

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

Seminar Interpretation der QM,
Goethe-Universität Frankfurt am Main

Daniel Guterding

26. Mai 2011

Die Väter der Kopenhagener Interpretation



■ Niels Bohr
(*1885 † 1962)



■ Werner Heisenberg
(*1901 † 1976)

Entstehungsgeschichte

- Kopenhagener Deutung der QM entsteht um 1927
- benannt nach Bohrs Wirkungsstätte Kopenhagen
- maßgebliche Beiträge von Bohr und Heisenberg
- Bohr schreibt keine umfassende Darstellung, sondern entwickelt seine Interpretation im Dialog mit anderen Wissenschaftlern
- Heisenberg schreibt später umfassendes Werk über die Kopenhagener Interpretation
- im Rahmen dieser Interpretation existierten unterschiedliche Detailinterpretationen, die sich zum Teil widersprechen

Historisches

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Motivation

- Formalismus der QM ist nicht intuitiv verständlich
- Max Born interpretiert Wellenfunktion als Wahrscheinlichkeitsdichte
- Zufall besitzt nun Bedeutung in der Wissenschaft

Kernfragen

- Benötigt man neue Begriffe zur Beschreibung der QM ?
- Ist die Wellenfunktion Ψ ein reales Objekt ?
- Was ist eine Messung ?
- Was geschieht zwischen Messungen ?
- Wo liegt die Grenze zwischen klassischer Physik und QM ?

Heisenbergs Kerngedanken

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Begriffe der Quantenmechanik

- Mensch versteht nur Begriffe der klassischen Physik wie Ort und Impuls
- diese sind in der QM nur im Rahmen der Unbestimmtheitsrelation verwendbar: $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
- neue Begriffe sind sinnlos weil unverständlich
- Lösung: benutze klassische Begriffe, aber beachte begrenzte Anwendbarkeit
- Messergebnisse werden immer klassisch ausgedrückt

Heisenbergs Kerngedanken

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Eigenschaften der Wahrscheinlichkeitswellenfunktion Ψ

- stellt nicht den Ablauf von Ereignissen in der Zeit dar
- ermöglicht Aussagen über die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses in der Zukunft
- beschreibt nicht einen bestimmten Vorgang sondern die Menge aller möglichen Vorgänge
- benötigt Messung zur Festlegung eines Anfangszustandes
- enthält dann auch Ungenauigkeit der Kenntnis über diesen Anfangszustand

Heisenbergs Kerngedanken

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Der Messprozess in der Quantenmechanik

- H. geht davon aus, dass jede Messung das Messobjekt so beeinflusst, dass sich eine neue Wellenfunktion ergibt
- Beispiel: Messung von einzelnen Elektronenbahnen im Atom mit Photonen unmöglich, da deren Impuls die Flugbahn der Elektronen ändert. Messbar ist also immer nur ein diskreter Zustand.
- Zustand zwischen zwei Messungen ist nicht bestimmt.
- Beispiel: Die Überlagerung des Beugungsmusters zweier Einzelspalte ergibt nicht das Beugungsmuster eines Doppelspalts. Die Frage nach dem Weg des gebeugten Teilchens ist also sinnlos.

Heisenbergs Kerngedanken

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Messprozess und Beobachter

- das Geschehen kann nur durch eine Messung beobachtet werden, es schließt nicht die Zeit zwischen Messungen ein
- zum Zeitpunkt der Messung wechselwirkt das gemessene Objekt mit der übrigen Welt, also insbesondere mit dem Beobachter
- da der Messapparat den Gesetzen der statistischen Thermodynamik unterliegt, überträgt sich dessen Unbestimmtheit auf die neue Wellenfunktion
- die Beobachtung ändert die Wellenfunktion unstetig, sie *kollabiert*

Heisenbergs Kerngedanken

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Messprozess und Beobachter

- mit der un stetigen Änderung unserer Kenntnis über den Zustand des Systems ändert sich auch seine mathematische Darstellung un stetig
- man spricht von einem *Quantensprung*
- H.: "Während des Beobachtungsaktes geht das Mögliche zum Faktischen über."
- dieser Übergang ist nach H. nicht verknüpft mit der Registrierung des Ergebnisses durch einen Beobachter, die Änderung der Wellenfunktion aber wohl, denn sie bildet die un stetige Änderung der Kenntnis des Systems ab
- das Bewusstsein des Beobachters spielt keine Rolle für die Physik

Heisenbergs Kerngedanken

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Komplementarität

- Wellen- und Teilchenbild der Materie ergänzen sich und schließen sich gleichzeitig aus
- für jedes Experiment ist eine von beiden Vorstellungen zweckmäßig
- Beispiel: Photoeffekt - Teilchen, Doppelspalt - Welle
- Ort ist komplementär zum Impuls eines Teilchens, aber die Kenntnis des einen schließt die Kenntnis des anderen aus

Grenze zwischen klassischer Physik und QM

- falls \hbar in einem System eine kleine Größe darstellt, so geht die QM in die klassische Physik über

Notwendige formale Eigenschaften der QM beim Messprozess

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Eigenschaften des quantenmechanischen Formalismus

Nun ist zu klären, wie sich ein Messprozess auf den quantenmechanischen Formalismus abbilden lässt. Die folgenden Behauptungen geben dem Braket-Formalismus Regeln vor, die die Wahrscheinlichkeitsverteilung experimentell gewonnener Daten reproduzieren.

Sie sind experimentell sehr gut bestätigt, bilden aber dennoch eines der größten Probleme der QM, da insbesondere die Nichtlinearität von Behauptung 2 unverstanden ist.

Notwendige formale Eigenschaften der QM beim Messprozess

Die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs Kerngedanken

formaler Messprozess

Kopenhagener Deutung

Erläuterungen und Kritik

Gedankenexperimente

Fazit

Quellen

Behauptung 1

Bei gegebener Wellenfunktion Ψ ist die Wahrscheinlichkeit für die Messgröße A mit zugehörigem Operator \hat{E} einen Wert im Intervall J zu finden gegeben durch $p(J) = \langle \Psi | \hat{E}(J) | \Psi \rangle$.

Behauptung 2

Führt man anschließend an eine Messung der Observablen A, die eine neue Wellenfunktion Φ erzeugt hat, eine Messung der Größe B mit Operator F im Intervall K durch, so gilt $p(K) = \langle \Phi | \hat{F}(K) | \Phi \rangle$. Die kurz vor der Messung existente Wellenfunktion ist dabei $|\Phi\rangle = C \hat{E}(J) |\Psi\rangle$ mit Normierungskonstante C. Dies ist der sogenannte Kollaps der Wellenfunktion.

Die Kopenhagener Deutung

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Kernthesen

- 1 Die QM behandelt einzelne Objekte.
- 2 Der Zufall ist eine grundlegende Eigenschaft der Naturgesetze.
- 3 Das Ziehen der Grenze zwischen dem beobachteten Objekt und dem Messapparat ist dem Beobachter überlassen.
- 4 Der Messapparat wird mit Begriffen der klassischen Physik beschrieben.
- 5 Jede Messung ist irreversibel und hinterlässt eine Aufzeichnung.
- 6 Wenn das Mögliche zum Faktischen übergeht, geschieht ein Quantensprung.

Die Kopenhagener Deutung

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Kernthesen

- 7 Komplementäre Eigenschaften können nicht gleichzeitig beobachtet werden.
- 8 Nur die Ergebnisse von Messungen können als wahr angesehen werden.
- 9 Reine Quantenzustände sind objektiv, aber nicht real.

Weiteres Vorgehen

Da viele der Thesen nicht intuitiv verständlich sind und zum Teil auch problematisch erscheinen, wird im Folgenden auf jede These eingegangen. Dabei wird Kritik direkt mitberücksichtigt.

Erläuterungen und Kritik

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

These 1: Einzelne Objekte

- statistischer Charakter der QM könnte darauf hindeuten, dass Wahrscheinlichkeitsverteilung wie in Thermodynamik mit Teilchenensemble korrespondiert
- Langzeitmessungen an einzelnen Atomen bestätigen Kopenhagen

These 2: Zufall als Teil der Naturgesetze

- Wahrscheinlichkeiten spiegeln nicht Unvollständigkeit der Theorie oder Unkenntnis des Beobachters wider
- Theorie ist vollständig, wenn sie für alle denkbaren Messungen Wahrscheinlichkeiten vorhersagen kann

These 3: Grenze zwischen Objekt und Beobachter

- Beispiel: Ein Photon trifft auf die Netzhaut. Die Absorption des Photons über ein Molekül ist ein quantenmechanischer Prozess. Die Leitung des elektrischen Stromes durch die Nervenzellen kann mittels EM beschrieben werden.
- Wo liegt die Grenze ?
- Entscheidungskriterium fehlt, Verschiebung der Grenze erzeugt lediglich unterschiedliche Fehler
- Bohr entscheidet sich für radikale Lösung: Es gibt keine Grenze. Alle Messergebnisse nur makroskopisch beobachtbar. Keine Rückschlüsse auf konkreten Quantenzustand möglich.

These 4: Messungen werden klassisch beschrieben

- Einstellung eines Messgerätes kann nur mit der Sprache beschrieben werden, nicht durch mathematischen Formalismus.
- Messdaten sind Fakten. Sie können also nur klassisch ausgedrückt werden.
- Philosophischer Aspekt: Sprache entwickelt sich in der klassischen Welt. Mensch besitzt nicht die Fähigkeit, etwas auszudrücken, das jenseits der Sprache liegt.

These 5: Unumkehrbarkeit der Messung

- Damit Messergebnis weiterverwendet werden kann, muss es aufgezeichnet werden. Z.B. auf Papier, in Computer oder in Gehirn. Dies ist unumkehrbar.

These 6: Quantensprünge

- Bohr glaubte an neues physikalisches Gesetz
- Wahrscheinlichkeit folgt aus Theorie, Mechanismus lässt sich vermutlich nicht durch QM erklären

These 7: Komplementarität

- offensichtlich: Unbestimmtheitsrelation
- Bohr: zur Erklärung aller Experimente sind einander widersprechende Konzepte notwendig, Entscheidung vollständig durch Experiment bestimmt

Erläuterungen und Kritik

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

These 8: Wahrheitsbegriff

- Was nicht gemessen wurde, kann nicht als wahr angesehen werden.
- keine Aussage über Zeit zwischen Messungen möglich
- Lege Buch in Raum und verschließe diesen. Sehe dann nach, ob Buch immer noch da ist. Frage: War Buch auch in der Zwischenzeit im Raum ?
- Heisenberg: Frage ist bedeutungslos.
- Beispiel: Teilchenzerfall wird gemessen. Nach H. existierte das Mutterteilchen nur genau zu dem Zeitpunkt, an dem es zerfallen ist.

Erläuterungen und Kritik

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

These 9: Wellenfunktion ist objektiv, aber nicht real

- Wellenfunktion existiert nur im Gehirn des Physikers, da sie nur Abbild seiner Kenntnis der Realität ist.
- letztlich philosophische Frage

Fundamentalkritik

- Klassische Physik manchmal besser geeignet zur Beschreibung der Welt.
- Schrödingergleichung beschreibt QM richtig, versagt aber bei Messung. Konsistenz von Theorie und Annahmen über Messung fraglich.

Fundamentalkritik

- In Verbindung mit Supraleitung kann Energiequantisierung makroskopisch auftreten. Heisenberg könnte hier keine Grenze definieren und Bohr wüsste nicht, was dabei das klassische Phänomen sein sollte.

Zentrale Gedankenexperimente

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Schrödingers Katze

- Heisenberg: Beim Öffnen der Box ist Katze entweder tot oder lebendig. Zwischenzustand mit Wellenfunktion beschreibbar, aber nicht real.
- Bohr: Katze ist makroskopisch, also klassisch. Damit zu jeder Zeit entweder tot oder lebendig.

Zentrale Gedankenexperimente

Die
Kopenhagener
Deutung der
Quantenme-
chanik

D. Guterding

Historisches

Heisenbergs
Kerngedanken

formaler
Messprozess

Kopenhagener
Deutung

Erläuterungen
und Kritik

Gedanken-
experimente

Fazit

Quellen

Wigners Freund

- Erweiterung von Schrödingers Katze um einen zweiten Beobachter, der Kenntnis über Zustand der Katze nur durch Mitteilung des ersten Beobachters erlangen kann.
- Problem: Erster Beobachter sieht lebendige oder tote Katze, für ihn kollabiert damit die Wellenfunktion. Für den zweiten Beobachter geschieht Kollaps erst nach Mitteilung durch den ersten. Wann ist Wellenfunktion kollabiert ?
- gilt inzwischen als überholt, Dekohärenz

- Kopenhagener Deutung liefert in der Praxis gute Dienste.
- Im Detail jedoch problematisch.
- Lässt weiterhin viel Raum für Interpretation.

- Heisenberg: Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie, S. 27-42.
- Omnès: The Problems of Measurement Theory, S. 81-102.
- http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kopenhagener_Deutung&oldid=87793568
- http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wigners_Freund&oldid=86871851
- http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Werner_Heisenberg&oldid=89217122
- http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Niels_Bohr&oldid=88976570