

WERNER HEISENBERG



# Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft

HIRZEL

Werner Heisenberg

**Wandlungen in den Grundlagen  
der Naturwissenschaft**



Werner Heisenberg

# **Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft**

Zehn Vorträge

12. Auflage

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



S. Hirzel Verlag Stuttgart

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

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

ISBN 3-7776-1366-5

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.

© 2005 S. Hirzel Verlag

Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart

Printed in Germany

Satz und Gestaltung: DTP + TEXT Eva Burri, Stuttgart

Einbandgestaltung: McBeath, Stuttgart

Druck: Gulde-Druck, Tübingen

Bindung: Riethmüller, Tübingen

## Vorwort zur 3. Auflage

Die vorliegende dritte Auflage fügt zum Inhalt der zweiten Auflage drei weitere Vorträge hinzu, die ebenso wie die früheren die Wandlungen im naturwissenschaftlichen Weltbild zum Gegenstand haben. Sie verdanken ihre Entstehung dem Wunsche verschiedener Kreise von Nichtphysikern, die den Weg der modernen Naturwissenschaft mit Interesse verfolgen, und sollen um dieses Interesses willen veröffentlicht werden. Die sechs Vorträge, die im Laufe der vergangenen zehn Jahre gehalten worden sind, erscheinen hier im Wesentlichen in der Reihenfolge ihrer Entstehung; nur steht wie früher der Vortrag vom Jahre 1934, der dieser kleinen Sammlung den Namen gegeben hat, an der Spitze.

Es bedarf vielleicht einer besonderen Begründung, dass hier sechs Vorträge gehalten wurden und veröffentlicht werden, die im Grunde stets die gleichen Gedanken in etwas abgewandelter Form wiederholen. Zur Rechtfertigung muss auf die besonderen Schwierigkeiten hingewiesen werden, die der Naturforscher vorfindet, wenn er die entscheidenden neuen Gedanken seiner Wissenschaft einem weiteren Kreis von Nichtfachleuten vortragen will. Die einzelnen Schritte der Forschung sind oft so kompliziert, ihre Begründung ist so schwierig, dass sie nur von der kleinen Gruppe der Fachleute verfolgt werden können. Die entscheidenden Wendungen aber gehen einen großen Kreis von Menschen an und müssen in diesem großen Kreis verstanden werden. Ein solches Verständnis kann, da die ins Einzelne gehende Begründung fehlen muss, nur dadurch zustande kommen, dass die neuen Gedanken in ihrer Beziehung zu den verschiedensten Fragen allgemeiner, insbesondere philosophischer Art immer von Neuem erörtert werden. Die vorliegenden Vorträge sollen im Leser eine Vorstellung erwecken von der merkwürdigen Situation, vor die sich der Naturforscher heute – entgegen seinem ursprünglichen Wunsch – beim Anblick seiner Wirklichkeit gestellt sieht. Der Verfasser ist überzeugt, dass diese Situation – als eines von vielen Anzeichen einer sich wandelnden Zeit – eine tiefgehende Veränderung in der Struktur der ganzen Wirklichkeit an-

kündigt; wobei mit dem Wort Wirklichkeit die Gesamtheit der Zusammenhänge bezeichnet wird, die sich zwischen dem formenden Bewusstsein und der Welt als seinem objektivierbaren Inhalt ausspannen.

Leipzig, 27. Januar 1942

W. Heisenberg

# Vorwort zur 9. Auflage

Die vorliegende 9. Auflage erweitert die Sammlung von Vorträgen, in denen die allgemeine Bedeutung der modernen Physik unter verschiedenen Gesichtspunkten erörtert wird, um zwei, die ursprünglich für einen engeren Kreis von Fachleuten bestimmt waren und daher vom Nichtphysiker vielleicht nur teilweise verstanden werden können. Es handelt sich dabei einerseits um einen 1933 in Stockholm gehaltenen Vortrag, der von der Entwicklung der Quantentheorie etwa zwischen 1923 und 1928 Rechenschaft gibt, andererseits um eine Rede zum 100. Geburtstag Max Plancks (23. April 1958), in der versucht wurde, die in den letzten zehn Jahren entwickelte Physik der Elementarteilchen im Rahmen der großen philosophischen Zusammenhänge der Atomlehre zu verstehen. Obwohl hier noch alles im Fluss ist und bis zur endgültigen Klärung der Zusammenhänge noch eine Reihe von Jahren vergehen wird, so mag doch die Richtung, in der sich die Atomphysik hier bewegt, auch für den Nichtfachmann von Interesse sein. Die beiden Vorträge gehören jedenfalls insofern in den Rahmen dieser Sammlung, als sie ebenso wie die früheren zeigen, wie eng die heutige Atomforschung mit sehr alten und allgemeinen Problemstellungen verknüpft ist. Es war von Anfang an das Ziel der vorliegenden Sammlung, Verständnis für diese allgemeinen Zusammenhänge zu wecken.

München, 25. September 1958

W. Heisenberg



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 3. Auflage	V
Vorwort zur 9. Auflage	VII
Werner Heisenberg und die moderne Physik von G. Rasche und B. L. van der Waerden	XI
Zur Geschichte der physikalischen Naturerklärung	1
Die Entwicklung der Quantenmechanik	16
Wandlungen in den Grundlagen der exakten Naturwissenschaft in jüngster Zeit	31
Prinzipielle Fragen der modernen Physik	48
Gedanken der antiken Naturphilosophie in der modernen Physik	62
Die Goethe'sche und die Newton'sche Farbenlehre im Lichte der modernen Physik	69
Die Einheit des naturwissenschaftlichen Weltbildes	89
Wissenschaft als Mittel zur Verständigung unter den Völkern	109
Die gegenwärtigen Grundprobleme der Atomphysik	122
Die Planck'sche Entdeckung und die philosophischen Grund- fragen der Atomlehre	137



# 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?“. Zeitlebens 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 aktivieren“. 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 20-jährige 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 charmanten 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

$$\int p dq = nh$$

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 er-

füllt: In seiner Theorie kommen nicht nur beobachtbare Größen vor. Worauf es ankommt, ist, dass Heisenberg intuitiv, mit genialen 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 Größen 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  $\Delta x$  (des Ortes) und  $\Delta p$  (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“.