, Stoner, hätte da eine bessere Idee, was die Begründung für den Aufbau des Periodensystems anbetrifft. Es ist wahrlich nur eine sehr kleine Notiz und hätte nicht der große Arnold Sommerfeld davon erfahren und die Nachricht weiterverbreitet, sie wäre wahrscheinlich einfach untergegangen.

November 1924, Hamburg

Das Jahr 1924 hatte Wolfgang Pauli zunächst verstreichen lassen, ohne sich weiter mit der noch ganz in den Kinderschuhen steckenden Quantentheorie zu beschäftigen. Seine bisherigen Arbeiten zum anomalen Zeeman-Effekt fand er außerordentlich unbefriedigend und so wollte er nun erst einmal einen gehörigen Abstand gewinnen. Als er dann aber im Herbst 1924 einen längeren Artikel zur Quantentheorie zu verfassen gebeten wurde, fand er schnell zurück zu *seinem* Problem: eben dem anomalen Zeeman-Effekt, dem er nun schon so viel Jahre seines Lebens geopfert hatte.

Was ist an diesem Effekt nicht normal? Atome in einem Magnetfeld weisen eine Aufspaltung ihrer Spektrallinien auf, die unmittelbar von der Stärke des magnetischen Feldes abhängt. Großes Feld, große Aufspaltung. Kleines Feld, kleine Aufspaltung. Auch für den klassisch denkenden Physiker ist das eigentlich keine große Überraschung. Die Elektronen haben einen Bahndrehimpuls und mit einem Drehimpuls eines geladenen Teilchens geht stets ein magnetisches Moment einher. Die Elektronen auf ihren Bahnen verhalten sich demnach wie kleine Stabmagneten in einem äußeren Feld, richten sich nach dem Feld aus, haben deswegen unterschiedliche Energien und das erklärt letzten Endes die Aufspaltung der Spektrallinien, deren

Abstände etwas mit den Energien zu tun haben. Sogar in dem noch recht einfachen Bohr-Sommerfeld Modell – dem State of the Art Modell der Quantentheorie jener Jahre – sind diese Aufspaltungen zu verstehen. Im Bohr-Sommerfeld Modell, was ja ohnehin schon zwei Quantenzahlen hat, kommt dann eine dritte Quantenzahl bei der Beschreibung hinzu, nämlich die magnetische Quantenzahl des Bahndrehimpulses. Wenn sich alle Beobachtungen brav ins Bohr-Sommerfeld Modell fügen, spricht man von dem normalen Zeeman-Effekt.

Aber leider – und hier kommt der Haken – gelingt das nur in den wenigsten Fällen. Meist spalteten die Linien nämlich in viel, viel mehr Linien auf als man in der klassischen Betrachtung erwartet. Und das nennt sich dann: der anomale Zeeman-Effekt.

An diesem Effekt hatte sich Pauli viele Jahre die Zähne ausgebissen. Als er ziellos durch die Straßen von Kopenhagen wanderte, wo er seine Postdoc Zeit bei Niels Bohr verbrachte, spricht ein Kollege ihn an: „Sie sehen aber sehr unglücklich aus“ – „Wie soll man denn glücklich aussehen, wenn man über den anomalen Zeeman-Effekt nachdenkt?“ Das war seine Antwort. Das war witzig und doch auch ernst gemeint. Denn er war wirklich unglücklich.

Der anomale Zeeman-Effekt ist ohne das Konzept eines Elektronspins nicht zu verstehen. Ein Elektron hat nicht nur wegen seines Bahndrehimpulses ein magnetisches Moment, sondern es hat darüber hinaus noch ein eigenes magnetisches Moment, sozusagen ein Eigenmoment. Und da der Physiker ein magnetisches Moment nie ohne ein dieses Moment verursachenden Drehimpuls denken mag, hat das Elektron nicht nur ein Eigenmoment, sondern auch einen Eigendrehimpuls, was auf Englisch „Spin“ heißt. Also: Spin gleich Eigendrehimpuls gleich ein eigenes und zusätzliches magnetisches Moment jedes Elektrons. Und dann sind da ja noch viele andere Elektronen in einem

Atom und auch diese haben magnetische Momente aufgrund ihres Spins und ihres Bahndrehimpulses. Und wenn man nun verstehen will, wie sich so ein Atom mit vielen Elektronen in einem Magnetfeld verhält, dann muss man im Wesentlichen verstehen, wie sich all diese magnetischen Teilmomente zu einem Gesamtmoment zusammensetzen, ein wahrlich anspruchsvolles Unterfangen.

All das bedeutet: Der anomale Zeeman-Effekt ist genau die experimentelle Beobachtung, die den in den Begriffswelten der klassischen Physik denkenden Wissenschaftler erkennen lässt, dass man mit seinem Latein am Ende ist. Wenn Wolfgang Pauli also unglücklich durch Kopenhagen läuft, dann ist sein Unglück das Unglück der gesamten Physik dieser Jahre, die sich eingestehen muss, dass da ein ganzes Reich von Begriffen, Modellen, Konzepten und Theorien auf seine Entdeckung wartet und dass man ganz Wesentliches noch nicht einmal im Ansatz begriffen zu haben scheint. Also zum Beispiel eben auch den Spin.

Aber eben diesem Spin rückt Wolfgang Pauli nun langsam zu Leibe. Von seinem Lehrer Arnold Sommerfeld kommt der entscheidende Hinweis, nämlich der Hinweis auf den Artikel von Edmund Clifton Stoner. Hier geht ihm nun plötzlich ein Licht auf und am 10. November 1924 schrieb er an den Experimentalphysiker Landé in Tübingen von «einer komischen, den Zeeman-Effekt betreffenden Überlegung». Was er damit meinte, wird klar aus seinem zweiten Brief an Landé vom 24. November:

Bei den Alkaliern macht das Leuchtelektron Komplexstruktur wie anomalen Zeeman-Effekt allein. Von einer Mitwirkung des Edelgas-Atomrestes ist (auch bei den anderen Elementen) keine Rede. Das Leuchtelektron bringt es auf eine rätselhafte, unmechanische Weise fertig, in zwei Zuständen (mit dem gleichen k) mit verschiedenen Impulsen zu laufen.⁴

Die Alkalimetalle sind die Elemente Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium, Cäsium und Francium, die allesamt dieselbe Struktur haben, nämlich als Atomrumpf eine volle Elektronenschale wie von einem Edelgas Atom plus obendrüber ein einzelnes Elektron, was die ganze Chemie macht, das sogenannte Leuchtelektron. Hier in diesem Brief an Landé vom 24. November erkennt Pauli, dass die Anomalie des Zeeman-Effektes bei den Alkalimetallen ganz allein von dem einzelnen Leuchtelektron herrührt und dass es auf „unmechanische Weise“ in zwei Zuständen existiert, was wir heute als Spin-up und Spin-down Zustände bezeichnen würden. Das also ist das erste Morgendämmern des Begriffs eines Spins: Pauli versteht, dass es ein Elektron in zwei Zuständen gibt, dass darauf der anomale Zeeman-Effekt fußt und dass schließlich die Anzahl der Zustände, in denen ein Elektron in einem Atom sein kann, sich dadurch verdoppelt.

November 1924, Göttingen

Sein erster Artikel. Endlich fertig. Morgen würde er ihn an die Zeitschrift für Physik schicken. Pascual Jordan strich fast zärtlich über das Deckblatt seines Manuskriptes. Die Überschrift hatte ihm Max Born nahegelegt, er fand sie fürchterlich: „Zur Theorie der Quantenstrahlung.“⁵ Das klang nach einer tiefen, ja fundamentalen Erkenntnis, die er zwar gerne gehabt hätte, aber eben nicht gehabt hatte. Und um nicht gleich wie ein Hochstapler zu wirken, hatte er als Gegengewicht den Artikel mit den bescheidenen Worten beginnen lassen: „Es wird zu zeigen versucht, daß ...“, was wiederum Max Born fürchterlich fand. Dieses Wort „versucht“ sei ja so albern, fast ein wenig unterwürfig. Er habe es nicht nur „versucht“, sondern es sei ihm doch auch wirklich gelungen. Ein richtig schönes Ergebnis

habe er da erzielt. Das hatte Born in der Promotionsprüfung mehrfach wiederholt, seine Promotionsarbeit ja auch sehr gut bewertet und ihm dann die Publikation nahegelegt. Richtig zufrieden war sein Chef gewesen.

Mit Max Born war er überhaupt an den Richtigen geraten. Er mochte ihn. Es hatte sich also doch gelohnt, dass er vor zwei Jahren von der Technischen Hochschule Hannover an die große und altherwürdige Universität Göttingen gewechselt war. Sein Vater war ja vehement gegen diesen Wechsel gewesen. Ganz vehement! Wenn es nach Ernst Pascual Jordan gegangen wäre, hätte er in Hannover bleiben und dort mit einem anständigen Architekturstudium beginnen sollen. Sein Vater war ein Mann mit festen Vorstellungen von Kultur und Gesellschaft, ein angesehenes Maler, ein führendes Mitglied des Hannoverschen Künstlervereins und selber Professor an der Technischen Hochschule Hannover. Ernst Pascual Jordan war durch und durch konservativ und hatte nichts als Verachtung übrig für die neue, avantgardistische Bewegung wie den Art Déco. Wie sonderbar experimentell, wie wenig repräsentativ war doch diese neue Moderne, die ja bei der Jugend der Stadt so beliebt war. Und seine Studenten andererseits beklagten sich über den spießigen alten Professor, der nur über „langweilige und konservative Landschaften“⁶ lehrte. Idioten waren das, fand Jordan. Sein Vater konnte einfach fantastisch malen. Warum konnte man das nicht einfach mal anerkennen? Einmal war eine Taube durch das Fenster seines Ateliers geflogen und hatte versucht sich auf ein Kruzifix zu setzen, was sein Vater gerade gemalt hatte. So realistisch malen zu können, dass man eine Taube zu täuschen vermag. Das sollte man doch erst mal nachmachen, bevor man sich über den Konservatismus seines Vaters beschwert.

Pascual Jordan hätte so gerne seinem Vater gefallen, aber ein Architekturstudium nein, das wollte er

einfach nicht. Seine Mutter Eveline hatte dann interveniert und darauf bestanden, dass der Junge machen dürfe, was er wolle. Und wenn er Mathematik oder Physik studieren wolle, sei das völlig in Ordnung. Und Mutter Eveline wusste, wovon sie sprach. Sie war selbst eine begnadete Mathematikerin und hatte den jungen Jordan während der gesamten Schulzeit auf Höchstleistung getrimmt, ihm Bücher zur Differential- und Integralrechnung besorgt, dazu Bücher von Ernst Mach, hatte selbst Latein gelernt, nur um Pascual bei den Schularbeiten helfen zu können. Aber vor allem hatte sie sich um sein Seelenheil gesorgt. Pascual Jordan war zeitlebens tief religiös, ein gläubiger Protestant. Dank seiner Mutter.

Und hier in seiner Promotionsarbeit, die er morgen an die Zeitschrift für Physik schicken würde, waren all diese prägenden Einflüsse auf die eine oder andere Weise zusammengekommen, hatten sich auf das Schönste vereinigt und zu einem neuen Ganzen gefügt. Hier war in der klaren mathematischen Form etwas wiederzuerkennen von dem strengen künstlerischen Konservatismus seines Vaters und dessen beeindruckenden perspektivischen Fähigkeiten. In der Arbeit war etwas zu finden von der sorgfältigen, ehrgeizigen und bienenfleißigen Mutter, die ihm ihre Selbstdisziplin und gedankliche Schärfe vermacht hatte. Und da offenbarte sich natürlich auch die Weltoffenheit eines Max Born und die mathematische Präzision eines Richard Courant, dem er im letzten Jahr bei der Abfassung seines Buches „Methoden der mathematischen Physik“ geholfen hatte. Mit dieser Arbeit, da war sich Pascual Jordan sicher, hatte er mit seinen 22 Jahren eine Lebensphase wirklich gut zu Ende gebracht und vor aller Welt abgeschlossen. Er atmete auf. Geschafft! Jetzt konnte gerne die nächste Phase beginnen.

November 1924, Paris

Endlich tritt im November 1924 die Physikalische Fakultät der Universität Paris zusammen, um die Verteidigung der Doktorarbeit von Louis de Broglie zu hören. Das war ein ganzes Jahr nach der Einreichung der eigentlichen Arbeit. Einer Arbeit mit dem schönen Namen: „Recherches sur la théorie des quanta“, Untersuchungen zur Quantentheorie. Warum nur hatte die Begutachtung dieser Arbeit so ungebührlich lange gedauert? Das Komitee, das über die eingereichte Promotion zu entscheiden hatte, bestand aus dem eigentlichen Doktorvater von de Broglie, nämlich Paul Langevin, dem Mathematiker Cartan, dem Physiker Perrin und dem Mineraloge Mauguin. Alle vier lobten zwar die Originalität von de Broglies Hypothese, waren aber doch mehr als skeptisch, ob der in der Arbeit postulierte Effekt wirklich jemals messbar wäre. Daraufhin hatte Langevin die Arbeit an seinen Freund Albert Einstein geschickt und um sein Urteil gebeten. Und dessen Antwort nun hatte lange auf sich warten lassen. Nach Monaten fasst Langevin nach und bekommt endlich auch eine Reaktion von Einstein. Begeistert schreibt dieser: „De Broglie hat eine Ecke des großen Schleiers gelüftet.“⁷ Einstein war damit einer der wenigen, der sofort begriffen hatte, wie fundamental die Idee von de Broglie war. Fünf Jahre später begreift es dann auch der Rest der Welt und de Broglie bekommt für seine Doktorarbeit den Nobelpreis.

Einstein zu der Idee von de Broglie zu befragen, lag tatsächlich relativ nahe. Denn die Ideen von Einstein und de Broglie verhalten sich zueinander wie Yin und Yang. Was nämlich Einstein für das Licht ist, das ist de Broglie für das Elektron. 1905 hatte Einstein das Konzept eines Photons entwickelt, hatte dem Licht also auch Teilchencharakter zugeschrieben. Je nach der Art und Durchführung

eines Experiments erscheint das Licht mal als Ansammlung von punktförmigen Teilchen mal als elektromagnetisches Wellenfeld. Das ist der sogenannte „Welle-Teilchen-Dualismus“. Dem menschlichen Vorstellungsvermögen tut das einen gewissen Tord an: Eine Welle ist eine Welle. Ein Teilchen ein Teilchen. Wie will etwas beides sein?

De Broglie nun hat in seiner Doktorarbeit den Gedankengang von Einstein umgekehrt. Einstein schließt von der Welle aufs Teilchen. De Broglie von dem Teilchen auf die Welle. Einstein schließt aus der Frequenz des Lichts auf das Photon. De Broglie schließt von dem Impuls eines Teilchens, dem Elektron, auf das Vorhandensein einer Wellenlänge. Einstein betrachtet Licht, das keine Masse hat. De Broglie betrachtet Elektronen, die sehr wohl eine Masse haben. Nicht nur bei Licht also müssen wir Teilchencharakter und Wellencharakter gleichzeitig zulassen, sondern eben auch bei massebehafteten Teilchen. Ein Elektron, das im Jahre 1924 von der ganzen Physikerwelt als Teilchen und nur als Teilchen gesehen wurde, bekommt nun von de Broglie eine Wellenlänge und eine Frequenz verpasst, weil das Elektron als Teilchen eben gleichzeitig auch eine Welle sein kann mit ihren typischen Welleneffekten wie Interferenz und Beugung. 1924 ist somit das Geburtsjahr des Begriffs der Materiewelle. Dass man Materieteilchen genau wie Lichtquanten zu behandeln hat, das ist das eigentlich Neue an der Theorie von Louis de Broglie, der große Wurf, mit dem er die Lichtquantentheorie von Einstein in entscheidender Weise verallgemeinert hat. Von hier führt ein direkter Weg zu den späteren Entdeckungen von Erwin Schrödinger, der die Bühne unserer Geschichte aber erst Ende 1925 betreten wird. Es war dies ein unglaublich mutiger Schritt von de Broglie. Der altehrwürdige Physiker und Mathematiker Lorentz soll in einem Gespräch mit Planck entsetzt gesagt haben:

*Diese jungen Leute nehmen es doch gar zu leicht, alte physikalische Begriffe beiseite zu setzen.*⁸

Ja, für kühne Schritte schien die Zeit wohl einfach gekommen. Im selben Monat dehnte sich das Universum nämlich auch noch auf ganz andere Weise aus. Edwin Hubble konnte 1923 nachweisen, dass der Andromedanebel weit außerhalb unserer Milchstraßen-Galaxie liegt, mithin eine eigene Galaxie bildet. Seine Ergebnisse hatte Hubble nun niedergeschrieben und legte sie ebenfalls in diesem November der American Astronomical Society vor. Was früher für einen Nebel gehalten wurde, war seit der Antike bekannt, und viele Erklärungen konkurrierten miteinander, so zum Beispiel auch die von dem schlaunen Kant, der die nebligen Sterne sehr richtig für milchstraßenähnliche Sternsysteme hielt. Hubbles Entdeckung war einfach gewaltig. Unsere Milchstraße nur eine unter vielen Galaxien! Unser Universum, noch viel, viel größer als das Milchstraßensystem! Welch immense Erweiterung unserer Horizonte! Eine radikale Neuvermessung der Grenzen unseres Universums. Ist es ein Zufall, dass man fast gleichzeitig die Grenzen des Universums im ganz Großen wie im ganz Kleinen auszuloten begann, dass man die Gesetzmäßigkeiten im Atom in eben jenem Augenblick zu verstehen versuchte, als man sich der Ausdehnung des Universums bewusst wurde?

So kühn wie Edwin Hubble auf der einen Seite der Skala voranschritt, so kühn rückte zeitgleich Louis de Broglie auf der anderen Seite der Skala vor: als Nobody in einer Doktorarbeit der Welt eine solche Idee vorzulegen. Wie vermessen, weiter schauen zu wollen als Einstein, der das selbst gut so hätte postulieren können, es aber nicht gesehen hatte.

Dezember 1924, Berlin

In Einstein klingt das aufregende Ergebnis des Louis de Broglie noch lange nach. Und jenem Lorentz, den eben dieses Ergebnis so entsetzte, schreibt er im Dezember 1924 einen langen Brief, in dem er erklärt, was ihn so an der Materiewelle von Louis de Broglie fasziniert:

Ich glaube, das ist ein erster schwacher Strahl zur Erhellung dieses schlimmsten unserer physikalischen Rätsel. Ich habe einiges gefunden, was für seine Konstruktion spricht.⁹

Wer war nur dieser de Broglie? Die de Broglies waren eine in Frankreich sehr bekannte Familie. In der Ahnengalerie der de Broglies sind drei Mal der Titel „Marschall von Frankreich“ zu lesen, drei Male wird die Berufsbezeichnung „hochrangige Diplomaten“ aufgeführt, es findet sich ein General und ein Bischof, und zwei de Broglies waren Minister und sogar Premierminister der Republik. Und eben die beiden berühmten Physiker und Brüder: Maurice de Broglie und Louis de Broglie.

Während Louis de Broglie als theoretischer Physiker Weltruhm erlangte, war Maurice ein begnadeter und kennender Experimentalphysiker, der sich mit Röntgenspektroskopie beschäftigt hat. Maurice war Zeit seines Lebens die bei weitem wichtigste Figur für Louis. Er hatte einen nicht zu überschätzenden Einfluss auf dessen Entwicklung, denn er verließ gegen den verbissenen Widerstand seiner Familie als 29 jähriger Offizier die Marine, um in Paris Physik zu studieren. Und zwar bei dem berühmten Paul Langevin. Bei ihm promovierte Maurice, blieb ihm ein Leben lang verbunden und erbte später sogar seinen Lehrstuhl.

Das Freundespaar Paul Langevin und Maurice de Broglie erwarb sich aber auch Verdienste in Hinsicht auf eine sehr berühmte Serie von Fachkonferenzen: den sogenannten Solvay-Konferenzen. Was sind die Solvay Konferenzen? 1910 trafen sich: Ernest Solvay, ein belgischer Großindustrieller, und Walther Nernst, ordentlicher Professor für physikalische Chemie an der Universität zu Berlin, der späteren Humboldt-Universität. Nernst war es gelungen, Herrn Solvay als Sponsor für eine ganze Serie von internationalen Physik-Konferenzen zu gewinnen. Und zwar war es den beiden von vornherein wichtig, dass es nur um die fundamentalsten Fragen gehen sollte und dass nur die berühmtesten Persönlichkeiten auf diesen Konferenzen auftreten sollen: Gipfelkonferenzen der Physik mit maximal 25 Physikern und Chemikern, also ein G25 sozusagen. Diese jährlichen Konferenzen gibt es heute noch. Der erste Konferenztitel stammte von Nernst: Es ging um die Idee von „Quanten in der Physik“. Maurice de Broglie nun hatte von Langevin den Auftrag bekommen, sämtliche Vorträge und Ergebnisse ausführlich und im Detail mitzuschreiben. Diese Mitschriften aller Vorträge wurden dann publiziert. Vor allem auch wegen dieser Publikationen wurde die Tagung ein außerordentlicher Erfolg.

Im November 1911 kam Maurice de Broglie zurück von der ersten Solvay Konferenz. Wenn noch heute die Physikbücher von dieser Konferenz schwärmen, weil dieser unglaublich mitreißende Aufbruch in der Physik niemals wieder so deutlich, so rein zutage getreten ist wie auf diesen exklusiven Konferenzen, wie sehr wird erst der Teilnehmer Maurice geschwärmt haben müssen. Er wird verstanden haben, dass mit der Entdeckung der Quanten die Tür zu einem riesigen, neuen und noch gänzlich unerforschten Wunderland aufgestoßen worden ist. Begeistert wird er seinem kleinen Bruder Louis de Broglie davon erzählt haben. Und hat ihm seine Aufzeichnungen, seine Mitschriften

von der Konferenz gegeben. „Da, Bruder, lies das mal. Da ereignet sich gerade etwas Großes! Da entsteht eine ganz neue Physik! Du bist jung und gescheit und noch ganz am Anfang. Studiere Physik und lasse dich auf die Quanten ein!“ Louis de Broglie kam jedenfalls durch diese Aufzeichnungen (400 Seiten!) mit dem gerade erst entstehenden Feld der Quantenphysik in einen ersten Kontakt. Und er beschloss, Physik zu studieren und sich der Quantenphysik ganz hinzugeben. Er löst seine Verlobung, verbannt die bis dato studierten Geschichtsbücher aus seinem Regal, reduziert seine Sozialkontakte auf ein Minimum und widmet sich fortan allein der Mathematik und Physik.

Dezember 1924, Hamburg

Am 2. Dezember erhält die Redaktion der Zeitschrift für Physik einen Artikel¹⁰ von Wolfgang Pauli:

„Über den Einfluss der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse auf den Zeeman-Effekt“, so der Titel. Es ist eine jener Publikationen, die heute viel zu selten zu finden sind. Sie berichtet von einem negativen Ergebnis: etwas, was hätte sein können, aber was nicht ist. Und gerade deswegen Erkenntnisse bereit hält. Was hätte sein können? Geht man von dem Bohr-Sommerfeld Atommodell aus, in dem Elektronen tatsächlich noch um Kerne kreisen, so sind Elektronen auf Bahnen und durchlaufen diese mit einer ganz gehörigen Geschwindigkeit. Nach Einsteins Relativitätstheorie aber verändern sich Massen bei sehr hohen Geschwindigkeiten und diesen Effekt berechnet Wolfgang Pauli hier für die Leuchtelektronen der Alkalimetalle. Tatsächlich, so findet er, sollte das eine beachtliche Wirkung auf den anomalen Zeeman-Effekt haben und zwar für Alkalis höherer Ordnungszahlen, beispielsweise Cäsium, einen viel größeren als für kleine

Ordnungszahlen, Lithium. Aber eben das haben die Kollegen von Wolfgang Pauli, die Experimentalphysiker Alfred Landé und Ernst Back, so nicht bestätigen können. Und also weiß Pauli nun, dass die Anomalie im anomalen Zeeman-Effekt kein Effekt der Relativitätstheorie ist, nicht auf die Massenzunahme aufgrund höher Geschwindigkeiten zurückzuführen ist. Außerdem weiß er nun endgültig und sicher: Das Bohr-Sommerfeld Model von Elektronen, die Kerne umkreisen, hat definitiv ausgedient. Tschüss! Ein überholtes Modell. Aber wie ist dann der Zeeman-Effekt zu erklären? Und die noch spekulative Antwort auf diese Frage macht die Publikation so wichtig:

Insbesondere werden bei den Alkalien die Impulswerte des Atoms und seine Energieänderungen in einem äußeren Magnetfeld im wesentlichen als eine alleinige Wirkung des Leuchtelektrons angesehen, das auch als Sitz der magneto-mechanischen Anomalie betrachtet wird.¹¹

Und weiter schreibt er: Der anomale Zeeman-Effekt

kommt gemäß diesem Standpunkt durch eine eigentümliche, klassisch nicht beschreibbare Art von Zweideutigkeit der quantentheoretischen Eigenschaften des Leuchtelektrons zustande.

Und mit diesem Wort «Zweideutigkeit» ist nun endlich das Konzept in der Welt, das schließlich zum Begriff des Elektronenspins führen wird. Im Grunde ist der Spin ein halbes Jahr vor der Quantenmechanik geboren worden. Eine Frühchen sozusagen. Unmissverständlich stellt er hier fest, dass das Leuchtelektron sich in zwei Zuständen mit verschiedenem Drehimpuls befinden kann. Hätte er jetzt noch der Sache eine anschauliche Interpretation gegeben und zum Beispiel von der Eigenrotation des Elektrons, mal in die eine Richtung, mal in die andere Richtung,

geschrieben, hätte er nur diesen einen Absatz geschrieben, wäre das menschliche Bedürfnis nach Anschauung befriedigt gewesen und er wäre als der Entdecker des Spins in die Geschichte eingegangen. Wie wichtig ist doch Anschauung! Ein abstrakter Zugang zu Dingen führt stets dazu, dass andere Menschen sich nicht anstecken lassen. Die anschauliche, leider aber irreführende Interpretation holen zwei Studenten aus den Niederlanden ein Jahr später nach: Samuel Goudsmit und George Uhlenbeck, die heute als die Entdecker des Spins gelten.

Wolfgang Pauli verzichtete nicht nur an in diesem Papier, sondern mittlerweile ganz grundsätzlich auf jedwede anschauliche Interpretation seiner Resultate. Er hatte nun wirklich innerlich akzeptiert, dass das Modell eines Elektrons, was auf festen, berechenbaren Kreisbahnen um Kerne flog, einfach nicht der Realität entsprach. Und er wollte sich nicht nur von diesem anschaulichen Modell, er wollte sich von jedem anschaulichen Modell verabschieden. Wie töricht, dass wir uns mit diesen kindischen Vorstellungen im Kopf in die Welt der Atome aufmachen, nur um immer wieder und wieder realisieren zu müssen, dass uns eben diese Modelle eigentlich nur im Weg stehen. Warum sollte ein aus den Anschauungen der makroskopischen Welt abgeleitetes Modell die Verhältnisse im Mikrokosmos irgendwie beschreiben können? Ist das nicht eine ganz andere Welt? Mit ganz anderen Gesetzmäßigkeiten? An Arnold Sommerfeld schrieb er dazu am 6. Dezember 1924

Die Modellvorstellungen befinden sich ja jetzt in einer schweren, prinzipiellen Krise, von der ich glaube, daß sie schließlich mit einer weiteren radikalen Verschärfung des Gegensatzes zwischen klassischer und Quanten-Theorie enden wird. Man hat jetzt stark den Eindruck bei allen Modellen, wir sprechen da eine Sprache, die der Einfachheit und Schönheit der Quantenwelt nicht genügend adäquat ist.¹²

Und an Bohr schreibt er eine Woche später:

*Wir dürfen aber nicht die Atome in die Fesseln unserer Vorurteile schlagen wollen (zu denen nach meiner Meinung auch die Annahme der Existenz von Elektronenbahnen im Sinne der gewöhnlichen Kinematik gehört), sondern wir müssen umgekehrt unsere Begriffe der Erfahrung anpassen.*¹³

Wenn man die Geschichte kennt und wenn man weiß, in welchem engem Kontakt Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli miteinander waren, dann liest sich gerade dieser Satz wie eine Anweisung an Werner Heisenberg, der nur ein halbes Jahr später die Quantenmechanik in Helgoland entstehen lässt, ausgehend von eben dieser Grundannahme: Elektronen im Atom laufen gar nicht auf festen Bahnen um den Kern! Wir müssen uns ganz von der Vorstellung von Elektronenbahnen lösen. Niemand wird sie je beobachten können. Und was man nicht beobachten kann, das gibt es auch nicht. Man sieht also, dass sein Counterpart Wolfgang Pauli dem klugen Werner Heisenberg hier eben diese beiden Regieanweisungen für sein weiteres Vorgehen mitgibt:

1. Bitte keine auf anschaulichen Vorstellungen basierenden Modelle, nur weil es einem schön und angenehm ist, sich die Vorgänge auch vorstellen zu können.
2. Bitte insbesondere keine Elektronenbahn mehr!

Und das war das Programm, mit dem Heisenberg dann ja auch erfolgreich wurde. Und insofern ist klar, dass er, Wolfgang Pauli, bei der Entdeckung des Spins sich selbst keinesfalls auf eine anschauliche, aber stets ein wenig zweifelhafte Deutung der von ihm so genannten „Zweideutigkeit“ der Elektronen einlassen wollte.

Das also war im Ausgang des Jahres 1924 die Situation: Pauli macht sich auf den Weg, den Spin zu entdecken und gibt seinem Freund Heisenberg die wichtigen Regieanweisungen mit auf den Weg, mit deren Hilfe dieser die eigentliche Quantenmechanik entstehen lässt. Und damit man der Geschichte der nächsten Jahre gut folgen kann, muss man sich einen Zopf vorstellen, der ja bekanntlich aus drei Strängen geflochten wird. Der erste und früheste Strang hat mit Wolfgang Pauli und der Entdeckung des Spins zu tun. Der zweite Strang hat mit Werner Heisenberg und seiner Helgoländer Entdeckung zu tun, dass Elektronen nicht über Bahnen, sondern mit Matrizen zu verstehen sind. Und der dritte Strang wird erst 1926 ins Spiel kommen und den hat Erwin Schrödinger mit seiner Wellenmechanik in der Hand. Erst wird dann Schrödingers Strang mit dem von Heisenberg verbunden und erst ganz spät, eigentlich erst 1928, gelingt es einem Paul Dirac auch noch den dritten Strang, den mit dem Spin nämlich, zu dem eigentlichen Zopf zu flechten.

Ob Heisenberg und Pauli wirklich Freunde im engeren Sinne waren, ist übrigens nicht ganz klar.

Heisenberg, Jahrgang 1901, Pauli, Jahrgang 1900. Sie sind die zwei Wunderknaben dieser Geschichte, sie haben die gleichen drei akademischen Väter. Beide wurde von weltberühmten Theoretikern mit absoluter Hingabe und exklusiver Aufmerksamkeit ausgebildet. Und diese drei waren die Herren Professoren Arnold Sommerfeld aus München, Max Born aus Göttingen und Niels Bohr aus Kopenhagen, die zusammen die beiden begabten Studenten in absolute Ausnahmephysiker transformierten.

*Bei Sommerfeld hab' ich den Optimismus gelernt, bei den Göttingern die Mathematik, bei Bohr die Physik.*¹⁴