

Zum Bahnbegriff eines Teilchens in der Physik

Dr. Tilo Moser

11. Februar 2009

Abschlussvorlesung—Mathematik I für Physiker

Kann man auch in der Quantenmechanik von der Bahn eines Teilchens sprechen?

Zitate zum Bahnbegriff in der Quantenmechanik

„Das Wort ‚Bahn‘ hat hier also keinen vernünftigen Sinn.“

W. Heisenberg in „Quantentheorie und Philosophie“

Zitate zum Bahnbegriff in der Quantenmechanik

„Das Wort ‚Bahn‘ hat hier also keinen vernünftigen Sinn.“

W. Heisenberg in „Quantentheorie und Philosophie“

„Im Atom aber soll es nach Ihrer Ansicht keine Bahnen des Elektrons geben. Das ist doch offenbar Unsinn.“

A. Einstein in „Quantentheorie und Philosophie“

Zitate zum Bahnbegriff in der Quantenmechanik

„Das Wort ‚Bahn‘ hat hier also keinen vernünftigen Sinn.“

W. Heisenberg in „Quantentheorie und Philosophie“

„Im Atom aber soll es nach Ihrer Ansicht keine Bahnen des Elektrons geben. Das ist doch offenbar Unsinn.“

A. Einstein in „Quantentheorie und Philosophie“

„Für Elektronen [...] lässt sich keine Beschreibung liefern, die gleichzeitig angibt, an welchem Ort sie sich befinden und mit welcher Geschwindigkeit sie sich bewegen.“

B. Greene in „Das elegante Universum“ (1999)

Zitate zum Bahnbegriff in der Quantenmechanik

„Das Wort ‚Bahn‘ hat hier also keinen vernünftigen Sinn.“

W. Heisenberg in „Quantentheorie und Philosophie“

„Im Atom aber soll es nach Ihrer Ansicht keine Bahnen des Elektrons geben. Das ist doch offenbar Unsinn.“

A. Einstein in „Quantentheorie und Philosophie“

„Für Elektronen [...] lässt sich keine Beschreibung liefern, die gleichzeitig angibt, an welchem Ort sie sich befinden und mit welcher Geschwindigkeit sie sich bewegen.“

B. Greene in „Das elegante Universum“ (1999)

„[...] I noted that the results [...] do not rule out the possibility that particles always have definite positions and velocities [...]. Moreover, Bohm's version of quantum mechanics explicitly realizes this possibility.“

B. Greene in „The Fabric of the Cosmos“ (2004)

- ▶ Newtonsche Mechanik ist eine Theorie über die Bewegung von Punktteilchen.
- ▶ Ein Teilchen in 3 Dimensionen: Ort $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$,

$$m \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}).$$

- ▶ Die Theorie ist deterministisch und 2. Ordnung, d.h. $\mathbf{x}(t = t_0)$ und $\frac{d}{dt} \mathbf{x}(t = t_0)$ legen die Entwicklung für alle Zeiten fest.

- ▶ Anfang des letzten Jahrhunderts mehrten sich experimentelle Befunde, die mit den herkömmlichen Theorien nicht zu erklären waren (Strahlungsformel, Photoeffekt, Energiespektren)
- ▶ Unter bestimmten Umständen verhalten sich Elektronen am Doppelspalt genauso wie Licht und ergeben ein Interferenzmuster
- ▶ Folgerung: Klassische Mechanik ist unter diesen Umständen nicht mehr gültig, aber das ist schon alles
- ▶ Aus der Empfindlichkeit solch mikroskopischer Systeme folgt: Die direkte Beobachtung einer Teilchenbahn verändert diese, d.h. die Bahn eines Elektrons kann man nicht in gleicher Weise wie z.B. die Flugbahn eines Fußballs „messen“

Heisenberg: „Da es aber doch vernünftig ist, in eine Theorie nur die Größen aufzunehmen, die beobachtet werden können, [...]“

Einstein: „Aber Sie glauben doch nicht im Ernst, daß man in eine physikalische Theorie nur beobachtbare Größen aufnehmen kann [...] vom prinzipiellen Standpunkt aus ist es ganz falsch, eine Theorie nur auf beobachtbare Größen gründen zu wollen. Denn es ist ja in Wirklichkeit genau umgekehrt. Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.“

Aus W. Heisenberg: Quantentheorie und Philosophie

Entwicklung der Quantenmechanik

- ▶ Die Quantenmechanik entwickelte sich im Sinne von Heisenberg, die sog. „Kopenhagener Interpretation“ entstand
- ▶ Diese Interpretation liefert eine Regel, um die Wahrscheinlichkeit von Messergebnissen vorherzusagen
- ▶ Die Existenz von Teilchen wird durch Ihre Beobachtung bedingt
- ▶ Einstein: „Do you really believe that the moon exists only when I look at it?“
- ▶ Artikel von D. Mermin (1985): Is the moon there when nobody looks?
- ▶ Dieser Zugang zur Quantenmechanik führt zu konzeptionellen Problemen, die bis heute nicht gelöst sind und unter bekannten Begriffen geführt werden: Messproblem, Schrödingers Katze

Bohmsche Mechanik als Grundlage der Quantenmechanik

- ▶ 30 Jahre nach Entdeckung der Quantenmechanik war sie gefunden: Die Gleichung für die Geschwindigkeit eines Teilchens
- ▶ Diese Gleichung ergänzte die bisherige Theorie in einer Weise, dass die Regeln der „Kopenhagener Interpretation“ abgeleitet werden können; insbesondere ergeben sich also die gleichen experimentellen Vorhersagen
- ▶ Die Entdeckung dieser Gleichung war ein Schock für die physikalische Gemeinschaft, die schon das durch die „Kopenhagener Interpretation“ bedingtes neues Weltbild verinnerlicht hatte
- ▶ Oppenheimer: „Wenn wir Bohm nicht widerlegen können, müssen wir ihn ignorieren.“

Eigenschaften der Bohmschen Mechanik

- ▶ Bohmsche Mechanik ist eine Theorie über die Bewegung von Punktteilchen, die alle Ergebnisse der nichtrelativistischen Quantenmechanik reproduziert
- ▶ Wellenfunktion ψ_t entwickelt sich gemäß der Schrödinger-Gleichung

$$i \frac{\partial}{\partial t} \psi_t(\mathbf{x}) = H \psi_t(\mathbf{x})$$

- ▶ Die Wahrscheinlichkeit, dass der Ort des Teilchens im Bereich A liegt, ist:

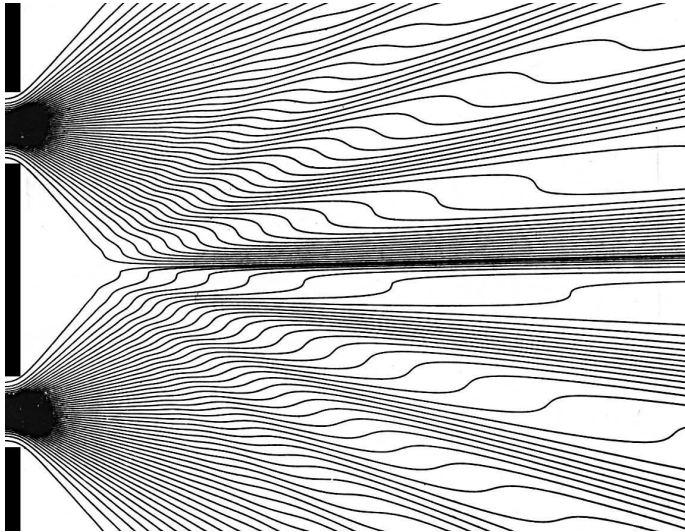
$$\int_A |\psi(\mathbf{x})|^2 d^3x$$

- ▶ Die Bahnen \mathbf{x}_t^ψ werden durch die Wellenfunktion geführt:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}_t^\psi = \text{Im} \frac{\nabla \psi_t}{\psi_t}(\mathbf{x}_t^\psi).$$

- ▶ Die Theorie ist deterministisch und erster Ordnung

Doppelspalt-Experiment



- ▶ Auch in der Quantenmechanik kann man von der Bahn eines Teilchens sprechen; es gibt eine Formulierung ohne Paradoxa und Mysterien (Bohmsche Mechanik)
- ▶ Bohmsche Mechanik ist ein Gegenbeispiel zu jedem Argument oder Beweis, dass es keine Bahnen in der Quantenmechanik geben kann.
- ▶ Immer noch sitzt der Glaube tief, dass es in der Quantenmechanik keine Bahnen geben kann, siehe Greene 1999
- ▶ Es gibt Hoffnung, siehe Greene 2004.
- ▶ Leider sind wir noch nicht so weit, wie es J.S. Bell in den 80ern formulierte:

„Why is the pilot wave picture ignored in the text books? Should it not be taught, not as the only way, but as an antidote to the prevailing complacency? To show that vagueness, subjectivity, and indeterminism, are not forced on us by experimental facts, but by deliberate theoretical choice?“

- ▶ D. Dürr: Bohmsche Mechanik als Grundlage der Quantenmechanik, Springer 2001
- ▶ D. Dürr und S. Teufel: Bohmian Mechanics as the Foundation of Quantum Mechanics, Springer 2009
- ▶ www.bohmian-mechanics.net