

Bohm'sche Mechanik

Determinismus in der Quantenmechanik



Sven Köppel
Mirko Pohland

Fachbereich 13, Physik

9. Juni, 2011

Kritik an der landläufigen Interpretation der Quantenmechanik

- ähnlich wie in der Thermodynamik wäre es möglich, dass die Quantenmechanik Systeme im Mittel beschreibt



Kritik an der landläufigen Interpretation der Quantenmechanik

- ähnlich wie in der Thermodynamik wäre es möglich, dass die Quantenmechanik Systeme im Mittel beschreibt
- auf einer Skala kleiner als $10^{11}m$ würden “versteckte Variablen” zum Tragen kommen



Kritik an der landläufigen Interpretation der Quantenmechanik

- ähnlich wie in der Thermodynamik wäre es möglich, dass die Quantenmechanik Systeme im Mittel beschreibt
- auf einer Skala kleiner als $10^{11}m$ würden "versteckte Variablen" zum Tragen kommen
- Unschärfe ist ein Resultat unzulänglicher Messvorgänge



Ansatz

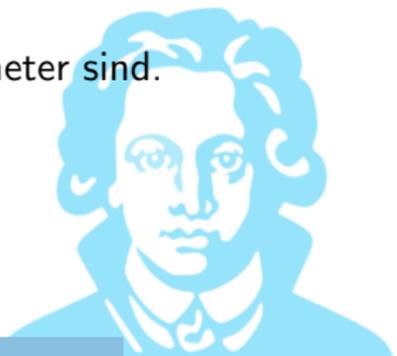
Wie auch in der Quantenmechanik geht man von der Schrödingergleichung aus:

$$i\hbar \frac{d}{dt} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(x) \psi \quad (1)$$

Als Ansatz wählt man nun in Polardarstellung:

$$\psi = R e^{\frac{i}{\hbar} S} \quad (2)$$

wobei sowohl R als auch S reelle Parameter sind.



Ansatz

Einsetzen der Wellenfunktion in die Schrödingergleichung ergibt:

$$i\hbar\left(\frac{dR}{dt} + \frac{i}{\hbar}R\frac{dS}{dt}\right) = \frac{-\hbar^2}{2m}\left[\nabla^2 R - \frac{R}{\hbar^2}(\nabla S)^2\right] + V(x)R \\ - \frac{\hbar^2}{2m}\frac{i}{\hbar}\left[2\nabla R\nabla S + R\nabla^2 S\right]$$



Ergebnis

Trennt man nun Real- und Imaginärteil so erhält man:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{-1}{2m} \left[2\nabla R \nabla S + R \nabla^2 S \right] \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} - \frac{1}{2m} (\nabla S)^2 - V(x) \quad (4)$$



Interpretation

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} - \frac{1}{2m} (\nabla S)^2 - V(x)$$

- für $\hbar \rightarrow 0$ erhält man eine klassische Bewegungsgleichung



Interpretation

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} - \frac{1}{2m} (\nabla S)^2 - V(x)$$

- für $\hbar \rightarrow 0$ erhält man eine klassische Bewegungsgleichung
- Der Term $\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R}$ kann nun als eine Art Quantenpotential interpretiert werden



Interpretation

Motivation

Mathematische
Formulierung

Interpretation
der Ergebnisse

Messung und
Observable

Wahrscheinlichkeiten
das quanten-
mechanische
Messproblem
Nichtlokalität,
Realität,
Kausalität, ...

Kritik

Ausblick,
Verallgemeinerungen

Rezeption an
der
Bohm'schen
Mechanik

Literaturverzeichnis

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} - \frac{1}{2m} (\nabla S)^2 - V(x)$$

- für $\hbar \rightarrow 0$ erhält man eine klassische Bewegungsgleichung
- Der Term $\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R}$ kann nun als eine Art Quantenpotential interpretiert werden
 - auch dann ist die Lösung von S eine Bewegungsgleichung, die mit Anfangsbedingungen eindeutig lösbar ist



Wahrscheinlichkeitsdichte

$$\begin{aligned}P(x) &= |\psi|^2 = R^2 \\ \implies \frac{dP}{dt} + \nabla \left(P \frac{\nabla S}{m} \right) &= 0 \\ &= \frac{dP}{dt} + \nabla(Pv) = 0\end{aligned}$$

- Also können wir $\frac{\nabla S}{m}$ als Geschwindigkeitsfeld identifizieren.



Wahrscheinlichkeitsdichte

$$\begin{aligned}P(x) &= |\psi|^2 = R^2 \\ \implies \frac{dP}{dt} + \nabla \left(P \frac{\nabla S}{m} \right) &= 0 \\ &= \frac{dP}{dt} + \nabla(Pv) = 0\end{aligned}$$

- Also können wir $\frac{\nabla S}{m}$ als Geschwindigkeitsfeld identifizieren.
 - d.h. wir können jedem Teilchenort x eine Geschwindigkeit v zuordnen



Bohm'sche Trajektorien

Motivation

Mathematische
Formulierung

Interpretation
der Ergebnisse

Messung und
Observable

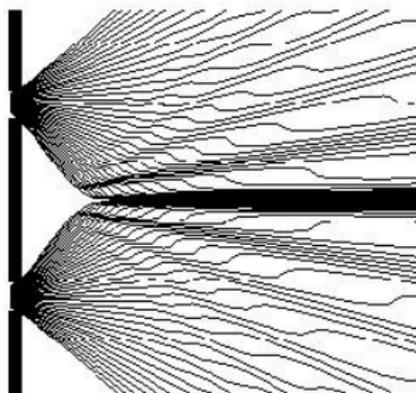
Wahrscheinlichkeiten
das quanten-
mechanische
Messproblem
Nichtlokalität,
Realität,
Kausalität, ...

Kritik

Ausblick,
Verallgemeinerungen

Rezeption an
der
Bohm'schen
Mechanik

Literaturverzeichnis



Wahrscheinlichkeiten in der Bohmschen Mechanik

- das Messproblem tritt nicht auf



Wahrscheinlichkeiten in der Bohmschen Mechanik

- das Messproblem tritt nicht auf
- in der QM sind Wahrscheinlichkeit und Zufall Eigenschaften der phys. Realität



Wahrscheinlichkeiten in der Bohmschen Mechanik

- das Messproblem tritt nicht auf
- in der QM sind Wahrscheinlichkeit und Zufall Eigenschaften der phys. Realität
- de Broglie-Bohm: Wahrscheinlichkeiten durch Anfangsbedingungen



Messungen

- Die Messung selbst ist in der QM vom Zufall abhängig



Messungen

- Die Messung selbst ist in der QM vom Zufall abhängig
 - dies ist ein Resultat der Überlagerung von Wellengleichungen und des Kollapses bei Messungen



Messungen

- Die Messung selbst ist in der QM vom Zufall abhängig
 - dies ist ein Resultat der Überlagerung von Wellengleichungen und des Kollapses bei Messungen
- Die Bohmsche Mechanik kennt dieses Messproblem nicht



Messungen

- Die Messung selbst ist in der QM vom Zufall abhängig
 - dies ist ein Resultat der Überlagerung von Wellengleichungen und des Kollapses bei Messungen
- Die Bohmsche Mechanik kennt dieses Messproblem nicht
 - Das tatsächliche Messresultat hängt vom Ort des Teilchens auf der Wellenfunktion ab.



Messungen

- Die Messung selbst ist in der QM vom Zufall abhängig
 - dies ist ein Resultat der Überlagerung von Wellengleichungen und des Kollapses bei Messungen
- Die Bohmsche Mechanik kennt dieses Messproblem nicht
 - Das tatsächliche Messresultat hängt vom Ort des Teilchens auf der Wellenfunktion ab.
 - versch. Messresultate hängen demnach nur von der Konfiguration des Systems ab



Nichtlokalität, Realität, Kausalität

- EPR-Experiment: gleiche Aussage

Motivation

Mathematische
Formulierung

Interpretation
der Ergebnisse

Messung und
Observable

Wahrscheinlichkeiten
das quanten-
mechanische
Messproblem

Nichtlokalität,
Realität,
Kausalität, ...

Kritik

Ausblick,
Verallgemeinerungen

Rezeption an
der
Bohm'schen
Mechanik

Literaturverzeichnis



Nichtlokalität, Realität, Kausalität

- EPR-Experiment: gleiche Aussage
- Verletzung der Bell'schen Ungleichung: gleiche Aussage



Nichtlokalität, Realität, Kausalität

- EPR-Experiment: gleiche Aussage
- Verletzung der Bell'schen Ungleichung: gleiche Aussage
- Nichtlokalität: $v = v(\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_N)$



Nichtlokalität, Realität, Kausalität

- EPR-Experiment: gleiche Aussage
- Verletzung der Bell'schen Ungleichung: gleiche Aussage
- Nichtlokalität: $v = v(\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_N)$
- BM ist konsistent zu kanonischer QM



Motivation

Mathematische
Formulierung

Interpretation
der Ergebnisse

Messung und
Observable

Wahrscheinlichkeiten
das quanten-
mechanische
Messproblem
Nichtlokalität,
Realität,
Kausalität, ...

Kritik

Ausblick,
Verallgemeinerungen

Rezeption an
der
Bohm'schen
Mechanik

Literaturverzeichnis

Kritik an der Bohmschen Mechanik

- Metaphysik



Kritik an der Bohmschen Mechanik

- Metaphysik
- Ockham's Razor



Kritik an der Bohmschen Mechanik

- Metaphysik
- Ockham's Razor
- Zurück zur klassischen Physik



Kritik an der Bohmschen Mechanik

- Metaphysik
- Ockham's Razor
- Zurück zur klassischen Physik
- Leere Wellenfunktionen



Kritik an der Bohmschen Mechanik

- Metaphysik
- Ockham's Razor
- Zurück zur klassischen Physik
- Leere Wellenfunktionen
- Asymmetrie \vec{P} vs. \vec{X}



Kritik an der Bohmschen Mechanik

- Metaphysik
- Ockham's Razor
- Zurück zur klassischen Physik
- Leere Wellenfunktionen
- Asymmetrie \vec{P} vs. \vec{X}
- Das ESSW-Experiment



Ausblick, Verallgemeinerungen

- Erklärung des Spins ohne verborgene Variablen (Kontextualisierung)



Ausblick, Verallgemeinerungen

- Erklärung des Spins ohne verborgene Variablen (Kontextualisierung)
- Bohmsche Feldtheorien (Bohm-Dirac-Theorie)



Ausblick, Verallgemeinerungen

- Erklärung des Spins ohne verborgene Variablen (Kontextualisierung)
- Bohmsche Feldtheorien (Bohm-Dirac-Theorie)
- Relativistische Verallgemeinerung zu Bohmschen QFT



Rezeption an der Bohm'schen Mechanik

- Liefert keine zusätzlichen Informationen



Rezeption an der Bohm'schen Mechanik

- Liefert keine zusätzlichen Informationen
- Wird als unwichtig betrachtet



Rezeption an der Bohm'schen Mechanik

- Liefert keine zusätzlichen Informationen
- Wird als unwichtig betrachtet
- Ab den 90er Jahren: Neue Arbeitsgruppen zur Bohmschen Mechanik



Motivation

Mathematische
Formulierung

Interpretation
der Ergebnisse

Messung und
Observable

Wahrscheinlichkeiten
das quanten-
mechanische
Messproblem
Nichtlokalität,
Realität,
Kausalität, ...

Kritik

Ausblick,
Verallgemeinerungen

Rezeption an
der
Bohm'schen
Mechanik

Literaturverzeichnis

Literatur

- David Bohm: A Suggested interpretation of Quantum Theorie in Terms of "Hidden" Variables, 1952
- Arbeitsgruppe Dürr, Uni München ([www.mathematik.uni-muenchen.de/ bohmmech](http://www.mathematik.uni-muenchen.de/~bohmmech))
- Wikipedia (De-Broglie-Bohm-Theorie etc. pp)
- O. Passon: Bohmsche Mechanik, Verlag Harri Deutsch, 2004

