

# Die Kopenhagener Deutung

Seminar über die Grundlagen der Quantenmechanik

Alexander Ferling

21. November 2001

## I. Das Quantenpostulat

- 1.1 Formulierung des Quantenpostulats
- 1.2 Die Verletzung der Kausalität

## II. Die Beobachterrelativität

- 2.1 Der Messprozess im klassischen und quantenmechanischen Sinne
- 2.2 Heisenbergscher Schnitt

## III. Das Korrespondenzprinzip

- 3.1 Die Korrespondenz von Quanten- und Klassischer Mechanik
- 3.2 Heisenbergs Definition der abgeschlossenen Theorie

## IV. Komplementarität

- 4.1 Der Komplementaritätsbegriff nach Heisenberg und nach Mackay
- 4.2 Ein Beispiel für ein klassisches System

## V. Der Indeterminismus der Quantenmechanik

## VI. Kritiker der Kopenhagener Deutung

- 6.1 Das EPR-Paradoxon und ein möglicher Ausweg
- 6.2 Schrödingers Anschauung der Quantenmechanik
- 6.3 Zitate von Mittelstaedt und Mach zur quantenmechanischen Anschauung

Die Diskussion, die Niels Bohr und Werner Heisenberg in den Jahren 1926 und 1927 in Kopenhagen führten, legte die **Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik** fest. Die Ergebnisse dieser Diskussion präsentierte Bohr 1927 auf einem Kongress in Como. Die beiden Grundpfeiler dieser Deutung sind das Quantenpostulat und die Komplementarität.

## I. Das Quantenpostulat – die Formulierung von Bohr

- 1) Elektronen vollführen klassische Bewegungen nur in gewissen stationären Zuständen, die diskreten Energiestufen entsprechen. Dabei findet keine Energieabstrahlung statt.
- 2) Übergänge zwischen stationären Zuständen sind mit der Abgabe bzw. Aufnahme elektromagnetischer Strahlung einer bestimmten Frequenz und Energie verbunden.

Während Bohrs ad hoc Postulat aus dem Jahre 1913 noch auf interatomaren Zuständen fußte, sollte es ab 1927 in allgemeingültigem Sinne zu verstehen sein.

Die Folgen dieses Postulats sprengten den Rahmen des klassischen Messprozesses, bedeutete es doch, dass jegliche Interaktion mit einem Quantenobjekt den Austausch eines Energiepaketes zur Folge hat.

$$E_n = nh\nu$$

...ist das Netz, in dem wir unsere Fische fangen.

Jede Beobachtung zieht eine nicht zu vernachlässigende Wechselwirkung mit dem Messungsmittel nach sich, sodass also weder dem Phänomen noch dem Beobachtungsmittel eine selbstständige physikalische Realität im gewöhnlichen Sinne zugeschrieben werden kann.

Die Folge einer Kontrollmessung der Wechselwirkung des Quantenobjektes mit dem Messapparat zieht einen infiniten Beobachtungsregress nach sich, da auch der Messapparat ein Quantenobjekt ist.

Durch die für Quantenprozesse typische Wechselwirkung zwischen Beobachtungsmittel und beobachtetem Objekt wird es also unmöglich, Raum-Zeit-Koordinaten und die dynamischen Eigenschaften eines Quantenobjektes zu bestimmen. Die Wechselwirkungen sind schließlich weder vernachlässigbar noch kontrollierbar.

→ Das Quantenpostulat zieht also einen Verzicht auf die Kausalität nach sich!

## II. Die Beobachterrelativität

In der klassischen Physik kann Messgerät bzw. der Messprozess und das Messobjekt klar getrennt werden. Die Wechselwirkung des Messgerätes mit dem Messobjekt kann vernachlässigt werden (vgl. Voltmeter).

Man kann einem Objekt in der Klassik also auch unabhängig von einer Messung definite Werte von Observablen zuordnen, ihnen also messungsunabhängig Eigenschaften zuschreiben.

→ Das klassische Objekt besitzt ein eigenständiges Verhalten!

In der Quantenphysik sind Messapparatur und gemessenes Objekt gleichsam zu einer Einheit verschmolzen, so dass nicht länger scharf unterschieden werden kann zwischen dem selbstständigen Verhalten eines physikalischen Objektes und seiner Wechselwirkung mit anderen, als Messinstrument dienenden Körpern, die mit der Beobachtung unvermeidlich verknüpft sind und deren direkte Berücksichtigung nach dem Wesen des Beobachtungsbegriffs selber ausgeschlossen ist

→ Messung und Quantenobjekt sind untrennbar miteinander verbunden.

Zwangsläufig wird man nun auf die Frage stoßen, wo denn die Grenze zwischen Beobachter und Gegenstand liegt. Schließlich geht die in den 30ern entstandene subjektivistische Interpretation, angeführt von F.London und E.Bauer, davon aus, dass menschliche Bewusstsein in die Quantenmechanische Betrachtung mit einzubeziehen.

Dies wurde jedoch von den Befürwortern der K.D. abgelehnt, schließlich lässt sich das Messergebnis im Nachhinein nicht mehr beeinflussen.

→ Die Quantentheorie besitzt objektiven Charakter.

Das Verhalten der physischen Welt ist in den klassischen Theorien also „beobachtungsfern“ konzipiert. Der Beobachter schafft lediglich die Datengrundlage zur gesetzmäßig quantitativen Beschreibung.

In der Quantenmechanik interagiert die Messung jedoch mit dem Objekt. Die *Objektivität* kann folglich nicht mehr durch die Ontologie der Physik alleine, sondern muss durch intersubjektive Gültigkeit der Messresultate „beobachtungsnah“ gewährleistet sein. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von *Relativität der Beobachtungsmittel*.

Zusammenfassend kann man sagen

→ jede physikalische Aussage enthält Infos über die Messumstände

→ Die Messumstände sind intersubjektiv

→ Ein Quantenobjekt kann nur mit Verweis auf die Messumstände erklärt werden.

## Die theoretische Konstruktion des Heisenberg-Schnittes

Der Heisenberg-Schnitt soll verdeutlichen, wie man eine quantenphysikalische Messung in eine Messapparatur und ein gemessenes Objekt aufteilen kann, so dass dem Quantenobjekt Eigenschaften zugesprochen werden können.

Nach Heisenberg soll ein Schnitt zwischen dem zu beobachtenden System und den Messapparaten gemacht werden und ist in gewissen Grenzen frei wählbar. Bohr führte weiter aus, dass die Gegenstände, die zum beobachteten System gehören willkürlich gewählt sind.

Während auf der einen Seite des Schnittes das Quantenobjekt quantenmechanisch beschrieben wird, wird das Messgerät klassisch betrachtet, was einen Rahmen der Grenzen festlegt. Schließlich sind Quantenphänomene im Bereich des Planckschen Wirkungsquantum nicht vernachlässigbar.

### III. Das Korrespondenzprinzip

Ähnlich wie die Relativitätstheorie für  $c \rightarrow \infty$  formal in die Newtonsche Mechanik übergeht, kann man die Quantenmechanik für  $\hbar \rightarrow 0$  in die Newtonsche Theorie überführen.

Allerdings handelt es sich bei dieser Korrespondenz nur um eine Konvergenz numerisch-faktischer Natur.

Fast man die Korrespondenzkonzeption als Reduktionsrelation auf (was ja hier offensichtlich der Fall ist), so gilt für die korrespondierenden Theoriegebäude, dass mindestens einige Gesetzmäßigkeiten durch Reduktion zur korrespondierenden Theorie transferiert werden können.

Dies ist bei KM und QM jedoch nicht der Fall. Zum einen ergibt sich nur eine asymptotische Näherung, zum anderen gilt die vermeintliche Reduktion nur für einen eingeschränkten Bereich.

Nach Meyer-Abich, der den Begriff deskriptive Theorie formte, handelt es sich bei der Quantenmechanik um eine Theorie, die nur approximativ mit der Klassischen Mechanik vergleichbar ist.

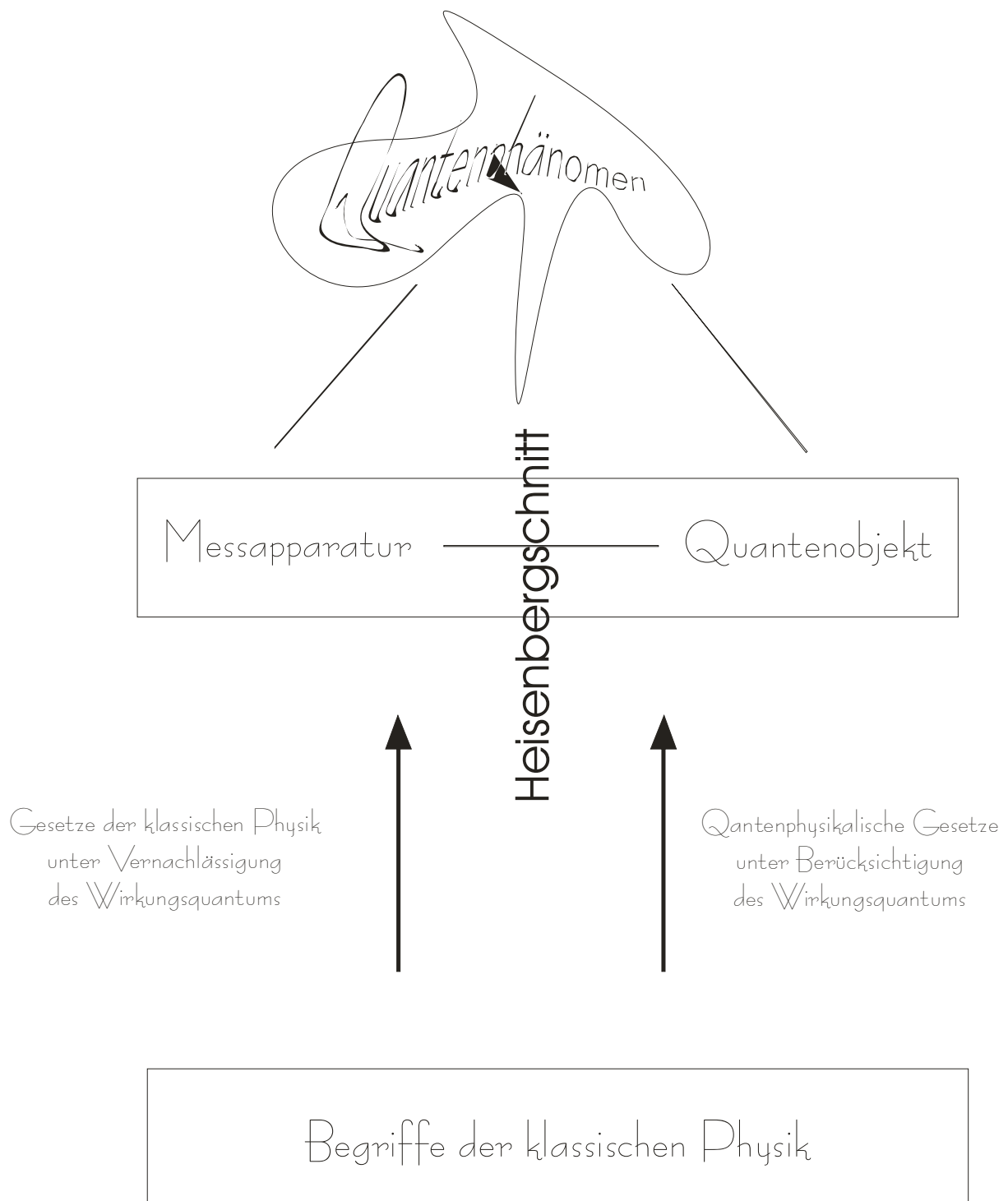
Statt die Quantentheorie deskriptiv zu behandeln, wurde sie zu Beginn jedoch von Bohr et. al. präskriptiv ausgelegt. Man versuchte also, die einzelnen Begriffe der Klassik sinngemäß umzusetzen und damit die QT umzudeuten, anstatt sich neuer Begrifflichkeit zu bedienen.

Man legte der QT also eine klassische Anschauung zu Grunde, was sich aber schnell als großes Problem herausstellen sollte:

Klassisch ist der in II. angesprochene wechselseitige Ausschluss der Bestimmung von Raum-Zeit-Koordinaten und Messung dynamischer Variablen unverständlich. Klassische Begriffe können also nur in begrenztem Maße übertragen werden.

Nach diesen Vorüberlegungen kann nun eine abschließende Formulierung des Korrespondenzprinzips gegeben werden, das sowohl präskriptiven als auch deskriptiven Charakter hat:

Das Korrespondenzprinzip besagt, dass klassische Physik und Quantenphysik für große Quantenzahlen hinsichtlich ihrer numerischen Resultate asymptotisch übereinstimmen. Dies kann als Grenzfallbeziehung aufgefasst werden, wonach die Quantenphysik für  $\hbar \rightarrow 0$  in die klassische Physik übergeht. Während makroskopische Messapparaturen aufgrund ihrer Funktion stets in den Begriffen und nach den Gesetzen der klassischen Physik zu beschreiben sind, ist die Anwendung klassischer Begriffe auf Quantenobjekte durch die Gesetze der Quantenphysik limitiert.



## Heisenbergs Definition der abgeschlossenen Theorie

Nach den entstandenen Begriffswirungen wurde der Ruf nach semantischer Konsistenz laut (v. Weizsäcker). Daraufhin formte Heisenberg den Begriff der abgeschlossenen Theorie

1. Widerspruchsfrei
2. In der Erfahrung verankert
3. Keine Grenze des Anwendungsbereiches
4. Unentbehrlicher Teil der Sprache in der wir über die Natur reden

Sie muss weiterhin ihre Richtigkeit haben, auch wenn eine neue Theorie aufgestellt wird.

Man sieht also, dass die Quantenmechanik rein semantisch keine abgeschlossene Theorie ist, da sie klassische Begriffe benutzt.

Die Diskrepanz der Begrifflichkeit lässt sich zum Teil dadurch ausräumen, indem der Anwendungsbereich der QT und KM strikt getrennt wird (Heisenberg-Schnitt).

## IV. Das Komplementaritätsprinzip

Der Bohrsche Begriff der Komplementarität ist das Herzstück der Kopenhagener Deutung. Auf seinem Vortrag im Jahre 1927 sagte Bohr in Como:

„Nach dem Wesen der Quantentheorie müssen wir uns also damit begnügen, die Raum-Zeit-Darstellung und die Forderung der Kausalität, deren Vereinigung für die klassischen Theorien kennzeichnend ist, als komplementäre, aber einander ausschließende Züge der Beschreibung des Inhalts der Erfahrung aufzufassen.“

Das Problem ist, dass die Messung der Lagekoordinaten eines Teilchens nicht nur mit einer Änderung der dynamischen Variablen verbunden ist, sondern auch einen Bruch in der kausalen Beschreibung seines dynamischen Verhaltens zur Folge hat.

Diese Komplementarität ist sicher eine recht unanschauliche Sache. Wenn man sich beispielhalber den Welle-Teilchen-Dualismus von Licht anschaut, entspricht dies einer Anpassung der experimentellen Ergebnisse an klassische Anschauungsweisen.

Beschreibungsart		Klassische Physik	Quantenphysik	
Wellenmodell und Teilchenmodell	formal	inkompatibel	ergänzend	}komplementär
	empirisch	inkompatibel	inkompatibel	
Raum-Zeit-Koordinaten Und Festlegung dynamischer Größen	formal	kompatibel	ergänzend	}komplementär
	empirisch	kompatibel	inkompatibel	

Zusammengefasst ist Komplementarität eine zweistellige Relation zwischen physikalischen Phänomenen, Klassen physikalischer Größen und physikalische Modellvorstellungen, die sowohl Inkompatibilität als auch wechselseitige Komplettierung der Relata beinhaltet.

Allgemein bedeutet Komplementär in Operatorschreibweise:

$$[a, b] \neq 0$$

Für  $x$  und  $p$  gilt beispielsweise

$$[x, p] = i\hbar$$

In der klassischen Mechanik findet man übrigens

$$\{p, q\} = 0$$

eine ähnliche Relation. Allerdings kommutieren Ort  $q$  und Impuls  $p$  ja in der Klassik.

Die Operatorschreibweise oktruiert physikalischen Größen eine mathematische Struktur auf. Die Inkompatibilität liegt einzig in der Begriffslogik.

Die Komplementarität ist nicht auf die Quantentheorie beschränkt. Ein Beispiel wäre die Korrelation einer Frequenz und einer Tondauer in der Akustik. Je kürzer ein Tonpuls ist, desto mehr Frequenzen benötige ich, um diesen zu beschreiben.

Mackay fasste die Eigenschaften des Begriffs wie folgt zusammen

- 1) Der Referenzbereich ist identisch
- 2) Eine Anwendung der komplementären Begriffe schließt sich wechselseitig aus
- 3) Die formal-mathematische Vereinigung legt Referenz- und Anwendungsbereich fest.

\*\*

## V. Der Indeterminismus der Quantenmechanik

In der klassischen Mechanik sind durch Angabe von Ort und Impuls zu einem bestimmten Zeitpunkt alle weiteren Werte (auch die dynamischen) für alle Zeiten  $t$  bekannt. Die Mechanik ist also ein vollständig determiniertes System.

Die Quantenmechanik verhält sich indes anders. Ohne Messung verhält sich das System „normal“, bei einer Messung jedoch kollabiert die Wellenfunktion. Werte für den Impuls sind bei Ortsmessung vollständig indeterminiert.

Der Kollaps der Wellenfunktion ergibt sich aus einem Postulat der Quantenmechanik:

Ergibt die Messung der physikalischen Größe  $A$  den Eigenwert  $a_n$ , so ist der Zustand des Systems unmittelbar nach der Messung gleich der auf eins normierten Projektion von  $|\psi\rangle$  auf den zu  $a_n$  gehörenden Eigenraum

$$|\psi\rangle \xrightarrow{\text{Messung von } a_n} \frac{P_n |\psi\rangle}{\sqrt{\langle \psi | P_n | \psi \rangle}} \quad \text{mit} \quad P_n = \sum_{i=1}^{g_n} |u_n^i\rangle \langle u_n^i|$$

Allerdings bedeutet Indeterminismus NICHT, dass die Theorie akausal ist. Die Wahrscheinlichkeiten der Messergebnisse liegen fest. Der Zustand entwickelt sich in der Schrödingergleichung deterministisch, da es sich hierbei um eine stetige Differentialgleichung handelt.

→Kausalität ist in der Quantentheorie indeterministisch verfasst.

## VI. Kritiker der Kopenhagener Deutung

In den Folgejahren, nachdem Bohr „seine“ Kopenhagener Deutung niederschrieb gab es viele Kritiker, die dieser Deutung gegenüber standen.

Während Schrödinger die Diskontinuitäten der Energieniveaus, die ihm intuitiv nicht schmeckten, durch die eben erwähnte Wellendarstellung mit der Schrödinger-Gleichung beseitigte, versuchten andere – unter ihnen Einstein – mit gezielten Versuchen genauer als die Unschärferelation zu messen.

## Das EPR-Paradoxon

Die Idee, die Einstein, Rosen und Podolsky hatten war, den Wert einer physikalischen Größe eines Systems ohne Wechselwirkung zu bestimmen. Wäre so etwas möglich, müsste diese Eigenschaft dem System auch zugesprochen werden. Ließe sich eine Eigenschaft eines nicht wechselwirkenden Systems bestimmen ohne, dass die Theorie dies beinhaltet, wäre die Theorie zumindest unvollständig.



Nach vielen gescheiterten Versuchen hatten sie mit dem EPR-Paradoxon endlich Erfolg.

Ohne Messung sollte eine nicht kommutierende Observable bestimmt werden.

In dem Gedankenexperiment seien zwei Systeme  $S_1$  und  $S_2$  korreliert, also ihre Wechselwirkung zum Zeitpunkt  $t_0$  bekannt. Nach ihrer Wechselwirkung werden sie durch eine Wellenfunktion beschrieben.

Misst man nun am System  $S_1$  zu einem späteren Zeitpunkt einen physikalischen Zustand, so wird auch  $S_2$  instantan in diesen Zustand überführt – und das ohne Wechselwirkung!

\*\*

Man kann also ohne Interaktion einem Quantenobjekt einen Observablenwert zuordnen. Allerdings schaltet man mit der Messung an  $S_1$  mögliche Arten von Voraussagen über  $S_2$  ab, denn bei der Messung z.B. vom Ort in  $S_1$  findet ein undefinierter Impulsübertrag statt. Eine nachträgliche Impulsmessung gibt keine Auskunft mehr über den Impuls in  $S_2$ .

Auch wenn die Unschärferelation nicht verletzt wurde (über den Impuls in  $S_2$  haben wir keine Aussage gemacht) muss die Kopenhagener Vorstellung Federn lassen.

Die in  $S_1$  gemessene Observable findet sich in  $S_2$  instantan wieder. Das ist nur durch eine zeitlose Fernwirkung möglich oder es zollt der Tatsache Tribut, dass die Systeme bis zum Zeitpunkt der Messung nicht getrennt waren.

→ Die Lokalität und die Separabilität müssen in der Quantentheorie aufgegeben werden.

#### Zitat von Mittelstaedt:

Die Theorie ist zu positivistisch. Zur Beschreibung präpariert sie lediglich das System und registriert die Resultate, spricht aber nicht von Objekten und deren Eigenschaften.

#### Zitat von Mach:

Materielle Objekte der Außenwelt sind lediglich nach Praktikabilitätsabwägungen vorgenommene, aus wissenschaftlicher Sicht vorläufige Zusammenfassung von Elementarkomplexen, die in einer zeitlichen Kontinuität und räumlichen Kontiguität stehen.

#### Literatur:

„Hausarbeit zur Erlangung des Magistergrades“ vorgelegt von Christian Suhm 1997  
Kurt Baumann/ Roman U. Sexl „Die Deutungen der Quantentheorie“ 1984  
Wolfgang Nolting „Grundkurs Theoretische Physik 5 Teil1“ 1992