Die Ideengeschichte der Quantenmechanik

Stephan Eule

24.10.2001

1 Einleitung

1.1 Motivation

Wenn man sich mit der Ideengeschichte der Quantenmechanik beschäftigt, muss man sich als erstes fragen, warum diese überhaupt beim Verständnis und der Interpretation derselben von Nutzen ist. Meiner Meinung nach kann man die gesamte Quantentheorie besser verstehen, wenn man die Geschichte der Ideen kennt, da diese zeigt woraus sich die Quantentheorie entwickelt hat und somit welche Aspekte den Wissenschaftlern besonders wichtig und auffällig waren und gegen welche Ideen sie sich gewehrt haben. Außerdem beeinflußt uns ihre Interpretation der Quantenmechanik noch bis heute.

1.2 Überblick

Man kann bei der Historie der Quantenmechanik verschiedene Etappen in der Entwicklung sehen:

1. "Geburtsstunde" der Quantenmechanik in der statistischen Physik 1900 - 1913
2. Welle-Teilchen-Dualismus beim Licht 1905 - 1923
3. Atomtheorie und Spektren, "klassische Quantenmechanik" 1913 - 1925
4. Welle-Teilchen-Dualismus bei Materie 1923 - 1926
5. Begrenzung der Beschreibbarkeit im klassischen Sinne und endgültige Fassung

Um 1900 waren sowohl die Spektren als auch die Schwarzraumstrahlung quantitativ so gut erfasst, dass sich aus ihnen die Quantenmechanik hätte entwickeln können. Dass sie sich letzendlich aus der Hohlraumstrahlung entwickelt hat, war Zufall.

2 Entstehungsgeschichte der Quantenmechanik

2.1 Quantenstatistik

Ende des 19. Jh. wurde intensiv das Strahlungsspektrum des sogenannten schwarzen Hohlraumstrahlers untersucht. Das ist das gut realisierbare Modell eines Strahlers, der die komplette auf ihn auftreffende Strahlung absorbiert. Da das Verhältnis von emittierter zu absorbierter Strahlung unabhängig vom Material des Körpers ist, konnte man die Strahlungquellen in den Wänden des Körpers mit winzigen Hertzschen Dipolen nähern.
Zur Beschreibung des Spektrums existierten zur Zeit Plancks zwei Strahlungsformeln:

1. Die Wiensche Strahlungsformel:
$$u_\nu = a\nu^3 e^{\frac{-\beta\nu}{T}}$$
wobei u_ν die Strahlungdichte bei der Frequenz ν ist.

2. Die Rayleigh-Jeanssche Strahlungsformel:
$$u_\nu = \frac{8\pi}{c^3}\nu^2 kT$$

Diese beiden Strahlungsformeln konnten aber nur einen Teil des Strahlungsspektrums richtig beschreiben, ansonsten führten sie zu nichtphysikalischen Unendlichkeiten. Die Raleygh-Jeansche Strahlungsformel führte zur sog. UV-Katastrophe, da sie für hohe Frequenzen nahezu unendliche Strahlungsdichten lieferte. Äquivalent ist es bei der Wienschen Formel mit dem IR-Bereich des Spektrums. Wenn man nun für diese beiden Formeln die Entropie berechnet und diese zweimal nach der Oszillatorenergie ableitet, bekommt man Unstimmigkeiten, und zwar in der Art, dass einmal im Nenner die Oszillatorenergie und einmal die Oszillatorenergie im Quadrat steht.
Planck hatte nun die Idee an dieser Stelle zu interpolieren und berechnete hieraus dann die folgende Strahlungsdichte:
$$u_\nu = \frac{A\nu^3}{e^{\frac{\beta\nu}{T}} - 1}$$
Diese Formel beschrieb das Strahlungsspektrum richtig, aber es fehlte komplett die theoretische Grundlage. Plancks Ideengang war nun der folgende: Die Wahrscheinlichkeit eines Makrozustandes ist proportional zur Zahl der Realisierungsmöglichkeiten dieses Makrozustandes. Um jetzt Kombinatorik anwenden zu können, muss man die Gesamtenergie auf eine endliche Anzahl von Teilenergien aufteilen. Das heißt, die Oszillatoren können nur ganzzahlige Vielfache eines Energieelements endlicher Größe aufnehmen.
$$\boxed{\epsilon = h \cdot \nu}$$
Hier taucht zum erstenmal das Plancksche Wirkungsquantum auf.
die Quantisierung wurde dann später auf weitere Systeme ausgeweitet, allerdings nur auf periodische. Für einen Freiheitsgrad galt für die Quantisierung der "Phasenebene":
$$\Delta\Phi = \Delta \oint p dx = h$$
Es gibt also "nur noch einen Zustand pro h".

2.2 Welle-Teilchen-Dualismus beim Licht, Photoeffekt

In einer seiner berühmten Abhandlungen von 1905 führte Einstein die Lichtquantenhypothese ein. Hierbei ist zu beachten, dass diese nicht schon implizit von Planck eingeführt wurde. Dieser hat lediglich gesagt, dass die Oszillatorenergie gequantelt ist und nicht das Licht selber.
Ein weiterer Hinweis auf die Quantennatur des Lichtes war der Franck-Hertz-Versuch, bei dem nur bestimmte Lichtenergien durch Elektronenstöße angeregt werden. Allerdings wurde die Lichtquantenhypothese erst allgemein akzeptiert, als 1923 der Comptoneffekt entdeckt wurde, bei dem erstmals Stoßgesetze auf Lichtteilchen angewendet wurden. Berühmt ist auch Einsteins Herleitung der Planckformel aus der Lichtteilchenhypothese.

2.3 Quantelung bei der Atomtheorie

Die Quantelung bei der Atomtheorie hatte ihren Anfang im Bohrschen Atommodell. Seine grundlegende Arbeit erchien 1913 in drei Teilen. Durch dieses Werk wurde ein neuer Abschnitt der Quantenmechanik eingeleitet. Dieser Abschnitt wird heute als "ältere Quantenmechanik" oder nach seinem Begründer "Bohrsche Quantenmechanik" bezeichnet und endete mit der Krise derselben. In diesem Zeitraum wurden auch viele andere periodische, mehrfach periodische und quasiperiodische Systeme berechnet.
Einen entscheidenden Beitrag leistete in dieser Zeit auch Arnold Sommerfeld. Er erweiterte das Atommodell von Bohr in dem er auch Ellipsenbahnen um den Kern als gültig erklärte. Er führte somit die Quantenzahlen n,m,l ein und konnte somit die Feinstruktur beim Helium, den Stark-Effekt (die Aufspaltung von Spektrallinien im äußeren elektrischen Feld) und den normalen Zeeman-Effekt erklären.
Allerdings war bezeichnend, dass nicht mehr als mehrfach periodische Systeme erklärt werden konnten. Für andere einfache Probleme wurde eine Störungsrechnung entwickelt, die der heutigen ähnelte.
Höhepunkt der "älteren Quantenmechanik" war eine 1921 von Bohr in Göttingen gehaltene Vortragsreihe, die eine Woche lang jeden Abend stattfand. Bei ihr waren Sommerfeld, Pauli, Heisenberg und Lande anwesend, und man nennt sie heute die "Bohr-Festspiele".
Allerdings waren 1922 dann die Probleme unübersehbar:

- Die Werte 2,8,18,32 im Periodensystem konnten nicht erklärt werden.
- Das H_2^+ konnte nur fehlerhaft berechnet werden.
- Das Auftreten der kombinierenden Termsysteme beim He war nicht erklärbar.
- zuletzt konnte der anomale Zeeman-Effekt überhaupt nicht erklärt werden

Diese Probleme führten zur sogenannten Krise der "älteren Quantenmechanik".
Die Probleme waren ineinander verwoben:

- Die formalen Grundlagen der Quantenmechanik fehlten
- Der Spin war noch nicht entdeckt
- Das Pauli-Prinzip war noch nicht formuliert

Diese Probleme hemmten sich gegenseitig. Wichtige Fortschritte wurden dann bei der Entwirrung des Problems des annomalen Zeeman-Effektes durch Pauli gemacht.
Wenn nun der Kern am Zeeman-Effekt beteiligt wäre, müßte sich die relativistische Massenveränderung bemerkbar machen. Dieser Effekt wurde aber nicht beobachtet. Daraus konnte Pauli den Schluß ziehen, dass nur das Leuchtelektron am Zeeman-Effekt beteiligt ist.
Außerdem stellte er fest, dass wenn n, m und l gleich sind, es zwei Zustände mit verschiedenem Impuls gibt. Somit konnte er durch Formulierung seines Ausschlussprinzips das Periodensystem der Elemente erklären.
Pauli hatte den neuen Freiheitsgrad aber nicht als Eigendrehimpuls gedeutet. Dies geschah 1925 durch die Holländer Uhlenbeck und Goudsmid. Die komplette Theorie lieferte dann Thomas 1926 nach.

2.4 Die Matrizenform der Quantenmechanik

Aufgrund der Probleme mußte eine neue Quantenmechanik entwickelt werden, die die Grundlagen enthielt. Heisenberg wollte in seine Quantenmechanik nur Größen einbeziehen, die auch tatsächlich gemessen werden konnten. Also sollten keine Elektronenradien oder Umlaufgeschwindigkeiten benutzt werden, sondern nur messbare Größen wie Spektralfrequenzen und Übergangsintensitäten, also nur die Elektronenübergänge enthalten. Als er in Kopenhagen bei Bohr war, hatte er aus der Dispersionstheorie von Kramers gelernt, die Elektronen als virtuelle Oszillatoren und ihre Fourierdarstellung zu beschreiben. Diese Fourierkoeffizienten zwischen den einzelnen Übergängen konnte man nun in einer Matrix anordnen:

$$\begin{pmatrix} \nu_{11} & \nu_{12} & \cdots & \nu_{1n} \\ \nu_{21} & \nu_{22} & \cdots & \nu_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \nu_{n1} & \nu_{n2} & \cdots & \nu_{nn} \end{pmatrix}$$

Durch einen Vergleich mit der klassischen Mechanik schloss er, dass die Fourierentwicklungskoefizienten die Rolle der Ortskoordinaten einnehmen.

$$\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & q_{nn} \end{pmatrix}$$

Ebenso kann man eine Matrix mit den kanonisch konjugierten Impulsen einführen. Heisenberg stellte ebenfalls fest, dass für diese Matrizen sogar die Hamiltonschen Bewegungsgleichungen gültig sind. Eine weitere Folgerung dieser Mechanik war die Vertauschungsrelation:

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} \cdot \mathbf{1}$$

Mit seiner Mechanik konnte er erfolgreich den Oszillator und den Rotator berechnen. Ein halbes Jahr später berechnete Pauli das Wasserstoffatom, was als eine Art Bewährungsprobe für alle Ansätze galt. Allerdings war diese Mechanik sehr schwer zu handhaben, was man daran sehen kann, dass selbst Pauli ein halbes Jahr brauchte um das einfache H-Atom zu berechnen.
Heisenberg lieferte somit das erste gültige Verfahren um klassische Ausdrücke in die Quantenmechanik zu überstetzen. Ausgearbeitet wurde dieser Ansatz dann von Born, Jordan und Heisenberg selbst (Drei-Männerarbeit) . Diese erkannten dann auch Heisenbergs Größen als Matrizen, die Heisenberg unbekannt waren.
Nachdem er Heisenbergs Ansatz gelesen hatte, schuf P.A.M. Dirac ebenfalls eine gültige Quantenmechanik mit “ p- und q-Zahlen ”, die etwa zeitgleich mit der “Drei-Männerarbeit” erschien.

2.5 Welle-Teilchen-Dualismus bei Materie

1923 hatte De Broglie die Idee, analog zum Welle-Teilchen-Dualismus beim Licht, Materie Welleneigenschaften zuzuordnen. Für die Wellenlänge sollte gelten:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Die Wellennatur der Elektronen wurden 1927 dann nachgewiesen. De Broglies Interpretation war, die Mechanik als Grenzfall der Wellenmechanik zu sehen, so wie die Strahlenoptik ein Grenzfall der Wellenoptik ist.
Angeregt von dieser Idee und von der schon durch Hamilton erkannten Analogie der Mechanik eines Massepunktes in einem Kraftfeld mit der geometrischen Optik in inhomogenen Medien entwickelte Schrödinger seine berühmte Wellenmechanik, die auch die Schrödingergleichung beinhaltete. Ein halbes Jahr später bewies er die Analogie zur Matrizenmechanik.

2.6 Vollendung der Quantenmechanik und die Begrenzung der Beschreibbarkeit

1926 existierten dann vier Formen der Quantenmechanik.

1. Heisenbergsche Matrizenmechanik
2. Diracs p- und q-Zahlen-Mechanik
3. Schrödingers Wellenmechanik
4. Anfänge einer Operatormechanik von Born und Wien

Ebenfalls 1926 deutete Born $|\Psi|^2$ als Aufenthaltswahrscheinlichkeit. In dieser Zeit wurde nach einer allgemeinen Fassung gesucht, die die vier Fälle als Spezialfälle enthielt. Eine solche Transformationstheorie wurde dann von London, Dirac und Jordan entwickelt, welche dann in schwieriger mathematischer Arbeit von Hilbert und von von Neumann korrekt formuliert wurde.
Aus dieser Theorie leitete Heisenberg dann die Unbestimmtheitsrelation ab. Auf dem Solvay-Kongress 1927 in Como stellten dann Schrödinger, Heisenberg, Born und de Broglie ihre veschiedenen Auffassungen der Quantenmechanik vor. Born und Heisenberg erklärten dann die Quantenmechanik für abgeschlossen.

3 Beteiligte Forscher und ihre Meinungen zur Interpretation der Quantenmechanik

Die Meinungen zur Interpretation der Quantenmechanik der beteiligten Forscher kann man sich am besten klar machen, in dem sich überlegt was sie wohl auf die folgenden drei Fragen geantwortet hätten:

1. **Realität**
   Existieren die Objekte der Atomphysik wirklich, unabhängig vom Betrachter?
2. **Verständlichkeit**
   Wenn ja, kann man die Struktur und die Entwicklung der Objekte und Vorgänge durch Formung gedanklicher Bilder verstehen, die der Realität entsprechen?
3. **Kausalität**
   Soll man die Gesetze so formulieren, dass jeder beobachtete Effekt zumindest auf eine Ursache zurückgeführt werden kann?

Man kann die beteiligten Forscher grob in drei Generationen einteilen:

3.1 Die Physiker der "älteren" Generation

3.1.1 Max Planck

Max Planck wurde 1858 geboren und studierte Experimentalphysik und Mathematik unter Helmholtz und Kirchhoff in Berlin. Besonders beeinflußt wurde er durch ein Werk von Clausius über die Thermodynamik. Er glaubte an eine objektive physikalische Welt und lehnte alle Versuche ab, die Kausalität abzuschaffen. Er hätte also alle drei Fragen mit ja beantwortet.

3.1.2 Arnold Sommerfeld

Arnold Sommerfeld wurde 1868 geboren und studierte in Königsberg Mathematik und theoretische Physik unter Hilbert, Hurewitz und Klein. Ab 1897 war er Professor für Mathematik in Clausthal bevor ab 1906 den Lehrtstuhl für theoretische Physik in München innehatte. Er dachte sehr mathematisch und hatte selbst keine philosophischen Gedanken zur Deutung der Quantenmechanik, allerdings hatte er großen Einfluß auf seine Schüler Pauli, Heisenberg, Debye und Lande, die später alle bis auf Lande die Kopenhagener Deutung vertraten.
Born sagte einmal über Sommerfeld, dass es einfacher wäre, eine Liste von berühmten Physikern zu erstellen, die nicht bei ihm studiert haben, als eine Liste derer, die bei ihm studiert haben .

3.2 Die Physiker der “mittleren” Generation

3.2.1 Albert Einstein

Albert Einstein wurde 1879 in Ulm geboren arbeitete bis 1909 in dem Patentamt in Bern. 1912 übernahm er den Lehrstuhl für Physik in Prag, dann in Zürich und 1913 dann in Berlin. Seiner Meinung nach war die Quantenmechanik nur temporär und ein Übergangsstadium zu einer vollständigen Theorie. Er akzeptierte allerdings die Akausalität, war aber ein Gegener der Komplementarität.

3.2.2 Max Born

Max Born wurde 1882 geboren und studierte Mathematik in Göttingen bei Hilbert, Klein und Minkowski. 1909 promovierte er bei Hilbert und wurde ab 1921 Professor für Theoretische Physik in Göttingen. Auch er hatte sehr viele berühmte Schüler, wie zum Beispiel Jordan, aber auch Pauli und Heisenberg verbrachten einige Jahre bei ihm. Zusammen mit Heisenberg war er einer der wenigen, der auch philosophische Arbeiten verfasste. Als einer ihrer Begründer war er natürlich ein Anhänger der Kopenhagener Deutung und der Komplementarität.

3.2.3 Erwin Schrödinger

Erwin Schrödinger wurde 1887 geboren und studierte unter dem Einfluß Boltzmanns Physik in Zürich. 1921 übernahm er den Lehrstuhl für Physik in Zürich, wo er auch seine wichtigsten Arbeiten verfasste, bevor später noch nach Berlin und nach Oxford ging. Er glaubte an die Realität und war eher ein Befürworter der Kausalität. Zwischen 1926 und 1937 akzeptierte er die Quantenmechanik, wurde aber danach wieder ein Gegner von ihr.

3.2.4 Niels Bohr

Niels Bohr wurde 1885 geboren und studierte Physik in Kopenhagen, wo er auch 1911 promovierte und 1916 dann den neuen Lehrstuhl für theoretische Physik übernahm. Er hatte einen ungeheuren Einfluss auf die Entstehung der Quantenmechanik und war wohl die zentrale Figur bei ihrer Entstehung. Schon in seiner Jugend durch den Philosophen Kierkegaard beeinflußt, formulierte er das berühmte Komplementaritätsprinzip. Als einer ihrer Begründer war er Anhänger der Kopenhagener Deutung.

3.3 Die Physiker der “jüngeren” Generation

3.3.1 Wolfgang Pauli

Wolfgang Pauli wurde 1900 geboren und studierte in München bei Sommerfeld Physik, wo er dann auch Heisenberg kennenlernte, die Zeit ihres Lebens Freunde blieben. Von 21-22 war er dann bei Born, von 22-23 bei Bohr in Kopenhagen und wurde 1923 dann Privatdozent in Hamburg. Danach wurde er Professor für Physik in Zürich. Pauli lehnte Kausalität und Verständlichkeit ab, hielt die Realität aber für begrenzt gültig.

3.3.2 Werner Heisenberg

Werner Heisenberg wurde 1901 geboren und studierte ebenfalls bei Sommerfeld, bevor er dann 1922-23 Assistent von Born wurde. 1923-24 war er dann bei Bohr und Kramers, danach wurde er Privatdozent in Göttingen. Heisenberg lehnte alles ab: Kausalität, Verständlichkeit und auch die Realität.

3.3.3 Paul Adrien Maurice Dirac

P.A.M. Dirac wurde 1902 geboren und studierte dann in Bristol Elektrotechnik. 1926-27 war er in Göttingen und wurde dann 1932 Professor in Cambridge. Er hatte wenig Interesse an philosophischen Fragen, ihn interessierte nur die Mathematik. Allerdings lehnte er die Kausalität ab.

3.4 Zusammenfassung

Allgemein kann man sagen, dass die "älteren" Physiker Planck, Einstein und Schrödinger die Verständlichkeit eher annahmen, während sich die jüngeren Physiker hier etwas radikaler zeigten. Auf die erste Frage wäre allerdings nur Heisenberg so weit gegangen, diese zu verneinen. Die anderen Physiker äußerten sich hier etwas differenzierter.

A Literatur

Zusätzlich zu der empfohlenen Literatur habe ich außerdem noch diese Bücher verwendet:

1. Karoly Symoni, "Kulturgeschichte der Physik", Verlag Harry Deutsch 1995
2. Carl Friedrich von Weizsäcker, "Große Physiker" Hanser 1999
3. "Die großen Physiker", Hrsg. Karl von Meyenn, C.H.Beck 1997