

WERNER HEISENBERG



Physik und Philosophie

HIRZEL

Werner Heisenberg

Physik und Philosophie

Werner Heisenberg

Physik und Philosophie

8. Auflage

Mit einem Beitrag von Günther Rasche
und Bartel L. van der Waerden



S. Hirzel Verlag Stuttgart

Das amerikanische Original „Physics and Philosophy“ erschien 1958 in „The World Perspective Series“, geplant und herausgegeben von Dr. Ruth Nanda Ansien, bei Harper & Brothers, New York.

Ein Markenzeichen kann warenrechtlich geschützt sein, auch wenn ein Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN 978-3-7776-2153-1

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzungen, Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

8. Auflage 2011
7., korrigierte Auflage 2007
6. Auflage 2000
5. Auflage 1990
4. Auflage 1984
3. Auflage 1978
2. Auflage 1972
1. Auflage 1959

Alle Rechte vorbehalten.

© 2011 S. Hirzel Verlag, Birkenwaldstraße 44,
70191 Stuttgart.

Printed in Germany.

Satz: Hahn Medien GmbH, Kornwestheim

Druck CPI – Ebner & Spiegel, Ulm

Einbandgestaltung: Neil McBeath, Stuttgart

INHALT

Werner Heisenberg und die moderne Physik Von G. Rasche und B. L. van der Waerden	7
Vorwort	4 I
Die Bedeutung der modernen Physik in unserer Zeit	43
Die Geschichte der Quantentheorie	47
Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie	67
Die Quantentheorie und die Anfänge der Atomlehre	87
Die Entwicklung der philosophischen Ideen seit Descartes im Vergleich zu der neuen Lage in der Quantentheorie	111
Die Bezeichnungen der Quantentheorie zu anderen Gebieten der Naturwissenschaft	135
Die Relativitätstheorie	159
Kritik und Gegenvorschläge zur Kopenhagener Deutung der Quantentheorie	185
Die Quantentheorie und die Struktur der Materie	207
Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik	237
Die Rolle der modernen Physik in der gegenwärtigen Entwicklung des menschlichen Denkens	263

WERNER HEISENBERG UND DIE MODERNE PHYSIK

G. Rasche und B. L. van der Waerden

EINLEITUNG

Werner Heisenberg war einer der größten Physiker und Denker unserer Zeit. Zwischen den beiden Weltkriegen hat er auf allen grundsätzlich wichtigen Gebieten der Physik Entscheidendes beigetragen. Die von *ihm* und unabhängig auf andere Weise von Schrödinger geschaffene Quantenmechanik hat die Grundlagen der Naturwissenschaften in revolutionärer Weise verändert. An der philosophischen Interpretation der neuen Theorie hatte Heisenberg entscheidenden Anteil. Auch ihre Konsequenzen für konkrete experimentelle Fragestellungen behandelte er intensiv.

Wir wollen hier die überragenden physikalischen Leistungen Heisenbergs in elementarer Weise darstellen. Dabei soll gezeigt werden, auf welch verschiedenartigen Gebieten das Genie Heisenberg zu arbeiten imstande war und wie er die Physik auffasste. Unsere Darstellung kann dabei im vorliegenden Rahmen nicht vollständig sein. Wir werden sogar im Einzelnen eine formal einfachere Beschreibung wählen als in den Originalarbeiten. Das erleichtert die Verständlichkeit; es bedeutet aber keine Änderung der physikalischen Grundgedanken Heisenbergs, auf die es uns hier ankommt. Eine ausführlichere Beschreibung der Arbeiten Heisenbergs wurde von einem von uns (G. R.) in „Naturwissenschaftliche Rundschau“ 30, 1 (1977) gegeben. Eine Zusammenstellung der Originalarbeiten findet man von A. Giese bearbeitet in „Zeitschrift für Naturforschung“ 31a

510 (1976). Wörtliche Zitate aus den Heisenberg'schen Arbeiten werden in Anführungszeichen gesetzt.

LEHRZEIT UND QUANTENMECHANIK

Heisenberg wurde am 5. Dezember 1901 in Würzburg geboren und wuchs in München auf. Dort besuchte er auch das Maximiliansgymnasium, welches er 1920 nach der Reifeprüfung verließ.

Philosophie und Physik waren für Heisenberg nicht getrennt. Wegweisend für seine Forschung in der Physik waren von jeher philosophische Überlegungen. Schon als ganz junger Mensch stellte Heisenberg sich Fragen wie „Was können wir erkennen?“ und „Was müssen wir von einer Erklärung der Natur verlangen?“. Zeit lebenslang legte er sich diese Fragen immer wieder vor.

Er liebte die Natur, die Wälder und Seen seiner bayerischen Heimat. Auf Wanderungen mit gleich gesinnten Kameraden hat er immer wieder philosophische Gespräche geführt über Gott, über Plato, über die Struktur der Atome ... Er hat uns diese Gespräche in seinen Lebenserinnerungen „Der Teil und das Ganze“ beschrieben, und man sieht daraus, wie wichtig sie für sein wissenschaftliches Denken geworden sind.

Nach Abschluss des Gymnasiums war Heisenberg im Zweifel, ob er Mathematik oder Physik studieren sollte. Ein erstes Gespräch mit dem Mathematik-Professor Lindemann fiel nicht ermutigend aus, aber Sommerfeld, der Autor des damaligen Standardwerkes „Atombau und Spektrallinien“, ermutigte Heisenberg, Physik zu studieren.

Sommerfeld hatte, wie Einstein einmal schrieb, „die Gabe, die Geister seiner Hörer zu veredeln und zu aktivie-

ren“. Sommerfeld erkannte sehr bald die ungewöhnliche Begabung des jungen Heisenberg und stellte ihm schon im ersten Semester eine schwere Aufgabe, nämlich: aus den gemessenen Wellenlängen der Linien des anomalen Zeemaneffektes das Termschema (d. h. die Energiestufen) des Atoms zu erraten.

In weniger als zwei Wochen hatte Heisenberg das Problem gelöst. Damit war er, 19 Jahre alt, in die vorderste Linie der Forschung vorgerückt. Bei der Erläuterung seiner Lösung sagte Heisenberg zu Sommerfeld: „Die Sache funktioniert nur, wenn man halbe Quantenzahlen verwendet.“ Sommerfeld war schockiert: „Das muss falsch sein“, sagte er, „das ist alles völlig ausgeschlossen.“

Aber Heisenberg hatte Recht, und später haben Heisenberg und Sommerfeld die Theorie publiziert.

Von großer Bedeutung für die Entwicklung der Ideen Heisenbergs war die Freundschaft mit Wolfgang Pauli, die von 1920 bis zum Tode Paulis währte. Heisenberg hat das Verhältnis zu Pauli in seinen Lebenserinnerungen mit den folgenden Worten geschildert: „... Wolfgang Pauli ... hat in der ganzen späteren Zeit, so lange er lebte, für mich und für das, was ich wissenschaftlich versuchte, die Rolle des stets willkommenen, wenn auch sehr scharfen Kritikers und Freundes gespielt.“ Die beiden Freunde waren sehr verschieden. Heisenberg liebte den hellen Tag, die Berge und die Natur, Pauli die Großstadt, die Kaffeehäuser und die Nächte. Auch ihre Art, Physik zu betreiben, war verschieden. Paulis Stärke war die logische Analyse, das genaue Durchdenken der Begriffe, die vorbildlich klare Darlegung der Grundgedanken. Heisenbergs Kraft lag in der Intuition, im Ahnen von Zusammenhängen, im Bilden von

fruchtbaren neuen Begriffen. Gerade darum ergänzten die beiden einander so gut.

Im Sommer 1922 hielt Niels Bohr, der Begründer der Quantentheorie des Atoms, in Göttingen eine Reihe von Vorträgen. Der 20jährige Heisenberg war dabei und machte am Ende des dritten Vortrags einen Einwand, den Bohr nicht ganz von der Hand weisen konnte. Bohr hatte über eine Arbeit von Kramers referiert, über den „Quadratischen Stark-Effekt“, das heißt über die Wirkung, die ein konstantes elektrisches Feld auf ein Wasserstoffatom ausübt. Bohr meinte, obwohl die Grundlagen der Theorie noch ganz ungeklärt seien, könne man doch wohl annehmen, dass die Ergebnisse von Kramers richtig seien.

Heisenberg kannte die Arbeit von Kramers; daher wagte er es, am Ende des Vortrags seine Zweifel zu äußern. Er sagte: Ein konstantes elektrisches Feld ist doch ein Grenzfall einer Lichtwelle mit sehr großer Wellenlänge. Nun weiß man aber, dass die klassische Berechnung der Streuung von Licht an einem Wasserstoffatom auch bei großen Wellenlängen ein ganz falsches Resultat liefert. Die Resonanz sollte nämlich bei der Umlauffrequenz des Elektrons in seiner Bahn stattfinden. Sie findet aber effektiv bei der Frequenz des absorbierten Lichtes statt. Also konnte nach Heisenbergs Meinung die Rechnung von Kramers auch nicht zum richtigen Resultat führen.

Bohr antwortete zögernd, so, als sei er durch den Einwand etwas beunruhigt. Nach Ablauf der Diskussion forderte er den blonden Jüngling zu einem Spaziergang auf den Göttinger Hainberg auf. Heisenberg schreibt darüber: „Dieser Spaziergang hat auf meine spätere wissenschaftliche Entwicklung den stärksten Einfluss ausgeübt, oder

man kann vielleicht besser sagen, dass meine eigene wissenschaftliche Entwicklung erst mit diesem Spaziergang angefangen hat.“

Schon früher waren Heisenberg Zweifel gekommen, ob es sinnvoll sei, von Elektronenbahnen im Atom zu sprechen. Heisenberg erfuhr nun, dass Bohr selbst seiner eigenen Theorie skeptisch gegenüberstand und dass er selbst nicht unbedingt davon überzeugt war, dass es im Atom Kreis- und Ellipsen-Bewegungen nach den Gesetzen der klassischen Mechanik gebe. Bohrs Ausgangspunkt war vielmehr die rätselhafte Stabilität des Atoms, die man mit der Mechanik nicht erklären kann. Bohr ging also nicht – wie etwa Sommerfeld – von fest umrissenen, mathematisch genau definierten Voraussetzungen aus, sondern er suchte, von den Phänomenen ausgehend und durch Intuition geleitet, tastend seinen Weg zu einer neuen Physik. Diese Art der Forschung wurde für Heisenberg wegweisend.

Im Juli 1923 promovierte Heisenberg mit einer Doktorarbeit über Turbulenz. In seinem Gutachten über diese Arbeit schrieb Sommerfeld: „An der Behandlung des gegenwärtigen Problems zeigt der junge, hochbegabte Verfasser seine außerordentlichen Fähigkeiten von Neuem: volle Beherrschung des mathematischen Apparates und kühne physikalische Anschauung.“

Im Oktober 1923 wurde Heisenberg Rockefeller-Stipendiat bei Max Born in Göttingen. Nach der Beschreibung, die Born in seinen Recollections gibt, sah Heisenberg aus wie ein einfacher Bauernbub mit einem charmannten Ausdruck in seinen klaren, hellen Augen. „Seine unglaublich schnelle und genaue Auffassungsgabe erlaubte

ihm, ohne große Anstrengung eine enorme Arbeit zu leisten“, schreibt Born. Und: „Er war mir eine große Hilfe.“

Im Sommer 1924 ging Heisenberg auf Einladung von Niels Bohr nach Kopenhagen. Dort schrieb er mit Kramers zusammen eine wegweisende Arbeit über die Streuung des Lichtes an Atomen. Die Grundidee dieser Arbeit war: Wenn man die Emission von Licht durch ein Atom verstehen will, so muss man doch wohl annehmen, dass irgendetwas im Atom mit derselben Frequenz schwingt wie das ausgesandte Licht. Dieses „irgendetwas“, was da schwingt, nannte man damals in Kopenhagen einen „virtuellen Oszillator“.

Das Wort „virtuell“ bedeutet so viel wie „fingiert“ oder „als ob“. Die Idee ist also, dass das Atom mit allen seinen kreisenden Elektronen in Gedanken durch ein System von Oszillatoren ersetzt wird. Aus den angenommenen Amplituden dieser Oszillatoren berechnet man dann nach der klassischen Elektrodynamik die Intensitäten der ausgesandten oder gestreuten Lichtwellen. Heisenberg steckte sich nun das Ziel, Bewegungsgesetze und Quantenbedingungen für die virtuellen Schwingungen zu finden. Als Leitfaden diente ihm dabei ein heuristisches Prinzip, das Niels Bohr aufgestellt hatte: das „Korrespondenzprinzip“. Es besagt: Die Gesetze der Quantentheorie müssen so sein, dass sie im Grenzfall großer Quantenzahlen in die klassischen Gesetze übergehen. Heisenbergs Problem war also: Bewegungsgesetze und Quantenbedingungen zu finden, die im Grenzfall die klassischen Bewegungsgesetze und Quantenbedingungen ergeben.

Den Schlüssel zur Lösung dieser Aufgabe fand Heisenberg im Juni 1925. Ein heftiger Anfall von Heuschnupfen

zwang ihn, sich nach Helgoland zurückzuziehen, wo kein Gras wächst. Dort arbeitete er Tag und Nacht an seiner „quantentheoretischen Umdeutung“ der alten Kinematik und Mechanik. Wesentlich war für ihn, dass er die Vorstellung einer Bahnbewegung der Elektronen gänzlich fallen ließ. Er betrachtete das Atom ausschließlich als ein System von Oszillatoren. Jeder dieser Oszillatoren entspricht einem möglichen Übergang von einem Zustand n zu einem Zustand m , und die Amplituden dieser Oszillatoren sind komplexe Zahlen a_{nm} mit zwei Indizes n und m . Es galt nun, für die a_{nm} Bewegungsgesetze und Quantenbedingungen zu finden.

Heisenberg hatte den genialen Einfall, die Bewegungsgesetze ungeändert aus der klassischen Mechanik zu übernehmen, wobei es nur nötig war, die Multiplikation von klassischen Größen durch eine geeignete Multiplikation der a_{nm} zu ersetzen. Born hat später erkannt, dass diese von Heisenberg erfundene Rechenregel nichts anderes ist als die wohl bekannte Matrixmultiplikation.

Nun fehlte noch die Quantenbedingung. Geleitet durch das „Korrespondenzprinzip“, nahm Heisenberg die alte Quantenbedingung $\int pdq = nh$ und änderte die darin vorkommenden Multiplikationen passend ab, nach Analogie seiner Multiplikationsregel für die a_{nm} . Dabei ersetzte er noch Differenzialquotienten durch Differenzen-Quotienten und eine brauchbare, plausible Quantenbedingung war gefunden.

Der Prüfstein für die Richtigkeit der Theorie war für Heisenberg die Erhaltung der Energie. Die entscheidenden Stunden eines wesentlichen Erfolges seines Vorgehens hat Heisenberg später mit den Worten beschrieben:

„In Helgoland war ein Augenblick, in dem es mir wie eine Erleuchtung kam, als ich sah, dass die *Energie zeitlich konstant* war. Es war ziemlich spät in der Nacht. Ich rechnete es mühsam aus, und es stimmte. Da bin ich auf einen Felsen gestiegen und habe den Sonnenaufgang gesehen und war glücklich.“

Am 9. Juli 1925 war die Arbeit „Quantenmechanische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen“ fertig geschrieben. Die Theorie wurde von Born, Jordan und Dirac vervollständigt und in der großen „Dreimännerarbeit“ von Born, Heisenberg und Jordan systematisch dargestellt. Eine andere Form der Quantenmechanik, die „Wellenmechanik“, wurde von Schrödinger Anfang 1926 gefunden. Nach diesen Publikationen sah die Physik völlig anders aus als vorher.

Ein Gesichtspunkt, von dem Heisenberg sich beim Aufstellen seiner Theorie hatte leiten lassen, war, dass in einer guten Theorie nur beobachtbare Größen auftreten sollten. In der Einleitung zu Heisenbergs „Umdeutung“ wird dieses Ziel nachdrücklich formuliert. Es heißt dort, dass der Ort und die Umlaufzeit eines Elektrons im Atom nicht beobachtbar sind, und es wird gefordert, eine Theorie aufzustellen, in der nur Relationen zwischen beobachtbaren Größen auftreten. Heisenberg selbst hat diese Forderung nicht erfüllt: In seiner Theorie kommen nicht nur beobachtbare Größen vor. Worauf es ankommt, ist, dass Heisenberg intuitiv, mit genialem Griff die *richtigen* Größen a_{nm} in seine Theorie eingebaut hat.

Im Frühjahr 1926 besuchte Heisenberg Albert Einstein in Berlin. Einstein brachte das Gespräch auf die von Heisenberg erhobene Forderung, „in die Theorie nur solche Grö-

ßen aufzunehmen, die beobachtet werden können“. Als Heisenberg diese Forderung noch einmal deutlich formulierte, sagte Einstein: „Aber Sie glauben doch nicht im Ernst, dass man in eine physikalische Theorie nur beobachtbare Größen aufnehmen kann.“ Heisenberg fragte erstaunt: „Haben denn Sie nicht selbst gerade diesen Gedanken zur Grundlage Ihrer Relativitätstheorie gemacht? Sie hatten doch betont, dass man nicht von absoluter Zeit reden dürfe, da man diese absolute Zeit nicht beobachten kann.“ Darauf Einstein: „Vielleicht habe ich diese Art von Philosophie benützt, aber sie ist trotzdem Unsinn.“ Und nun formulierte Einstein eine wunderbare philosophische Einsicht: „Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann“, oder ausführlicher: „Erst die Theorie, das heißt, die Kenntnis der Naturgesetze, erlaubt es uns, aus dem sinnlichen Eindruck auf den zugrunde liegenden Vorgang zu schließen.“ Diese tiefe Einsicht erläuterte Einstein durch Beispiele. Heisenberg war erstaunt und beeindruckt.

Im darauf folgenden Herbst und Winter gab es eindringliche Diskussionen in Kopenhagen, zuerst zwischen Schrödinger und Bohr, dann zwischen Bohr und Heisenberg über die Schwierigkeiten der Deutung der Quantentheorie. Zum Beispiel: Das Licht breitet sich als Welle aus nach der Maxwell'schen Theorie, und doch beobachten wir, dass an einer Stelle in einem Augenblick ein Lichtquant absorbiert wird. Wie ist das möglich? Oder: Ein Elektron tritt durch eine Öffnung in eine Nebelkammer ein. Die Schrödingersche Wellenfunktion sollte nach der Theorie nach allen Seiten immer mehr zerfließen. Aber was wir beobachten, ist eine nahezu geradlinige Bahn, die nicht breiter wird. Wie kann man das erklären?

Im Februar 1927, an einem Abend gegen Mitternacht, fand Heisenberg mit einem Mal einen Ausweg aus allen Schwierigkeiten. Er erinnerte sich an den Ausspruch von Einstein: „Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.“ Man sollte also die Theorie befragen, welche Beobachtungen möglich sind und welche nicht. Und siehe da: Bei konsequenter Anwendung der Theorie, das heißt der Wellenmechanik, kam heraus, dass sie genau alle die Phänomene erklärt, die man auch wirklich beobachtet hat und beobachten kann.

Die Ausarbeitung dieser Idee führte Heisenberg zu seiner Arbeit „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“. Zunächst heißt es darin: „Eine physikalische Theorie glauben wir dann anschaulich zu verstehen, wenn wir uns in allen einfachen Fällen die experimentellen Konsequenzen dieser Theorie qualitativ denken können und wenn wir gleichzeitig erkannt haben, dass die Anwendung der Theorie niemals innere Widersprüche enthält.“ Heisenberg schließt dann aus dem Formalismus der Quantenmechanik, dass man bei den experimentellen Gegebenheiten Ort und Geschwindigkeit eines Teilchens nie gleichzeitig exakt messen kann. Das Produkt der unvermeidbaren Unbestimmtheiten Δx (des Ortes) und Δp (des Impulses) muss größer sein als die Planck'sche Konstante h :

$$\Delta x \Delta p > h \text{ (Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation)}$$

In der klassischen Mechanik wird die Bahn eines Teilchens mittels der Newton'schen Bewegungsgleichungen festgelegt durch Vorgabe der genauen Werte für Ort und Impuls

zu einer bestimmten Zeit. Das ist nun nicht mehr möglich. Für atomare Phänomene wird die Unbestimmtheitsrelation wichtig, und die klassische Mechanik ist nicht mehr anwendbar, man hat atomare Systeme nach den neuen Gesetzen der Quantenmechanik zu behandeln. Zu diesen gehört eine Wahrscheinlichkeitsinterpretation; eine im klassischen Sinne kausale Determiniertheit der Einzelereignisse gibt es deshalb nicht mehr. Wie entsteht dann eine Bahn? „Die ‚Bahn‘ entsteht dadurch, dass wir sie beobachten.“

Es ist schwer zu beurteilen, ob Heisenberg in seiner Arbeit den Anschluss der Quantenmechanik an die Möglichkeiten der Messung ‚anschaulich‘ gemacht hat. Jedenfalls konnte das später niemand besser. Es ist eben schwierig, ein ‚Wellenbild‘ mit einem ‚Teilchenbild‘ in Übereinstimmung zu bringen. Heisenberg wusste das; in seinen Lebenserinnerungen sagt er:

„Die Quantentheorie ist so ein wunderbares Beispiel dafür, dass man einen Sachverhalt in völliger Klarheit verstanden haben kann und gleichzeitig doch weiß, dass man nur in Bildern und Gleichnissen von ihm reden kann.“

Die Quantenmechanik als physikalische Theorie aber war mit dieser Arbeit abgeschlossen. Der interessante Kalkül, mit dem Heisenberg am Anfang gespielt hatte, war zu einem geschlossenen, konsequent durchdachten Lehrgebäude geworden.

Im Jahre 1933 wurde Heisenberg mit der Max-Planck-Medaille und dem Nobelpreis ausgezeichnet. Bereits 1927 war er ordentlicher Professor für theoretische Physik in Leipzig geworden.

MEHRKÖRPERPROBLEM UND RESONANZ

Schon vor seiner Entdeckung der quantenmechanischen Gesetze hatte sich Heisenberg mit der Deutung des Helium-Spektrums beschäftigt. So war es natürlich, dass er unmittelbar nach den Erfolgen der neuen Theorie bei Einteilchenproblemen auch das Mehrkörperproblem zu lösen versuchte. Das gelang ihm in drei wichtigen Arbeiten in der zweiten Hälfte 1926.

Heisenberg orientierte sich dabei wieder an einem einfachen Modell. Er betrachtete *zwei* lineare harmonische Oszillatoren *gleicher* Masse und *gleicher* Frequenz; diese werden dann durch eine Wechselwirkungsenergie miteinander gekoppelt, welche proportional dem Produkt der beiden Auslenkungen ist. Dieses System hat drei Vorteile. Zunächst lässt es sich nach einer bekannten mathematischen Umformung wie zwei ungekoppelte Oszillatoren verschiedener Frequenzen behandeln. Es ist deshalb sowohl klassisch als auch quantenmechanisch exakt lösbar. Ferner gibt es in diesem einfachen Fall zu jedem quantenmechanischen Resultat ein klassisches Analogon; bei der Behandlung komplizierter Systeme fehlt diese Orientierungsmöglichkeit. Drittens trägt die vollkommene Gleichheit der beiden Oszillatoren dem charakteristischen Zug der Atomsysteme Rechnung, „dass die Teilsysteme, aus denen sie zusammengesetzt werden können, nämlich die Elektronen, gleich und gleichen Kräften unterworfen sind“.

Heisenberg erklärt dann mit der quantenmechanischen Lösung dieses Modells in allen Einzelheiten das Zustandekommen zweier verschiedener Termsysteme, welche spektroskopisch nicht kombinieren. In den erwähnten Arbeiten wird mehr und mehr die Schrödinger'sche Wellenme-

chanik verwendet, weil sie für die Rechnungen „bequemer“ ist.

Bei Heisenberg spielte der Begriff „Resonanz“ eine große Rolle. Er betont, dass sie „in der Quantenmechanik ein viel allgemeineres Phänomen als in der klassischen Theorie“ darstellt. Wir wollen diesen quantenmechanischen Resonanzbegriff etwas weiter ausführen in einer Weise, welche Heisenberg damals schon beschrieben hat. Dabei beschränken wir uns auf das einfache Beispiel des Zweielektronensystems und wählen konkret das He-Atom. Der Kern hat die positive Ladung $2e$ und sei in Ruhe, das heißt unbewegt. Zunächst *vernachlässigen* wir nun die Coulomb'sche Abstoßungsenergie zwischen den beiden Elektronen. Jedes Elektron steht also nur unter dem Einfluss der Coulomb-Anziehung vom He-Kern. Es kann deshalb in einem bestimmten Einteilchenzustand mit der Quantenzahl n sein. Sei das erste Elektron in diesem Einteilchenzustand; es wird dann durch die Wellenfunktion

$$\varphi_n(1) \text{ mit der Energie } E_n$$

beschrieben. Hier steht 1 für die Raumlagekoordinaten des ersten Elektrons; die Raumlagekoordinaten des zweiten Elektrons bezeichnen wir im Folgenden mit 2.

Das zweite Elektron kann in einem anderen Einteilchenzustand mit der Quantenzahl n' sein; es wird durch die Wellenfunktion $\varphi_{n'}$,

(2) mit der Energie $E_{n'}$ beschrieben. Die Wellenfunktion des He-Atoms ist dann das Produkt aus den beiden Einteilchenwellenfunktionen. Der Grundzustand wird z. B. beschrieben durch:

$$\psi_{oo}(1,2) = \varphi_o(1) \varphi_o(2) \text{ mit der Energie } E_o + E_o$$

Die angeregten Zustände des He-Atoms ergeben sich dadurch, dass *eines* der beiden Elektronen im Einteilchengrundzustand ist, das *andere* in einem angeregten Einteilchenzustand; also z. B.:

$$\psi_{on}(1,2) = \varphi_o(1) \varphi_n(2) \text{ mit der Energie } E_o + E_n$$

Hier ist das erste Elektron im Einteilchengrundzustand, das zweite im angeregten Einteilchenzustand mit der Quantenzahl n . Vertauscht man die beiden Elektronen zwischen den beiden Einteilchenzuständen, so erhält man einen angeregten He-Zustand, welcher durch die Wellenfunktion

$$\psi_{no}(1,2) = \varphi_o(2) \varphi_n(1) \text{ mit der Energie } E_n + E_o$$

beschrieben wird. Die Energien sind also gleich, die Wellenfunktionen dagegen sind verschieden. Eine solche Situation bezeichnet man als Entartung. Diese ist hier eine Folge davon, dass die beiden Elektronen „gleich und gleichen Kräften unterworfen“ sind. Wir konnten sie austauschen; man spricht deshalb genauer von Austauschentartung. Sie ist in diesem Beispiel die Ursache für das im Weiteren zu besprechende Resonanzphänomen. Der Grundzustand $\psi_{oo}(1,2)$ des He-Atoms zeigt keine Austauschentartung. Wenn man nämlich in $\varphi_o(1) \varphi_o(2)$ die Raumlagen 1 und 2 miteinander vertauscht, erhält man *keine* neue Wellenfunktion.

Wenn wir jetzt die Coulomb-Abstoßung zwischen den Elektronen berücksichtigen, so sind weder ψ_{no} noch ψ_{on} die richtigen Wellenfunktionen für den angeregten Zustand des He-Atoms. Man kann aber zeigen, dass die richtigen

Wellenfunktionen sich näherungsweise folgendermaßen darstellen lassen:

$$\begin{aligned}\psi_{n+}(1,2) &= \psi_{on}(1,2) + \psi_{no}(1,2) \\ \psi_{n-}(1,2) &= \psi_{on}(1,2) - \psi_{no}(1,2)\end{aligned}$$

Wenn man die Coulomb-Abstoßung zwischen den beiden Elektronen vernachlässigt, so gehören ψ_{n+} und ψ_{n-} wieder zur gleichen Energie $E_n + E_o$ wie ψ_{no} und ψ_{on} . Die durch die Coulomb-Abstoßung entstehende Zusatzenergie ΔE ist aber für ψ_{n+} und ψ_{n-} verschieden:

$$(\Delta E)_{n+} \neq (\Delta E)_{n-}$$

Der entartete Energiewert $E_o + E_n$ des He-Atoms spaltet also auf in zwei Energiewerte mit den Energien:

$$\begin{aligned}E_{n+} &= E_o + E_n + (\Delta E)_{n+} \\ &\text{(entsprechend einem Parazustand des Termsystems)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_{n-} &= E_o + E_n + (\Delta E)_{n-} \\ &\text{(entsprechend einem Orthozustand des Termsystems)}\end{aligned}$$

und den zugehörigen Wellenfunktionen ψ_{n+} bzw. ψ_{n-} . Die Funktion $\psi_{n+}(1,2)$ hat die wesentliche Eigenschaft, dass sie bei Vertauschung der Raumlagekoordinaten gleich bleibt, sie ist symmetrisch:

$$\psi_{n+}(1,2) = \psi_{n+}(2,1).$$

$\psi_{n-}(1,2)$ hingegen ist antisymmetrisch:

$$\psi_{n-}(1,2) = -\psi_{n-}(2,1)$$

Als Folge davon sind in den Wellenfunktionen des He-Atoms die Unterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Elektron völlig verwischt: Sie sind ununterscheid-

bar geworden. Es hat keinen Sinn, Elektronen überhaupt zu nummerieren. Eine klassische Deutung dieser Tatsache ist fast gänzlich unmöglich. Im einfachen Beispiel des angeregten He-Atoms darf man sich aber noch folgendes Bild machen: Bei Vernachlässigung der Coulomb-Abstoßung ist *ein* Elektron im Einteilchengrundzustand, das *andere* in einem angeregten Einteilchenzustand. Die Berücksichtigung der Coulomb-Abstoßung führt dann zu einem Hin- und Herpulsieren der Energie zwischen den beiden Elektronen. Daraus entstehen der Ortho-zustand und der Parazustand: Den Energieunterschied $E_{n-} - E_{n+}$ zwischen beiden kann man als „eine durch die Coulomb’schen Abstoßungskräfte der Elektronen hervorgerufene Resonanzschwebung“ interpretieren. Damit wird auch die klassisch unverstandene Größe dieses Energieunterschiedes geklärt: Er ist von der Größenordnung der Coulomb-Wechselwirkung.

Wir wollen nun berücksichtigen, dass ein Elektron zusätzlich zu seinem Bahndrehimpuls einen Eigendrehimpuls, den so genannten Spin hat. Den zugehörigen Drehimpulsvektor nennt man Spinvektor, und wir bezeichnen ihn mit \vec{s} ; er hat in Einheiten $h = h/2\pi$ den Betrag $\frac{1}{2}$. Die Komponente von \vec{s} in einer bestimmten Richtung (z. B. z-Richtung) kann nur die beiden Werte $\pm \frac{1}{2}$ haben. Es ist nicht gut möglich, sich einen solchen Vektor elementargeometrisch vorzustellen; aber Pauli hat gezeigt, nach welchen Regeln man mit solchen Vektoren zu rechnen hat.

Für zwei Elektronen hat man zwei Spinvektoren, $\vec{s}^{(1)}$ und $\vec{s}^{(2)}$. Es gibt dann zwei Möglichkeiten: $\vec{s}^{(1)}$ und $\vec{s}^{(2)}$ können sich entweder parallel stellen (Tripletzustand $\uparrow\uparrow$), oder sie können sich antiparallel stellen (Singlettzustand $\uparrow\downarrow$). Mit Hilfe des von Heisenberg quantenmechanisch formulierten

Pauli-Prinzips lässt sich zeigen, dass zu $\uparrow\uparrow$ die Wellenfunktion ψ_{n-} und zu $\uparrow\downarrow$ die Wellenfunktion ψ_{n+} gehört. Die Orthozustände entsprechen also dem Triplettzustand, die Parazustände dem Singlettzustand der beiden Elektronenspins. Deshalb gehört zum Triplettzustand $\uparrow\uparrow$ die Energie E_{n-} und zum Singlettzustand $\uparrow\downarrow$ die Energie E_{n+} . Es sieht also so aus, als ob die beiden Spins eine dynamische Wechselwirkung hätten. Die Energiedifferenz $E_{n-} - E_{n+}$ zwischen einem Zustand mit parallelen Spins und dem entsprechenden Zustand mit antiparallelen Spins kürzt man üblicherweise mit $-2A_n$ ab. Die Größe A_n kann man näherungsweise ausrechnen, man bezeichnet diese Näherung als Austauschintegral. Dieses Integral ist beim He-Atom stets positiv, und deshalb liegt der Singlettzustand höher als der entsprechende Triplettzustand.

Aus den beiden Spinvektoren können wir das Skalarprodukt $\vec{s}^{(1)} \cdot \vec{s}^{(2)}$ bilden. Beschränkt man sich auf die Betrachtung eines einzigen angeregten Zustandes des He-Atoms, so kann man den spinabhängigen Teil der Wechselwirkung zwischen den beiden Elektronen in diesem Zustand durch den Ausdruck

$$-2A_n \vec{s}^{(1)} \cdot \vec{s}^{(2)}$$

beschreiben. Dabei ist natürlich $\vec{s}^{(1)} \cdot \vec{s}^{(2)}$ nach den erwähnten Pauli'schen Regeln zu berechnen. Man bezeichnet die obige Form der Wechselwirkung als Austauschkopplung. Es handelt sich dabei um einen typisch quantenmechanischen Effekt, der *elektrostatischen* Ursprungs ist. Keinesfalls darf man diese Austauschkopplung mit der *magnetostatischen* Dipol-Dipol-Wechselwirkung zwischen den magnetischen Momenten der beiden Elektro-

nen in Verbindung bringen. Diese existiert zwar auch, ist aber viel schwächer und kann praktisch vernachlässigt werden.

Heisenberg hat mit diesen Überlegungen und den dazugehörigen expliziten Rechnungen zunächst das Spektrum des He-Atoms und der He-ähnlichen Ionen quantenmechanisch berechnet und mit den bekannten Messungen verglichen. Die Übereinstimmung bestätigte die Anwendbarkeit der neuen Theorie auf das Mehrkörperproblem. Kurz darauf wandte er dann seine Erkenntnisse auf Atome mit mehr als zwei Elektronen und auf die Bandenspektren der Moleküle an.

DER FERROMAGNETISMUS

Mitte 1927 hatten Heitler und London die Quantenmechanik auf die Theorie der chemischen Bindung angewandt. Der spinabhängige Teil der Wechselwirkungsenergie zweier Wasserstoffatome im Grundzustand lässt sich wiederum mit der Formel

$$-2A\vec{s}_1^{(1)} \cdot \vec{s}_1^{(2)}$$

beschreiben. Dabei ist nun das Austauschintegral A vom Abstand der Wasserstoffkerne abhängig, und es zeigt sich, dass für die chemisch wichtigen Werte dieser Abstände $A < 0$ ist. Der Singlettzustand $\uparrow\downarrow$ liegt also tiefer als der Tripletzustand $\uparrow\uparrow$ und führt zum gebundenen Zustand des H_2 -Moleküls. Auch für die meisten anderen chemischen Anwendungen ist $A < 0$: Die Austauschkräfte bevorzugen energetisch eine antiparallele Spineinstellung. Heisenberg hatte nun die Idee, dass im Falle $A > 0$ die Austauschkräfte eine Parallelstellung der Spins begünstigen

und zur Klärung des Ferromagnetismus benutzt werden könnten. Er führt dies 1928 detailliert aus.

Die damalige Vorstellung vom Zustandekommen der ferromagnetischen Eigenschaften einer Substanz war bereits 1907 von P. Weiss entwickelt worden. Er nahm an, dass jedes Atom im Kristall eine richtende Kraft durch die übrigen Atome des Gitters erfährt, die proportional der Anzahl bereits gerichteter Atome sein soll. Die richtende Kraft wird durch ein Magnetfeld beschrieben; dessen Ursprung war aber ungeklärt. Das Magnetfeld zum Beispiel, welches die magnetischen Momente der gerichteten Atome am Orte eines benachbarten anderen Atoms ausüben, ist viel zu klein, um einen Ferromagnetismus bei Zimmertemperatur zuzulassen. Das steht im Gegensatz zu Erfahrungen mit ganz gewöhnlichen Materialien wie Eisen.

Heisenberg deutete nun das Weiss'sche Magnetfeld durch die Austauschkräfte. Dazu musste er zunächst die richtige Näherungsvorstellung finden; denn die exakte Lösung des Problems für einen Kristall ist unmöglich. Mit großer Intuition wählte er ein Verfahren, dessen Ergebnisse noch heute als Ausgangspunkt für die meisten Rechnungen benutzt und als Heisenberg-Modell bezeichnet werden. Ausführlich schätzte er ab, dass unter gewissen Bedingungen $A > 0$ sein kann und dass diese Bedingungen bei Eisen, Kobalt und Nickel erfüllt sind. Numerisch zeigte sich, dass A groß genug ist, um den Ferromagnetismus bei Zimmertemperatur (d. h. die gemessenen Curie-Temperaturen) zumindest qualitativ zu erklären.

Heisenberg schloss aufgrund seiner Näherungen, dass für das Zustandekommen ferromagnetischen Verhaltens die Zahl z nächster Nachbarn im Kristall mindestens 8 sein

muss. Eisen, Kobalt und Nickel erfüllen diese Bedingung; man kennt aber heute ferromagnetische Verbindungen mit $z = 6$. Das deutet darauf hin, dass die Näherungen in den Heisenberg'schen Rechnungen nicht immer gerechtfertigt sind. Er selbst war sich dieser Problematik schon damals wohl bewusst und schrieb am Ende seiner Arbeit:

„Es war ja auch zu erwarten, dass die hier entworfene Theorie einstweilen nur ein qualitatives Schema bieten kann, in das die ferromagnetischen Phänomene später vielleicht eingeordnet werden.“

Dieser Satz ist ein typisches Beispiel für die von seinen Mitarbeitern und Freunden immer wieder festgestellte Fähigkeit, Fragen offen zu lassen, sie ohne Ungeduld zunächst nur grob und unscharf in den Vorstellungsrahmen einzuordnen.

In diesem Sinne hat Heisenberg 1947 noch einmal versucht, den Gedanken der Austauschkräfte in der Festkörperphysik fruchtbar anzuwenden: bei seiner Theorie der Supraleitung. Dabei sollte die Ordnung der supraleitenden Phase auf der Coulomb'schen Wechselwirkung von Elektronen mit entgegengesetzten Spins beruhen. Heisenberg sagt von seiner Arbeit ausdrücklich, dass sie *keine* „wirklich ausgearbeitete Lösung für das offenbar sehr schwierige Problem der Supraleitung“ vorschlagen kann. Eine solche Lösung wurde erst zehn Jahre später von Bardeen, Cooper und Schrieffer gefunden.

KERNPHYSIK UND ISOSPIN

Vor 1932 hatte sich jede Theorie des Atomkerns damit auseinander zu setzen, dass es im Kern wahrscheinlich Elektronen gibt. Diese mussten eine sehr große kinetische

Energie haben und deshalb relativistisch behandelt werden. Aus der Gamow'schen Erklärung des α -Zerfalls als Tunneleffekt wusste man andererseits, dass die Prinzipien der Quantenmechanik auch für den Atomkern gelten. Eine Kerntheorie schien also unlösbar mit einer relativistischen Quantenmechanik für Elektronen verknüpft. Diese steckte damals noch in den Anfängen; erste Schritte waren aber mit der Dirac-Gleichung für die Elektronen und den Heisenberg-Pauli'schen Arbeiten über Quantenfeldtheorie getan. Heisenberg kannte die ganzen theoretischen Probleme und Schwierigkeiten sehr wohl. Er hatte eingehende Diskussionen mit Bohr. Eine Lösung schien indessen nicht in Sicht.

Im Jahr 1932 entdeckte Chadwick in seinen Experimenten das Neutron. Mit diesem neuen Teilchen sah Heisenberg die Möglichkeit, viele Probleme der Kernphysik in eleganter Weise zu formulieren und durch die *nicht*relativistische Quantenmechanik zu lösen. Mitte März 1932 erfuhr er von der Existenz des Neutrons, und in der unglaublich kurzen Zeit von weniger als drei Monaten verfasste er seine erste Arbeit „Über den Bau der Atomkerne“. Sie enthielt bereits die wichtigsten Grundgedanken für die heutige Theorie der Atomkerne, einschließlich des Isospinformalismus. Die beiden folgenden Arbeiten mit dem gleichen Titel bringen detaillierte Anwendungen. Es ist für uns heute ein Wunder, wie Heisenberg neben seinen relativ abstrakten Arbeiten über Quantenfeldtheorie (die wir im nächsten Punkt besprechen wollen) Zeit gefunden hat, mit der damals verworrenen Kernphysik auf dem Laufenden zu bleiben und dann das Datenmaterial schlagartig zu deuten.

Heisenberg betrachtete das Neutron als selbstständigen Fundamentalbestandteil der Kerne; es sollte den Spin $\frac{1}{2}$ haben und dem Pauli-Prinzip genügen. Alle Schwierigkeiten, die sich aus einer eventuellen Anwesenheit von Elektronen im Kern ergeben, schob Heisenberg beiseite: Das sollten diejenigen analysieren, die versuchen, die *Zusammensetzung eines Neutrons* aus einem Elektron und einem Proton zu erklären. Es ist bezeichnend für Heisenbergs Arbeitsweise, dass er alle jene ungelösten Probleme, welche für das Ziel eines Verständnisses der Atomkerne unwesentlich sind, zwar kennt und auch diskutiert, aber in intuitiv richtiger Weise beiseite schiebt, um sie *später* wieder aufzugreifen.

Heisenberg gab in der ersten Arbeit einen Energieausdruck (\equiv Hamilton-Funktion) für das aus Protonen und Neutronen bestehende Kernsystem an. Er sagt dazu:

„Um nun die Hamilton-Funktion des Atomkerns aufzuschreiben, erweisen sich folgende Variablen als zweckmäßig: Jedes Teilchen im Kern wird charakterisiert durch fünf Größen, die drei Ortskoordinaten x , y , z , den Spin σ in z -Richtung und eine fünfte Zahl ρ , die der beiden Werte $+1$ und -1 fähig ist. $\rho = +1$ soll bedeuten, das Teilchen sei ein Neutron, $\rho = -1$ soll bedeuten, das Teilchen sei ein Proton.“

Dies ist das erste Mal, dass die ρ -Koordinate, der heute so genannte Isospin, benutzt wird. Wie die Spinkomponente eines Teilchens mit Spin $\frac{1}{2}$, so hat auch die Ladung der möglichen Fundamentalbestandteile der Kerne nur zwei Werte: Entweder ist es ein positiv geladenes Proton oder ein neutrales Neutron. Das führte Heisenberg darauf, den Unterschied zwischen einem Proton und einem Neutron genauso zu beschreiben wie den Unterschied zwischen den