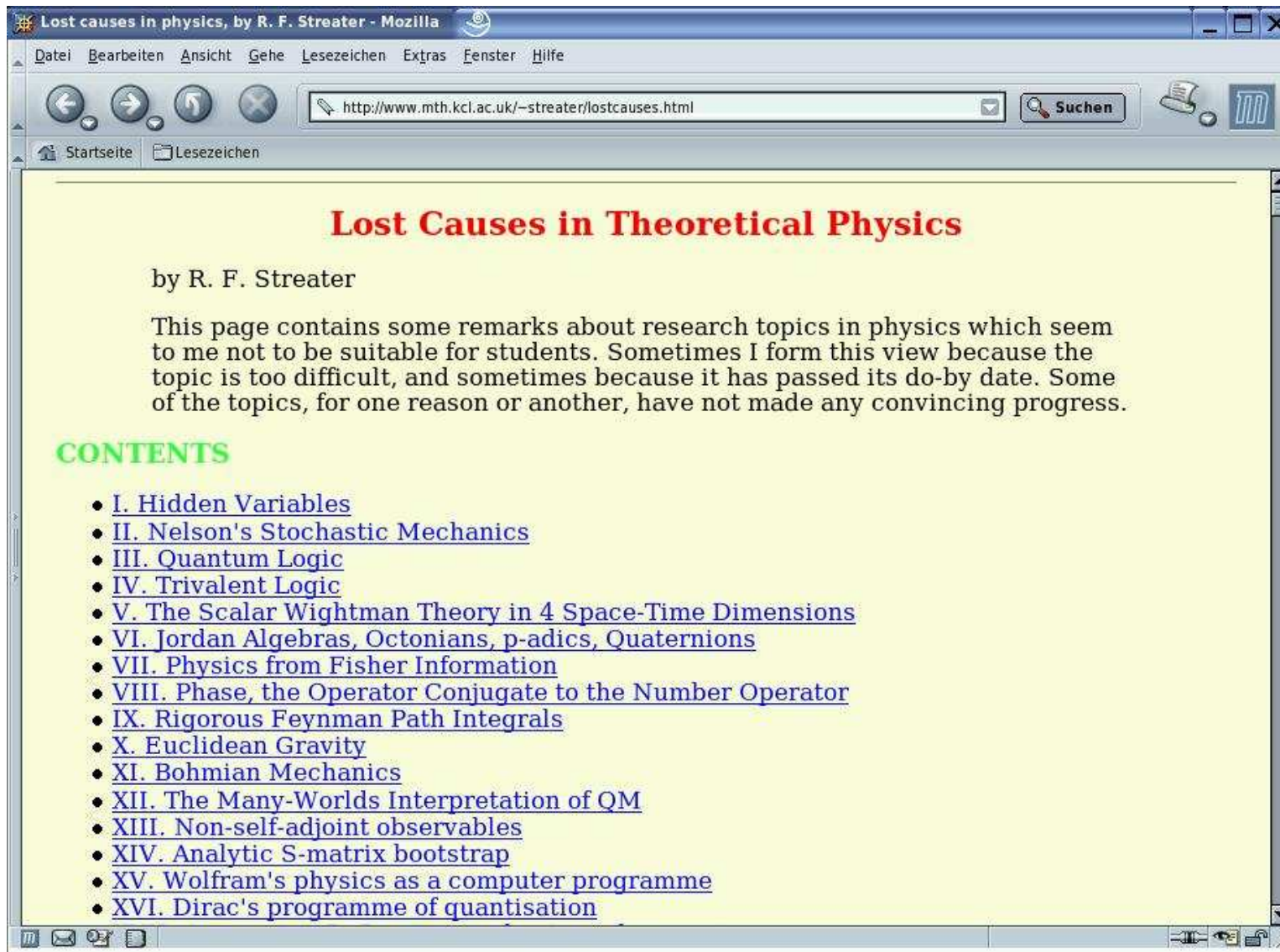


Was sie schon immer über Bohmsche
Mechanik wissen wollten
und sich nie zu fragen trauten

Oliver Passon

Zentralinstitut für Angewandte Mathematik
Forschungszentrum Jülich

Polemik



Lost causes in physics, by R. F. Streater - Mozilla

http://www.mth.kcl.ac.uk/~streater/lostcauses.html

Lost Causes in Theoretical Physics

by R. F. Streater

This page contains some remarks about research topics in physics which seem to me not to be suitable for students. Sometimes I form this view because the topic is too difficult, and sometimes because it has passed its do-by date. Some of the topics, for one reason or another, have not made any convincing progress.

CONTENTS

- [I. Hidden Variables](#)
- [II. Nelson's Stochastic Mechanics](#)
- [III. Quantum Logic](#)
- [IV. Trivalent Logic](#)
- [V. The Scalar Wightman Theory in 4 Space-Time Dimensions](#)
- [VI. Jordan Algebras, Octonians, p-adics, Quaternions](#)
- [VII. Physics from Fisher Information](#)
- [VIII. Phase, the Operator Conjugate to the Number Operator](#)
- [IX. Rigorous Feynman Path Integrals](#)
- [X. Euclidean Gravity](#)
- [XI. Bohmian Mechanics](#)
- [XII. The Many-Worlds Interpretation of QM](#)
- [XIII. Non-self-adjoint observables](#)
- [XIV. Analytic S-matrix bootstrap](#)
- [XV. Wolfram's physics as a computer programme](#)
- [XVI. Dirac's programme of quantisation](#)

Quanten-Pornographie

Im Mikrokosmos gelten andere Gesetze. Daß sie etwas mit der Alltagsrealität zu tun haben, gilt als anstößig

VON BJÖRN SCHWENKER

Die materielle Welt besteht aus Atomen, und diese wiederum bestehen aus noch kleineren Objekten, etwa Elektronen – so steht es in jedem Schulbuch. Stühle, Tische, Steine sind in der Realität mehr oder weniger wohlgeordnete Ansammlungen winziger Teilchen.

In der Realität? Tatsächlich war selbst die Existenz der Atome noch um 1900 stark umstritten; erst eine der drei Arbeiten Albert Einsteins in seinem Wunderjahr 1905 verhalf der Idee endgültig zum Durchbruch. Doch zwanzig Jahre später war wieder alles ganz anders. Zwar zweifelte niemand mehr, daß die Materie letztlich aus diskreten Objekten besteht, wohl aber daran, daß sich diese verhielten wie verkleinerte Fußbälle. Es stellte sich heraus, daß die vertrauten mechanischen Gesetze in der Mikrowelt nicht mehr gelten. Sie müssen dort durch die Gesetze der Quantenmechanik ersetzt werden. Dieser Quantengesetze, etwa jene, die beim sogenannten Doppelspaltexperiment zum Zuge kommen (siehe „Paradoxes Torwandschießen“), brachten viele Physiker dazu, sich



Unbeugsam: David Bohm 1949

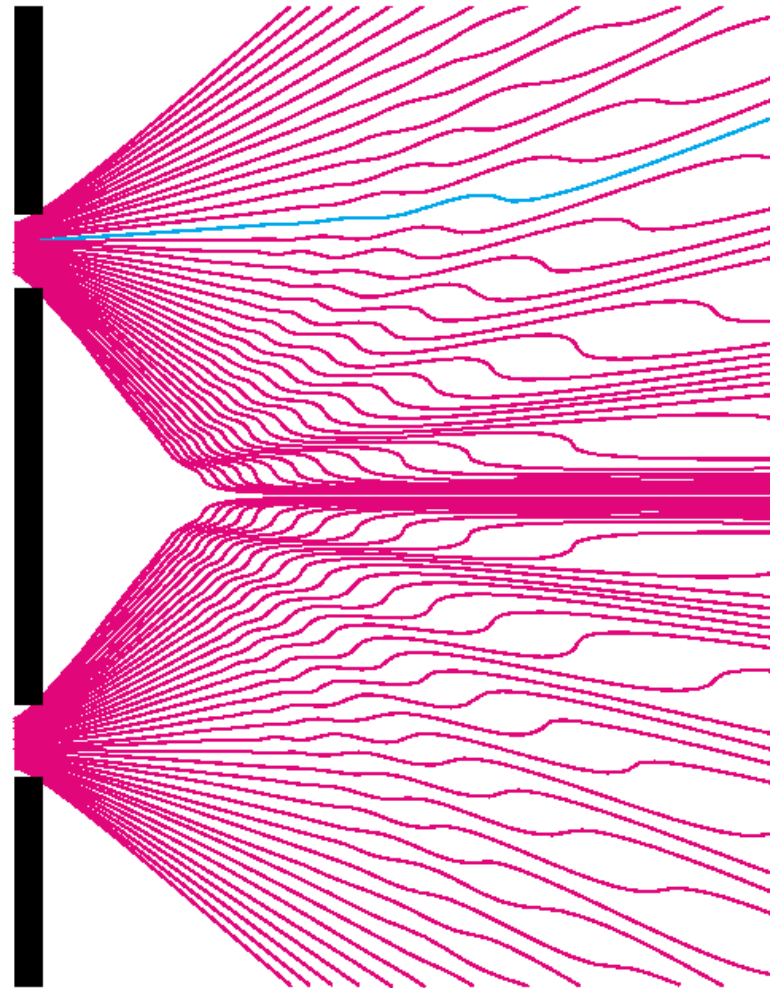
Der Unbequeme

Der 1917 in Pennsylvania geborene David Bohm gilt als eines der größten physikalischen Talente seiner Generation. Dennoch eckte er an – und nicht erst mit seiner Interpretation der Quantenmechanik. 1949, als Bohm Assistenz-Professor an der Universität Princeton war, zitierte man ihn vor das berüchtigte Komitee für „unamerikanische Aktivitäten“, das ihn verdächtigte, ein kommunistischer Agent gewesen zu sein. Bohm verweigerte die Aussage, woraufhin man ihn zu einer Haftstrafe verurteilte. 1951 wurde er freigesprochen, doch die Universität Princeton verbot ihm, jemals wieder den Campus zu betreten. In seiner Heimat gab es für Bohm keine Chance mehr auf eine wissenschaftliche Karriere.

Erzeugung und Vernichtung von Elementarteilchen ausweiten läßt, wie man sie in Teilchenbeschleunigern beobachtet. Dürr glaubt fest daran, daß die Bohmsche Interpretation die einzig richtige ist: „Sie können jede Frage an die Theorie stellen und kriegen auf jede Frage eine Antwort.“ Den Bohmschen Bahnen sei Dank – alle *Mysterien* der Quantenwelt lösen sich in realer, wenn auch etwas skurriler Teilchenbahnen auf.

Obwohl es keine gültigen Beweise gegen Bohms Theorie gibt, galt sie lange als geradezu unerhört. Als auf einem Kongreß in den achtziger Jahren zum erstenmal die im Computer berechneten Bohmschen Teilchenbahnen des Doppelspaltexperiments öffentlich gezeigt wurden, sprang der Italiener Franco Selleri spontan auf und rief: „Dies ist die Hardcorepornographie der Quantenmechanik.“ Bei allem philosophischen Reiz einer Rückkehr zur Idee lokalisierter Teilchen – so etwas durfte es einfach nicht geben, schon gar nicht für die Verfechter der Kopenhagener Interpretation.

Die aber sei eine Theorie, die „nichts erklärt“, findet Detlef Dürr.



Nach der Bohmschen Theorie laufen die Elektronen hinter einem Doppelspalt (schwarz) auf

LESERBRIEFE



menhang denn sonst, wenn nicht mit der Gedenkveranstaltung in Auschwitz, hätte der Skandal erwähnt werden sollen? Wenn die Rechtsextremisten bekämpft werden sollen, muß man sie in aller Öffentlichkeit bei den Hörnern packen und den Ungeist ihrer Ideologie klar benennen.

Karl-Ludwig Keller, Bonn

Umgehen

WISSENSCHAFT Zu „Quanten-Pornographie“ von Björn Schwentker (23. Januar):

Ich bin mit dem Wissenschaftsteil der F.A.Z. und der F.A.S. sehr zu-

frieden. Dieser Artikel macht da eine Ausnahme. Er bläst ein marginales Verständnisproblem einiger Mathematiker oder Mathematischer Physiker zu einem Problem der Quantenphysik auf. Werner Heisenberg, der Entdecker der Quantenmechanik, hat 1925 zwei Prinzipien der Physik eingeführt: 1. Nur beobachtbare Dinge sind Gegenstand der Physik. 2. Unschärferelation: Ort und Impuls eines Teilchens sind nicht gleichzeitig beobachtbar. Damit sind die im Artikel abgebildeten Bahnen physikalisch sinnlos. Wenn ein Mathematiker oder Herr David Bohm meint, hier die Unschärferelation umgehen zu können, ist das vielleicht für ihn lohnend, für die Physik aber irrelevant.

Prof. Dr. Konrad Kleinknecht, Institut für Physik an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vo

Feur
Mon
Janu
Dan
gen
mit
statt
hat,
liste
uner
sche
sie ;
prof
Mar

Leser
mein
Main.
litikø
Um r
licher
zwun
fe so
wir si

Inhalt

- Historische Vorbemerkung
- Nichtrelativistische de Broglie-Bohm Theorie
- Relativistische Verallgemeinerungen
- Feldtheoretische Verallgemeinerungen
- Zusammenfassung

Eine kurze Geschichte der de Broglie-Bohm Theorie

- 1927 Louis de Broglie stellt “pilot-wave” Modell auf der 5. Solvay Konferenz vor.

Eine kurze Geschichte der de Broglie-Bohm Theorie

- 1927 Louis de Broglie stellt “pilot-wave” Modell auf der 5. Solvay Konferenz vor.
- 1932 J. von Neumann (*Mathematische Methoden der Quantentheorie*) gibt einen Beweis über die Unmöglichkeit von Theorien verborgener Variablen.
- 1952 D. Bohm, *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables* Phys.Rev., **85**, 166(I) und 180(II)

Anekdotisches zur Rezeption der Bohmschen Mechanik

“Dieser schreibt mir Briefe wie ein Sektenpfaff, um mich zu bekehren – und zwar zur alten, von ihm aufgewärmten *theorie de l’onde pilote* von de Broglie (1926/27). Ich habe ihm zwar vorgeschlagen, unsere Korrespondenz vorläufig abubrechen, bis er neue Resultate zu berichten habe, das hat aber nichts geholfen, es kommen fast täglich Briefe von ihm, oft mit Strafporto (er hat offenbar einen unbewussten Wunsch, mich zu bestrafen).”

W. Pauli (an Fierz, Dezember '51)

Eine kurze Geschichte der de Broglie-Bohm Theorie

- 1927 Louis de Broglie stellt “pilot-wave” Modell auf der 5. Solvay Konferenz vor.
- 1932 J. von Neumann (*Mathematische Methoden der Quantentheorie*) gibt einen Beweis über die Unmöglichkeit von Theorien verborgener Variablen.
- 1952 D. Bohm, *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables* Phys.Rev., **85**, 166(I) und 180(II)
- \approx 1960- J.S. Bell gehört zu den wenigen einflussreichen Verfechtern der Bohm Theorie

Eine kurze Geschichte der de Broglie-Bohm Theorie

- 1927 Louis de Broglie stellt “pilot-wave” Modell auf der 5. Solvay Konferenz vor.
- 1932 J. von Neumann (*Mathematische Methoden der Quantentheorie*) gibt einen Beweis über die Unmöglichkeit von Theorien verborgener Variablen.
- 1952 D. Bohm, *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables* Phys.Rev., **85**, 166(I) und 180(II)
- ≈ 1960- J.S. Bell gehört zu den wenigen einflussreichen Verfechtern der Bohm Theorie
- ≈ 1990- Wiedererwachendes Interesse an der Bohm Theorie (D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, A. Valentini, J. Cushing, G. Grübl, ...) → Schulenburg



Die vielen Namen der de Broglie-Bohm Theorie

- Führungsfeldtheorie (de Broglie, Bell)
- Theorie verborgener Variablen (Bohm '52)
- Kausale Interpretation der QM (Bohm \approx 1953-)
- Ontologische Interpretation der QM (Bohm \approx 1980-)
- Bohmsche Mechanik (Dürr, Goldstein, Zanghi)
- Bell Mechanik (Hileys Vorschlag für die Theorie, die DGZ "Bohmsche Mechanik" nennen)
- de Broglie-Bohm Theorie, de Broglie-Bohm pilot-wave theory,...

Streitfragen: Status der Wellenfunktion, des "Quantenpotentials", ...

Definition der de Broglie-Bohm Theorie

Die de Broglie-Bohm Theorie beschreibt ein System durch die Wellenfunktion $\psi(q_1, \dots)$ und die Konfiguration im Ortsraum $Q = (Q_1, \dots)$.

Definition der de Broglie-Bohm Theorie

Die de Broglie-Bohm Theorie beschreibt ein System durch die Wellenfunktion $\psi(q_1, \dots)$ und die Konfiguration im Ortsraum $Q = (Q_1, \dots)$.

1. Schrödingergleichung

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \mathcal{H}\psi$$

Definition der de Broglie-Bohm Theorie

Die de Broglie-Bohm Theorie beschreibt ein System durch die **Wellenfunktion** $\psi(q_1, \dots)$ und die **Konfiguration im Ortsraum** $Q = (Q_1, \dots)$.

1. Schrödingergleichung

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \mathcal{H}\psi$$

2. **Führungsgleichung** (mit $\nabla_k = \partial/\partial q_k$ und $\psi(q, t) = R(q, t)e^{\frac{i}{\hbar}S(q, t)}$):

$$\frac{dQ_k}{dt} = \frac{\hbar}{m_k} \frac{\Im(\nabla_k \psi)}{\psi} = \frac{\nabla_k S}{m_k}$$

Definition der de Broglie-Bohm Theorie

Die de Broglie-Bohm Theorie beschreibt ein System durch die **Wellenfunktion** $\psi(q_1, \dots)$ und die **Konfiguration im Ortsraum** $Q = (Q_1, \dots)$.

1. Schrödingergleichung

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \mathcal{H}\psi$$

2. **Führungsgleichung** (mit $\nabla_k = \partial/\partial q_k$ und $\psi(q, t) = R(q, t)e^{\frac{i}{\hbar}S(q, t)}$):

$$\frac{dQ_k}{dt} = \frac{\hbar}{m_k} \frac{\Im(\nabla_k \psi)}{\psi} = \frac{\nabla_k S}{m_k}$$

3. **Quantengewichtsbedingung**: Die Ortsverteilung ρ von durch ψ beschriebenen Systemen lautet:

$$\rho = |\psi|^2$$

Motivation der “Führungsgleichung”

Klassisch: Zusammenhang zwischen **Strom** (j), **Dichte** (ρ) und **Geschwindigkeit** ($v = dx/dt$):

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{j}{\rho} \quad (1)$$

Motivation der “Führungsgleichung”

Klassisch: Zusammenhang zwischen **Strom** (j), **Dichte** (ρ) und **Geschwindigkeit** ($v = dx/dt$):

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{j}{\rho} \quad (2)$$

Quantenmechanisch:

$$\rho = |\psi|^2 \quad \text{Wahrscheinlichkeitsdichte}$$

$$j = \frac{\hbar}{2mi} [\psi^*(\nabla\psi) - (\nabla\psi^*)\psi] \quad \text{Wahrscheinlichkeitsstrom}$$

$$\psi = Re^{iS/\hbar} \quad \text{Wellenfunktion in Polardarstellung}$$

Motivation der “Führungsgleichung”

Klassisch: Zusammenhang zwischen **Strom** (j), **Dichte** (ρ) und **Geschwindigkeit** ($v = dx/dt$):

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{j}{\rho} \quad (3)$$

Quantenmechanisch:

$$\rho = |\psi|^2 \quad \text{Wahrscheinlichkeitsdichte}$$

$$j = \frac{\hbar}{2mi} [\psi^*(\nabla\psi) - (\nabla\psi^*)\psi] \quad \text{Wahrscheinlichkeitsstrom}$$

$$\psi = Re^{iS/\hbar} \quad \text{Wellenfunktion in Polardarstellung}$$

Einsetzen in Gl.(3) liefert:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\nabla S}{m} \quad \text{“Führungsgleichung” der de Broglie-Bohm Theorie}$$

Führungsgleichung für Teilchen mit Spin

Um Teilchen mit Spin zu beschreiben, muss lediglich der Strom modifiziert werden

$$\mathbf{j} = \sum_a \left(\frac{\hbar}{2mi} (\psi_a^* \nabla \psi_a - \psi_a \nabla \psi_a^*) - \frac{e}{mc} \mathbf{A} \psi_a^* \psi_a \right)$$

Die Führungsgleichung lautet entsprechend:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{j}{\rho}$$

Motivation der Quantengleichgewichtsbedingung

Motivation der Quantengleichgewichtsbedingung

Die Begründung der Quantengleichgewichtsbedingung ist ein subtiler Punkt der de Broglie-Bohm Theorie.

Motivation der Quantengleichgewichtsbedingung

Die Begründung der Quantengleichgewichtsbedingung ist ein subtiler Punkt der de Broglie-Bohm Theorie.

- **Allerdings:** Die Kontinuitätsgleichung stellt sicher, dass ein System quantengleichverteilt **bleibt**, wenn es einmal quantengleichverteilt **war** (\rightarrow identische Vorhersagen wie QM).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho v = 0 \quad (4)$$

Motivation der Quantengleichgewichtsbedingung

Die Begründung der Quantengleichgewichtsbedingung ist ein subtiler Punkt der de Broglie-Bohm Theorie.

- **Allerdings:** Die Kontinuitätsgleichung stellt sicher, dass ein System quantengleichverteilt **bleibt**, wenn es einmal quantengleichverteilt **war** (\rightarrow identische Vorhersagen wie QM).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho v = 0 \quad (5)$$

- Valentini: dynamische Erklärung der Quantengleichgewichtsbedingung (Phys. Lett. A 156, No.1-2, (1991) 5. und A 158, No.1-2, (1991) 1.)
- Dürr et al.: “typicality” Argument (J. of Stat. Phys., **67** (1992) 843)

Das Quantenpotential

Das Quantenpotential

Die Phase der Wellenfunktion S erfüllt eine “Hamilton-Jacobi-artige” Gleichung:

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V \underbrace{\frac{h^2 \nabla^2 R}{2mR}}_{=U}$$
$$\Rightarrow m \cdot \frac{d^2 Q}{dt^2} = -\nabla(V + U) \quad \text{falls: } v = \frac{\nabla S}{m}$$

Das Quantenpotential

Die Phase der Wellenfunktion S erfüllt eine “Hamilton-Jacobi-artige” Gleichung:

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V \underbrace{\frac{\hbar^2 \nabla^2 R}{2mR}}_{=U}$$
$$\Rightarrow m \cdot \frac{d^2 Q}{dt^2} = -\nabla(V + U) \quad \text{falls: } v = \frac{\nabla S}{m}$$

Einige Autoren (Bohm, Hiley, Holland, ...) sehen im Quantenpotential U die ganze Neuartigkeit der de Broglie-Bohm Theorie ausgedrückt. (→ “aktive” Information, “eingefaltete” Ordnung, ...)

Das Quantenpotential

Die Phase der Wellenfunktion S erfüllt eine “Hamilton-Jacobi-artige” Gleichung:

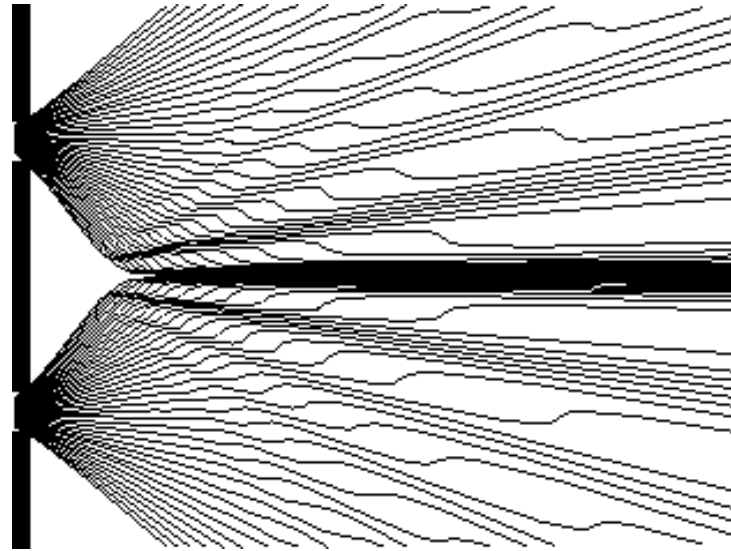
$$-\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V \underbrace{\frac{\hbar^2 \nabla^2 R}{2mR}}_{=U}$$
$$\Rightarrow m \cdot \frac{d^2 Q}{dt^2} = -\nabla(V + U) \quad \text{falls:} \quad v = \frac{\nabla S}{m}$$

Einige Autoren (Bohm, Hiley, Holland, ...) sehen im Quantenpotential U die ganze Neuartigkeit der de Broglie-Bohm Theorie ausgedrückt. (→ “aktive” Information, “eingefaltete” Ordnung, ...)

Diese “klassische” Formulierung ist jedoch irreführend. In der de Broglie-Bohm Theorie sind Ort und Geschwindigkeit nicht unabhängig. Die echte Neuartigkeit der de Broglie-Bohm Theorie wird dadurch eher verschleiert.

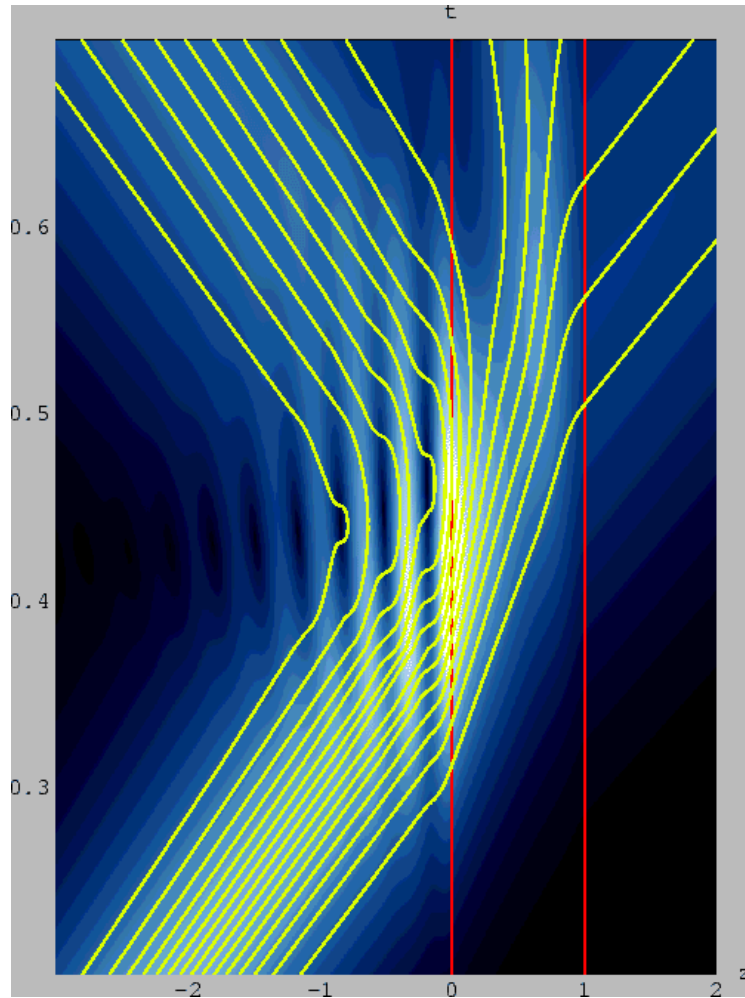
Wie sehen die Teilchen-Bahnen eigentlich aus?

C. Philippidis, C. Dewdney and
B. J. Hiley, *Quantum Interference
and the Quantum Potential*, II
Nuovo Cimento 52B (1979) 15.



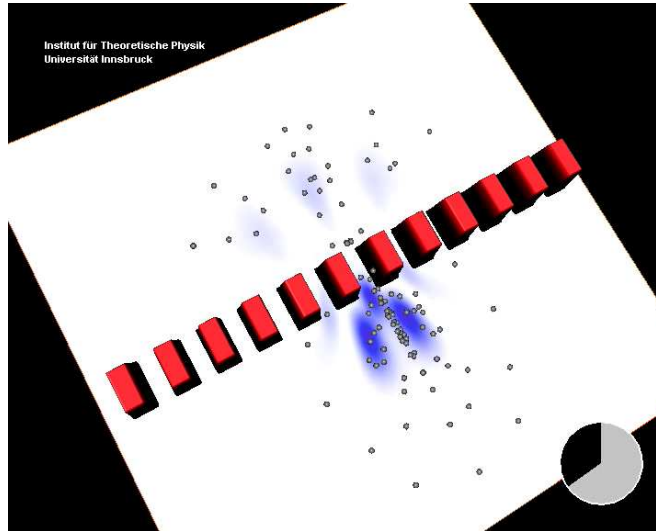
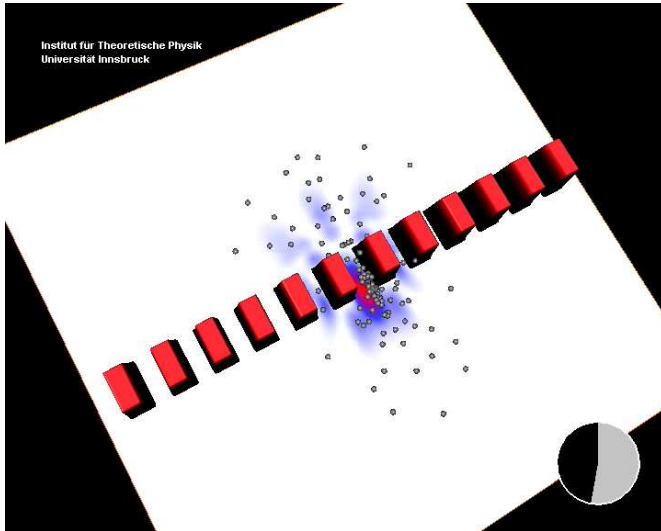
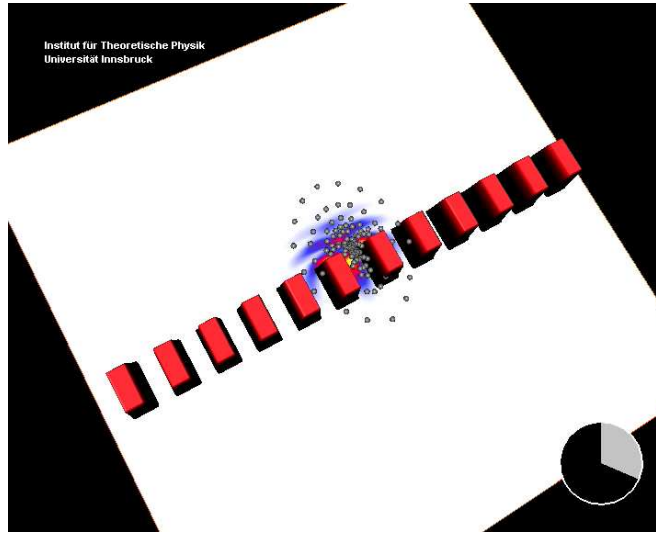
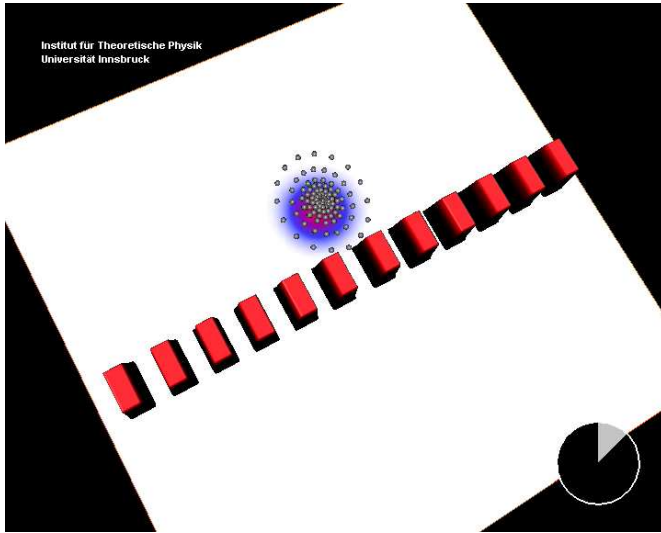
- Die Bahnen sind vollkommen unklassisch!
- Die Aussage, dass angesichts der Interferenz am Doppelspalt unmöglich das Teilchenbild aufrechterhalten werden kann, ist schlichtweg falsch!

Trajektorien beim Tunneleffekt



Bahnen beim 1-dim Tunneleffekt
(Die ersten Bahnen durchdringen die
Barriere. Ihre Geschwindigkeit ist her-
abgesetzt.)

Beugung am Gitter



Mit freundlicher Genehmigung von Sabine Kreidl (Uni Innsbruck)

Merkmale der de Broglie-Bohm Theorie (alphabetische Reihenfolge)

Merkmale der de Broglie-Bohm Theorie (alphabetische Reihenfolge)

- Determinismus

- Die Zeitentwicklung jedes Systems ist durch ψ und die Anfangsorte vollständig festgelegt.
- Aufgrund von Quantengleichgewichtsbedingung bleibt eine “epistemische” Unbestimmtheit bestehen (identischer deskriptiver Gehalt wie die übliche QM)

Merkmale der de Broglie-Bohm Theorie (alphabetische Reihenfolge)

- **Determinismus**

- Die Zeitentwicklung jedes Systems ist durch ψ und die Anfangsorte vollständig festgelegt.
- Aufgrund von Quantengleichgewichtsbedingung bleibt eine “epistemische” Unbestimmtheit bestehen (identischer deskriptiver Gehalt wie die übliche QM)

- **“Komplementarität” überflüssig**

Ein z.B. Elektron hat Wellen **und** Teilcheneigenschaften, da es durch eine “Welle” (ψ) **und** eine Teilchenkoordinate beschrieben wird.

Merkmale der de Broglie-Bohm Theorie (alphabetische Reihenfolge)

- **Determinismus**

- Die Zeitentwicklung jedes Systems ist durch ψ und die Anfangsorte vollständig festgelegt.
- Aufgrund von Quantengleichgewichtsbedingung bleibt eine “epistemische” Unbestimmtheit bestehen (identischer deskriptiver Gehalt wie die übliche QM)

- **“Komplementarität” überflüssig**

Ein z.B. Elektron hat Wellen **und** Teilcheneigenschaften, da es durch eine “Welle” (ψ) **und** eine Teilchenkoordinate beschrieben wird.

- **Messung**

Messungen können wie gewöhnliche Wechselwirkungen behandelt werden.

Merkmale der de Broglie-Bohm Theorie (alphabetische Reihenfolge)

- **Determinismus**

- Die Zeitentwicklung jedes Systems ist durch ψ und die Anfangsorte vollständig festgelegt.
- Aufgrund von Quantengleichgewichtsbedingung bleibt eine “epistemische” Unbestimmtheit bestehen (identischer deskriptiver Gehalt wie die übliche QM)

- **“Komplementarität” überflüssig**

Ein z.B. Elektron hat Wellen **und** Teilcheneigenschaften, da es durch eine “Welle” (ψ) **und** eine Teilchenkoordinate beschrieben wird.

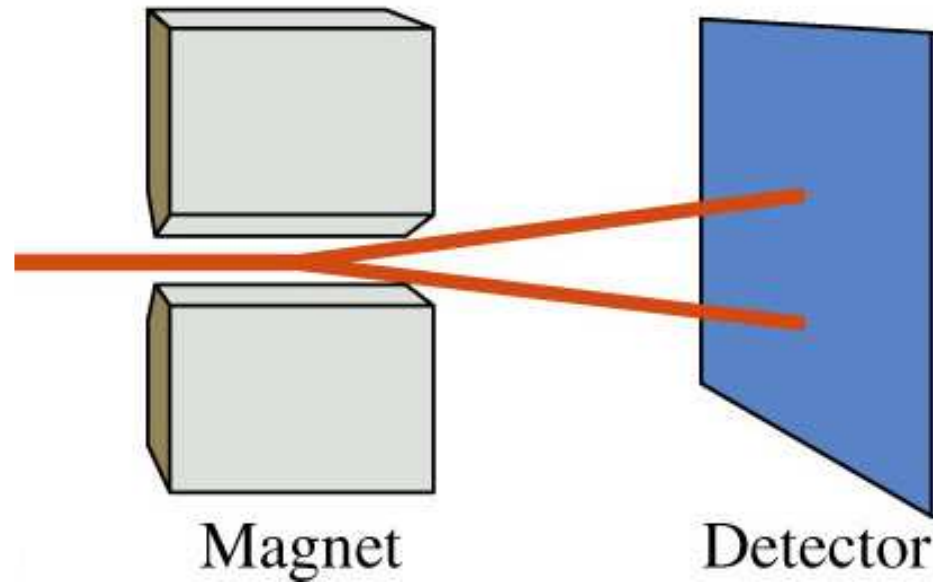
- **Messung**

Messungen können wie gewöhnliche Wechselwirkungen behandelt werden.

- **Nichtlokalität**

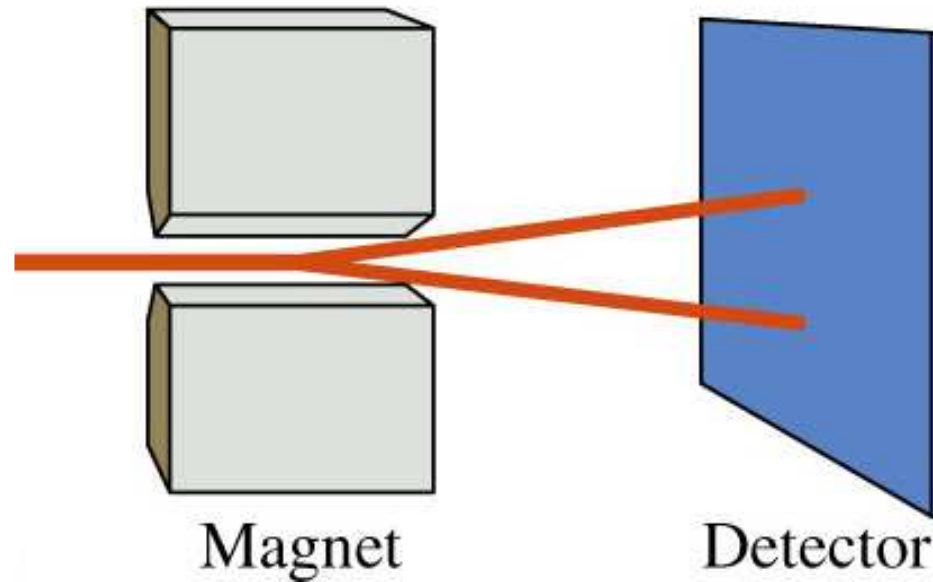
Die Führungsgleichung koppelt i.allg. die Bewegung jedes Teilchens an die Orte aller anderen Teilchen. Sie faktorisiert jedoch, falls das Mehrteilchensystem nicht verschränkt ist.

Wie die de Broglie-Bohm Theorie das Messproblem löst



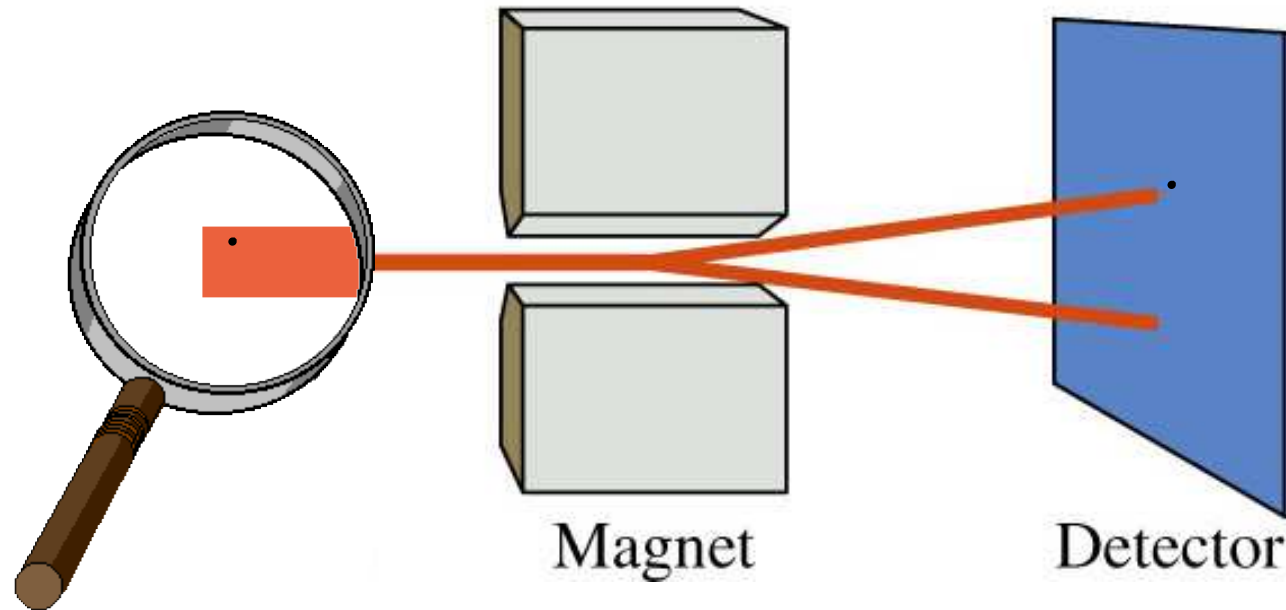
$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \text{ und } |\downarrow\rangle)$$

Wie die de Broglie-Bohm Theorie das Messproblem löst



$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \text{ und } |\downarrow\rangle) \xrightarrow{\text{Messung}} |\uparrow\rangle \text{ oder } |\downarrow\rangle$$

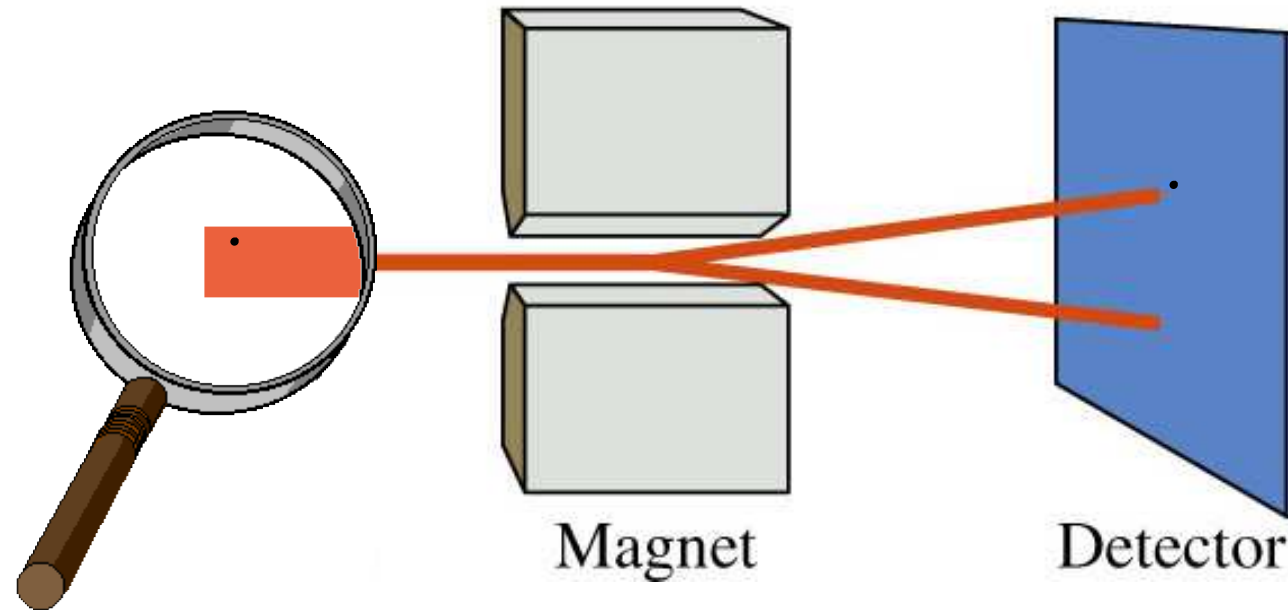
Wie die de Broglie-Bohm Theorie das Messproblem löst



$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \text{ und } |\downarrow\rangle) \xrightarrow{\text{Messung}} |\uparrow\rangle \text{ oder } |\downarrow\rangle$$

Bohm: $Q_i \rightarrow$ oberer oder unterer Zweig, "effektiver Kollaps"

Wie die de Broglie-Bohm Theorie das Messproblem löst



$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \text{ und } |\downarrow\rangle) \xrightarrow{\text{Messung}} |\uparrow\rangle \text{ oder } |\downarrow\rangle$$

Bohm: $Q_i \rightarrow$ oberer oder unterer Zweig, "effektiver Kollaps"

Nebenbemerkung: Der Anfangsort des Teilchens entscheidet über den Ausgang einer "Spinmessung" (\rightarrow Kontextualität)

Kritik an der de Broglie-Bohm Theorie

Der de Broglie-Bohm Theorie wird vorgeworfen, dass ...

- sie keine neuen Vorhersagen trifft (“Metaphysik”).
- sie den Ortsraum auszeichnet (“Asymmetrie”).
- sie nichtlokal ist.
- ihre Führungsgleichung nicht eindeutig bestimmt ist.
- ihre relativistische und quantenfeldtheoretische Verallgemeinerung unmöglich ist.
- ...

Was bedeutet es, eine Theorie zu verallgemeinern?

Was bedeutet es, eine Theorie zu verallgemeinern?

Die Dirac-Theorie verallgemeinert die Schrödingersche Theorie.

Was bedeutet es, eine Theorie zu verallgemeinern?

Die Dirac-Theorie verallgemeinert die Schrödingersche Theorie.

Die nichtrelativistische Quantenmechanik verallgemeinert die Newtonschen Mechanik.

Was bedeutet es, eine Theorie zu verallgemeinern?

Die Dirac-Theorie verallgemeinert die Schrödingersche Theorie.

Die nichtrelativistische Quantenmechanik verallgemeinert die Newtonschen Mechanik.

“B verallgemeinert A” = In einem **geeigneten** Limes kann A aus B zurückgewonnen werden.

Was bedeutet es, eine Theorie zu verallgemeinern?

Die Dirac-Theorie verallgemeinert die Schrödingersche Theorie.

Die nichtrelativistische Quantenmechanik verallgemeinert die Newtonschen Mechanik.

“B verallgemeinert A” = In einem **geeigneten** Limes kann A aus B zurückgewonnen werden.

Aber: Was ist der “geeignete Limes” und müssen alle Terme der jeweiligen Theorien in einer solchen Limesbeziehung stehen? Asymptotische Limites (Berry)? Emergenz? Reduktion? Supervenienz?

Was ist eine Bohm-artige Theorie?

Forderungen an eine relativistische und quantenfeldtheoretische Verallgemeinerung der de Broglie-Bohm Theorie:

Was ist eine Bohm-artige Theorie?

Forderungen an eine relativistische und quantenfeldtheoretische Verallgemeinerung der de Broglie-Bohm Theorie:

1. Die Vorhersagen der relativistischen QM/QFT werden reproduziert.

Was ist eine Bohm-artige Theorie?

Forderungen an eine relativistische und quantenfeldtheoretische Verallgemeinerung der de Broglie-Bohm Theorie:

1. Die Vorhersagen der relativistischen QM/QFT werden reproduziert.
2. Im nichtrelativistischen Limes wird die de Broglie-Bohm Theorie zurückgewonnen.

Was ist eine Bohm-artige Theorie?

Forderungen an eine relativistische und quantenfeldtheoretische Verallgemeinerung der de Broglie-Bohm Theorie:

1. Die Vorhersagen der relativistischen QM/QFT werden reproduziert.
2. Im nichtrelativistischen Limes wird die de Broglie-Bohm Theorie zurückgewonnen.
3. Sie besitzt **Teilchenbahnen**.
4. Sie ist **deterministisch**.
5. ...

Was ist eine Bohm-artige Theorie?

In particular we will exclude the notion of “observable” in favour of that of “beable”. The beables of the theory are those elements which might correspond to elements of reality, to things which exist. [...] Indeed observation and observers must be made out of beables.

J. S. Bell, *Beables for Quantum Field Theory*, 1984

Die Bohm-Dirac Theorie

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad \text{Diracgleichung}$$

$$\frac{\partial \psi^\dagger \psi}{\partial t} + \sum_k \nabla_k \underbrace{(\psi^\dagger \alpha_k \psi)}_{\text{timelike}} = 0 \quad \text{Kontinuitätsgleichung}$$

Die Bohm-Dirac Theorie

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad \text{Diracgleichung}$$

$$\frac{\partial \psi^\dagger \psi}{\partial t} + \sum_k \nabla_k (\underbrace{\psi^\dagger \alpha_k \psi}_{\text{timelike}}) = 0 \quad \text{Kontinuitätsgleichung}$$

(Bohm, 1953)

$$\frac{dQ_k}{dt} = \frac{\psi^\dagger \alpha_k \psi}{\psi^\dagger \psi} \quad \text{mit: } \alpha_k^i = 1 \otimes \dots \otimes \alpha^i \otimes \dots \otimes 1 \quad \text{und: } \alpha^i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_i \\ \sigma_i & 0 \end{pmatrix}$$

Die Bohm-Dirac Theorie

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad \text{Diracgleichung}$$

$$\frac{\partial \psi^\dagger \psi}{\partial t} + \sum_k \nabla_k (\underbrace{\psi^\dagger \alpha_k \psi}_{\text{timelike}}) = 0 \quad \text{Kontinuitätsgleichung}$$

(Bohm, 1953)

$$\frac{dQ_k}{dt} = \frac{\psi^\dagger \alpha_k \psi}{\psi^\dagger \psi} \quad \text{mit: } \alpha_k^i = 1 \otimes \dots \otimes \alpha^i \otimes \dots \otimes 1 \quad \text{und: } \alpha^i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_i \\ \sigma_i & 0 \end{pmatrix}$$

Es gilt $\rho = \psi^\dagger \psi > 0$, aber die Führungsgleichung ist (für $N > 1$) **nicht** kovariant. Das Bezugssystem ist ausgezeichnet, indem die $\rho = \psi^\dagger \psi$ Verteilung vorliegt.

In diesem Bezugssystem können alle Vorhersagen der Theorie reproduziert werden. Weil die Vorhersagen **invariant** unter Lorentztransformationen sind, ist dieses bevorzugte System ohne beobachtbaren Effekt (“Vorhersagen der Theorie sind Lorentzinvariant”).

Die Bohm-Dirac Theorie II

Bohm and Hiley, Holland and Valentini betrachten Lorentzinvarianz als keine fundamentale Symmetrie.

Allerdings: Berndl, Dürr, et al. [Phys.Rev.A 53 2062 \(1996\)](#) und [Phys.Rev.A 60, 2729. \(1999\)](#) geben **lorentzinvariante** Modelle an, indem sie “zusätzliche Struktur” einführen.

Merkmale der Bohm-Dirac Theorie:

- Die Teilchen-Ontologie wird aufrecht erhalten (“Teilchen als beable”)
- Nachteil: das Konzept des Dirac Sees kann nicht auf andere Wechselwirkungen ausgedehnt werden...

Feldtheoretische Verallgemeinerungen

Ausgangspunkt: Feldtheorie mit Hilfe des **Wellenfunktionals**

Konfigurationsraum: $Q = (\psi^k(x), A_\nu^l(x), \dots)$ (k, l indiziert Fermionen und Eichfelder)

Schrödingergleichung wird zur **Funktionalgleichung** für $\Psi(\psi^k(x), A_\nu^l(x), \dots)$

Für das Wellenfunktional lässt sich ein Wahrscheinlichkeitsfluss und ein Geschwindigkeitsfunktional angeben: $V^\Psi = J^\Psi / \Psi^* \Psi$ angeben.

Die Führungsgleichungen beschreiben die Evolution der Feldkonfigurationen:

$$\partial_t \psi^k(x) = \left(V_{\psi^k}^\Psi(\psi^k, A_\nu^l, \dots) \right) (x)$$

$$\partial_t A_\nu^l(x) = \left(V_{A_\nu^l}^\Psi(\psi^k, A_\nu^l, \dots) \right) (x)$$

⋮

Feldtheoretische Verallgemeinerungen II

Bsp. Quantisierung des **Klein-Gordon Feldes**:

Funktional auf dem Raum der Feldkonfigurationen: $\Psi(\dots, \phi(\mathbf{x}, t), \dots)$

$$i\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \int d^3x \left(-\frac{\delta^2}{\delta\phi^2} + (\nabla\phi)^2 \right) \Psi. \quad (6)$$

Führungsgleichung für $\phi(\mathbf{x}, t)$ (S Phase des Funktionals):

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{\delta S}{\delta\phi} \quad (7)$$

Beachte: Die “Beable” dieser Theorie sind Felder (und keine Teilchen). Auch im nicht-relativistischen Limes wird diese “Feld-Ontologie” zu keiner “Teilchen-Ontologie” ...

Feldtheoretische Verallgemeinerungen III

Es existiert kein überzeugendes Modell für fermionische QFT mit “field-beables” (Valentini, PhD thesis 1992, Trieste → Struyve, PhD thesis 2004, Gent) und Probleme “particle-beables” für bosonische Felder anzugeben.

3 Möglichkeiten:

- Fermionen “sind” Teilchen, Bosonen “sind” Felder
- Bell-type QFT, stochastischer Prozess zur Teilchenerzeugung (→ Dürr et al. quant-ph0208072, 0303156, 0407116)
- Beable-Status für Bosonische Felder und **keinen** beable-Status für Fermionen (→ Struyve und Westman)

Struyve und Westman Modell

Ausgangspunkt:

- Für Fermionen existiert keine bohmartige-Theorie mit Feldern als beable
- Aber alle fermionischen Felder des Standardmodells koppeln an bosonische Eichfelder
- Das Bsp. “Spin” zeigt, dass ein Merkmal auch dann beschrieben werden kann, wenn man ihm keinen “beable-Status” einräumt.

Idee:

Nur (Feld-)beable für die bosonischen Freiheitsgrade einführen!

Struyve und Westman, *A new pilot-wave model for quantum field theory*,
quant-ph/0602229

Struyve und Westman Modell

Beispiel: QED, Standard Formulierung: $H = H_B + H_F + H_I + V_C$

H_B = freier Hamiltonian des EM Feldes

H_F = freier Hamiltonian des Dirac Feldes

H_I = Wechselwirkungsteil

V_C = Coloumb-potential

Der QED Hilbertraum: $\mathcal{B}(H_B \otimes H_F)$

Struyve und Westman wählen eine spezielle Darstellung für die bosonischen Feldoperatoren und bilden die Spur über die fermionischen Freiheitsgrade.

(Detail: Nur für die transversalen Freiheitsgrade des Vektorpotentials werden beable eingeführt)

Zusammenfassung

- Die de Broglie-Bohm Theorie erlaubt eine beobachtbarunabhängige und deterministische Beschreibung der Quantenphänomene.
- Sie bedeutet eine dramatische Umdeutung des quantenmechanischen Observablenkonzeptes.
- Die Teilchen der de Broglie-Bohm Theorie sind jedoch auch nicht “klassisch” ...
- Das Studium der de Broglie-Bohm Theorie schärft den Blick auf die Quantenmechanik und ihre Grundlagenprobleme.
- Für ihre relativistische und feldtheoretische Verallgemeinerung gibt es zahlreiche Ansätze.

Kann experimentell zwischen QM und BM unterschieden werden?

Die Quantengleichgewichtsbedingung stellt sicher, dass alle Vorhersagen der QM reproduziert werden. Unterschiede können sich nur ergeben, wenn...

- die Quantengleichgewichtsbedingung nicht gilt (bzw. nicht schon immer galt) → A. Valentini, “Universal Signature of Non-Quantum Systems” [quant-ph/0309107](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0309107)
- man Phänomene betrachtet, die innerhalb der QM nicht (befriedigend) beschrieben werden können → Tunnelzeit, “time-of-arrival” etc.pp. (J. T. Cushing, *Quantum Tunneling Times: A Crucial Test for the Causal Program?*, *Found. Phys.* **25**, 296 (1995).)

Warum de Broglie-Bohm Theorie?

- Klärung von Grundlagenfragen
- Konzeptionelle Vorteile bei folgenden Fragen:
 - “tunneling-time”, “time-of-arrival” (z.Bsp. Kreidl et.al, J.Phys.A Math. Gen. 36 (2003) 8851.)
 - Quantum Gravity (z.Bsp. Pinto-Neto, Found. Phys.35 (2005) 577.)
 - Streutheorie (z.B. Dürr et al. Physica A, Volume 279, (2000) 416.)
 - Superselection rules, topological factors (Colin et al quant-ph0509177, Dürr et al. quant-ph0601076)