

Zur Philosophie der Quantenmechanik

Vortrag in der Q12 am Gymnasium Geretsried

Tobias Jung

Lehrstuhl für Philosophie und Wissenschaftstheorie
Technische Universität München (TUM)

18. Dezember 2012

Die Quantenmechanik – eine unverstandliche Theorie

- Richard P. Feynman
(1918–1988):
„I think I can safely say
that nobody understands
quantum mechanics.“

Das Verstehen der Quantenmechanik – ein Abgrund

- Niels Bohr (1885–1962):
„Wem nicht schwindlig wird, wenn er vom Planckschen Wirkungsquantum [d. h. von der Quantenmechanik] hört, der hat ja gar nicht verstanden, wovon die Rede ist.“

Die Hoffnung auf ein neues Verständnis von Verstehen

- Werner Heisenberg (1901–1976):
„Ich fragte Bohr daher: ‚Wenn die innere Struktur der Atome einer anschaulichen Beschreibung wenig zugänglich ist [...], wenn wir eigentlich keine Sprache besitzen, mit der wir über diese Struktur reden können, werden wir dann die Atome überhaupt jemals verstehen?‘ Bohr zögerte einen Moment und sagte dann: ‚Doch. Aber wir werden dabei gleichzeitig erst lernen, was das Wort verstehen bedeutet.‘“

Eine einfache Formel ...

- Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

- $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ J s: Plancksches Wirkungsquantum
- Δx : Unbestimmtheit des Ortes
- Δp : Unbestimmtheit des Impulses
- $p = m \cdot v$: Impuls ist Produkt aus Masse m und Geschwindigkeit v

... bereitet Schwierigkeiten

- Mario Bunge (geb. 1919):
„[T]he Heisenberg inequalities
[. . .] are probably the most
controverted formulas in the
whole of theoretical physics.“

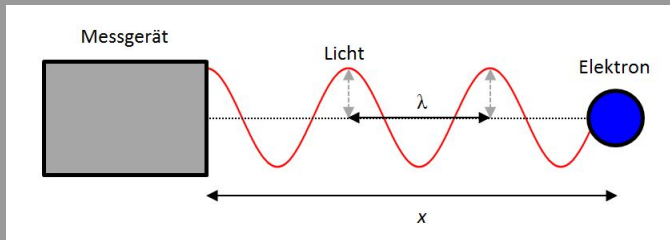
... bereitet Schwierigkeiten

- Mario Bunge (geb. 1919):
„[T]he Heisenberg inequalities
[. . .] are probably the most
controverted formulas in the
whole of theoretical physics.“

Frage: Was bedeutet $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$ wirklich?

Veranschaulichung der Unbestimmtheitsrelation I

- Messung des Orts eines Elektrons
→ Wechselwirkung (z. B. „Licht“) zwischen Elektron und Messgerät für die Ortsmessung
- Streuung des Photons am Elektron
→ Detektion im Messgerät
→ Ortsmessung (z. B. über Anzahl der Wellenberge)
- Licht hat Wellenlänge λ
→ Unbestimmtheit des Ortes des Elektrons $\Delta x \approx \lambda$



Veranschaulichung der Unbestimmtheitsrelation II

- Impuls des Photons $p = \frac{h}{\lambda}$.
- Übertragung von Impuls vom Photon auf das Elektron
→ Unbestimmtheit des Impulses des Elektrons $\Delta p \approx \frac{h}{\lambda}$
- Produkt der Unbestimmtheit des Ortes des Elektrons und der Unbestimmtheit des Impulses des Elektrons:

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx h$$

- Entspricht bis auf unwesentlichen Vorfaktor $\frac{1}{4\pi}$ und Rundungszeichen statt Ungleichheitszeichen der Unbestimmtheitsrelation

Veranschaulichung der Unbestimmtheitsrelation II

- Impuls des Photons $p = \frac{h}{\lambda}$.
- Übertragung von Impuls vom Photon auf das Elektron
→ Unbestimmtheit des Impulses des Elektrons $\Delta p \approx \frac{h}{\lambda}$
- Produkt der Unbestimmtheit des Ortes des Elektrons und der Unbestimmtheit des Impulses des Elektrons:

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx h$$

- Entspricht bis auf unwesentlichen Vorfaktor $\frac{1}{4\pi}$ und Rundungszeichen statt Ungleichheitszeichen der Unbestimmtheitsrelation

Frage:

Was folgt aus dieser Veranschaulichung für die Deutung der Unbestimmtheitsrelation?

Folgerungen aus der Veranschaulichung

- Grund für die Unbestimmtheit des Ortes des Elektrons ist der Wellencharakter des Lichts
- Grund für die Unbestimmtheit des Impulses des Elektrons ist die Wechselwirkung mit dem Licht
→ *Störung* des Elektrons
- Störung des Elektrons beruht auf der Messung, die Wechselwirkung zwischen Elektron und Messgerät voraussetzt
- Störung des Elektrons kann nicht beliebig verkleinert werden:
„In dem Moment, in dem der Ort des Elektrons bekannt ist, kann daher sein Impuls nur bis auf Größen, die jener un stetigen Änderung entsprechen, bekannt sein; also je genauer der Ort bestimmt ist, desto ungenauer ist der Impuls bekannt und umgekehrt[.]“

Heisenbergs Deutung – Zusammenfassung

- ① Unbestimmtheitsrelation ist für ein *einzelnes* Teilchen gültig
- ② Unbestimmtheitsrelation resultiert aus einer mit der Messung unvermeidlich verbundenen Störung, d. h. sie ist *prinzipiell*
- ③ Unbestimmtheitsrelation macht keine Aussagen über das *Teilchen an sich und seine Eigenschaften* unabhängig von der Messung
- ④ Unbestimmtheitsrelation macht Aussage über das subjektive Wissen, das ein Beobachter von dem Teilchen erlangen kann (*subjektivistische Deutung*)

Ausblick: Kausalität in der klassischen Mechanik I

- Klassische Mechanik: Wenn erstens die Kräfte in einem System und zweitens zu einem gegebenen Zeitpunkt Ort und Geschwindigkeit aller Teilchen bekannt sind, dann ist die zeitliche Entwicklung des Systems vollständig bestimmt.

Ausblick: Kausalität in der klassischen Mechanik II

- Pierre Simon Laplace (1749–1827):
„Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennte, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiß sein und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen.“ (Laplacescher Dämon)

Ausblick: Kausalität in der klassischen Mechanik II

- Pierre Simon Laplace (1749–1827):
„Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kannte, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiß sein und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen.“ (Laplacescher Dämon)

→ Vollständiger Determinismus der klassischen Mechanik

Ausblick: Kausalität in der Quantenmechanik

- Quantenmechanik: Man kann zu einem gegebenen Zeitpunkt gar nicht die Orte und Impulse aller Teilchen eines Systems durch Messung *bestimmen*.
- Heisenberg:
„Aber an der scharfen Formulierung des Kausalgesetzes: ‚Wenn wir die Gegenwart genau kennen, können wir die Zukunft berechnen‘, ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch. Wir können die Gegenwart in allen Bestimmungen prinzipiell nicht kennenlernen. [...] Weil alle Experimente den Gesetzen der Quantenmechanik [...] unterworfen sind, so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt.“

Ausblick: Kausalität in der Quantenmechanik

- Quantenmechanik: Man kann zu einem gegebenen Zeitpunkt gar nicht die Orte und Impulse aller Teilchen eines Systems durch Messung *bestimmen*.
- Heisenberg:
„Aber an der scharfen Formulierung des Kausalgesetzes: ‚Wenn wir die Gegenwart genau kennen, können wir die Zukunft berechnen‘, ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch. Wir können die Gegenwart in allen Bestimmungen prinzipiell nicht kennenlernen. [...] Weil alle Experimente den Gesetzen der Quantenmechanik [...] unterworfen sind, so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt.“

Offene Frage:

Ist die Quantenmechanik indeterministisch und akausal?

Ausblick: Messproblem

- Keine Messung am Quantensystem: Schrödinger-Gleichung

$$i\frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = \hat{H} |\psi\rangle$$

- Messung am Quantensystem: „Kollaps der Wellenfunktion“

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle \rightarrow |\psi_k\rangle \text{ mit Wahrscheinlichkeit } |c_k|^2$$

Ausblick: Messproblem

- Keine Messung am Quantensystem: Schrödinger-Gleichung

$$i\frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = \hat{H} |\psi\rangle$$

- Messung am Quantensystem: „Kollaps der Wellenfunktion“

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle \rightarrow |\psi_k\rangle \text{ mit Wahrscheinlichkeit } |c_k|^2$$

→ Zwei verschiedene Formeln für die zeitliche Entwicklung eines Quantensystems.

Ausblick: Messproblem

- Keine Messung am Quantensystem: Schrödinger-Gleichung

$$i\frac{\hbar}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = \hat{H} |\psi\rangle$$

- Messung am Quantensystem: „Kollaps der Wellenfunktion“

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle \rightarrow |\psi_k\rangle \text{ mit Wahrscheinlichkeit } |c_k|^2$$

→ Zwei verschiedene Formeln für die zeitliche Entwicklung eines Quantensystems.

→ Inkonsistenz der Quantenmechanik

Eine formale Herleitung der Quantenmechanik

- Herleitung der Unbestimmtheitsrelation aus dem mathematischen Formalismus der Quantenmechanik
- Für den Ortsoperator \hat{x} und den Impulsoperator \hat{p} gilt:

$$\Delta\hat{x} \cdot \Delta\hat{p} \geq \frac{1}{2} |\langle [\hat{x}, \hat{p}] \rangle|$$

- $\Delta\hat{x}$ und $\Delta\hat{p}$: Standardabweichungen
- $[\hat{x}, \hat{p}] = \hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x}$: Kommutator

Unbestimmtheitsrelation auf Grundlage der Statistischen Interpretation

- Unbestimmtheitsrelation nicht gültig für *ein einzelnes Teilchen*, sondern für ein *Ensemble von Teilchen*
 - Begriff „Objekt“ wird fraglich
 - Keine Aussage über Objekte, sondern über *Zustände*
- Unbestimmtheitsrelation beruht nicht auf einer Störung des Teilchens durch die Messung, da ja an jedem Teilchen des Ensembles *entweder* der Ort *oder* der Impuls gemessen wurde

Epistemologische und ontologische Deutung der Unbestimmtheitsrelation

- *Epistemologische* Deutung:
Unbestimmtheitsrelation drückt *Beschränkung des Wissens* über Ort und Impuls *eines* Teilchens bzw. *eines Ensembles* von Teilchen aus
- *Ontologische* Deutung:
Unbestimmtheitsrelation drückt *Beschränkung hinsichtlich der Eigenschaften* eines Teilchens aus, d. h. ein Teilchen *besitzt* nicht zugleich einen Ort und einen Impuls

Einstein und der *deus ludens*

- Albert Einstein (1879–1955) hatte den Begriff der Wahrscheinlichkeit in die Quantenmechanik eingeführt
- Einstein lehnte aber den Wahrscheinlichkeitscharakter der Quantenmechanik als letztgültige Beschreibung der Natur ab: „Die Quantenmechanik ist sehr achtung-gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten [d. h. Gottes] bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der nicht würfelt.“

Ist die Quantenmechanik unvollständig?

- Hinreichende Bedingung für Element der *physikalischen Realität*: Möglichkeit der exakten Vorhersage einer physikalischen Größe, das diesem Element der physikalischen Realität entspricht
- Notwendige Bedingung für *Vollständigkeit*: Jedes Element der physikalischen Realität hat Entsprechung in der physikalischen Theorie
- Folgerung Einsteins: Da z. B. Ort und Impuls eines Teilchens *in der Quantenmechanik* nicht gleichzeitig physikalische Realität haben, ist die *Quantenmechanik* eine *unvollständig* Theorie

Ist die Quantenmechanik unvollständig?

- Hinreichende Bedingung für Element der *physikalischen Realität*: Möglichkeit der exakten Vorhersage einer physikalischen Größe, das diesem Element der physikalischen Realität entspricht
- Notwendige Bedingung für *Vollständigkeit*: Jedes Element der physikalischen Realität hat Entsprechung in der physikalischen Theorie
- Folgerung Einsteins: Da z. B. Ort und Impuls eines Teilchens *in der Quantenmechanik* nicht gleichzeitig physikalische Realität haben, ist die *Quantenmechanik* eine *unvollständig* Theorie

Frage: Kann es eine vollständige Theorie im Sinne Einsteins geben?

Ist die Quantenmechanik unvollständig?

- Hinreichende Bedingung für Element der *physikalischen Realität*: Möglichkeit der exakten Vorhersage einer physikalischen Größe, das diesem Element der physikalischen Realität entspricht
- Notwendige Bedingung für *Vollständigkeit*: Jedes Element der physikalischen Realität hat Entsprechung in der physikalischen Theorie
- Folgerung Einsteins: Da z. B. Ort und Impuls eines Teilchens *in der Quantenmechanik* nicht gleichzeitig physikalische Realität haben, ist die *Quantenmechanik* eine *unvollständig* Theorie

Frage: Kann es eine vollständige Theorie im Sinne Einsteins geben?

Heutige Antwort: Nein.

Ausblick: Verschränkung

- Teilchen mit Spin $S = 0$ zerfällt in zwei Elektronen, die auseinanderfliegen und nicht miteinander wechselwirken
- Gesamtspin bleibt erhalten: $S_1 + S_2 = S = 0$
- Verschränkung von Elektron 1 und Elektron 2:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (|\uparrow\rangle_1 \otimes |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 \otimes |\uparrow\rangle_2)$$

- *Nichtseparabilität*: Elektron 1 und Elektron 2 lassen sich nicht *getrennt* voneinander beschreiben
- *Nichtlokalität*: Abhängigkeit des Ergebnisses einer Messung an Elektron 2 vom Ergebnis der Messung an Elektron 1 bleibt auch erhalten, wenn Elektron 1 und Elektron 2 nicht einmal mehr mit Lichtgeschwindigkeit „kommunizieren“ können

Zusammenfassung

- 1. Deutung: Unbestimmtheitsrelation gilt für einzelnes Teilchen und resultiert aus der Störung in Folge der Messung.
- 2. Deutung: Unbestimmtheitsrelation gilt für Ensemble von Teilchen und ist *nicht* verursacht durch eine Störung in Folge der Messung.
- 3. Deutung: Unbestimmtheitsrelation bezieht sich nicht auf unsere Kenntnis, sondern auf das Teilchen selbst.

Zusammenfassung

- 1. Deutung: Unbestimmtheitsrelation gilt für einzelnes Teilchen und resultiert aus der Störung in Folge der Messung.
- 2. Deutung: Unbestimmtheitsrelation gilt für Ensemble von Teilchen und ist *nicht* verursacht durch eine Störung in Folge der Messung.
- 3. Deutung: Unbestimmtheitsrelation bezieht sich nicht auf unsere Kenntnis, sondern auf das Teilchen selbst.

→ Frage nach der Wirklichkeit

Zusammenfassung

- 1. Deutung: Unbestimmtheitsrelation gilt für einzelnes Teilchen und resultiert aus der Störung in Folge der Messung.
- 2. Deutung: Unbestimmtheitsrelation gilt für Ensemble von Teilchen und ist *nicht* verursacht durch eine Störung in Folge der Messung.
- 3. Deutung: Unbestimmtheitsrelation bezieht sich nicht auf unsere Kenntnis, sondern auf das Teilchen selbst.

→ Frage nach der Wirklichkeit

→ Frage nach Determinismus und Freiheit

Zusammenfassung

- 1. Deutung: Unbestimmtheitsrelation gilt für einzelnes Teilchen und resultiert aus der Störung in Folge der Messung.
- 2. Deutung: Unbestimmtheitsrelation gilt für Ensemble von Teilchen und ist *nicht* verursacht durch eine Störung in Folge der Messung.
- 3. Deutung: Unbestimmtheitsrelation bezieht sich nicht auf unsere Kenntnis, sondern auf das Teilchen selbst.

→ Frage nach der Wirklichkeit

→ Frage nach Determinismus und Freiheit

→ *Frage*: Was ist der Mensch?

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!