

Das Messproblem der Quantenmechanik

Können 'Quantentheorien ohne Beobachter' die QM
verständlicher machen?

Mathias Kokron

I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.

– Richard Feynman

I think that conventional formulations of quantum theory [...] are unprofessionally vague and ambiguous. Professional theoretical physicists ought to be able to do better.

– Bell, *Beables for QFT*

Struktur

- ▶ Das Messproblem
- ▶ “Against measurement”
- ▶ Dekohärenz
- ▶ Die Lösungen: Quantentheorien ohne Beobachter
 - ▶ Objective collapse theories
 - ▶ Bohm'sche Mechanik
 - ▶ Many Worlds Interpretation

Leitfrage: Können Quantentheorien ohne Beobachter die QM verständlicher machen?

Notation

- ▶ Born'sche Regel: $\rho(x) = |\Psi(x)|^2$
- ▶ Ontologie = “das Seiende”, also die “objektive” Welt
- ▶ Epistemologie = “Wissen”, also unser Wissen über die Welt
- ▶ Falls nicht anders angegeben bei Bildern Quelle = Dürr & Lazarovici, *Verständliche QM*

Das Messproblem

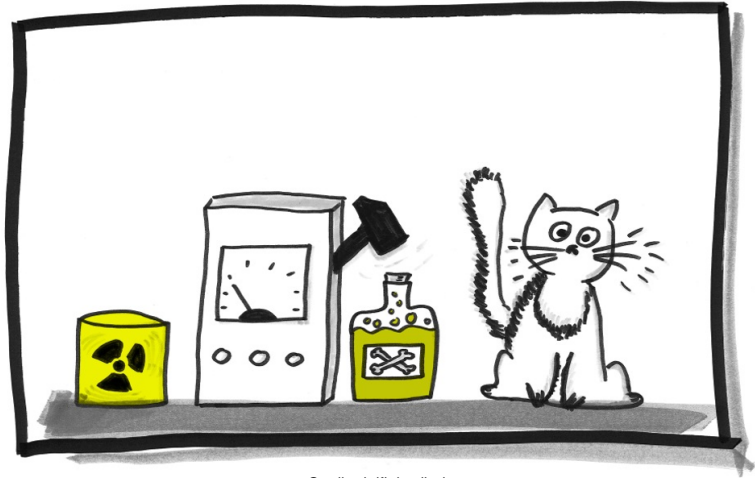
Das Messproblem

Es gibt nur eine Gleichung und eine Größe, die die Theorie definieren - die Schrödingergl. und die zugehörige Wellenfunktion -, und diese beschreiben nicht die Phänomene, wie wir sie wahrnehmen

– Dürr & Lazarovici, *Verständliche QM*

- ▶ Theorie gibt uns Wahrscheinlichkeitsverteilung, wir Messen aber Einzelereignisse
- ▶ **"Interpretation"** = Brücke zwischen Formalismus und empirischer Erfahrung
- ▶ ES IST NICHT: Wieso Messungen in der QM Systeme verändern. Dies erklärt Dekohärenz.

Schrödingers Katze



Quelle: leifiphysik.de

Schrödingers Katze

*Das Typische an solchen Fällen ist, daß eine ursprünglich **auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, [...]***

Das hindert uns, in so naiver Weise ein „verwaschenes Modell“ als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen. [...]

Es ist ein Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Photographie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden.

– Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*

Eine präzise Formulierung des Messproblems

Nach Maudlin 1995. Diese Postulate sind widersprüchlich:

- (M1) Der Zustand eines physikalischen Systems ist **vollständig** durch seine **Wellenfunktion** beschrieben.
- (M2) Die **Zeitentwicklung** der Wellenfunktion folgt stets einer **linearen** (Schrödinger-) Gleichung.
- (M3) **Messungen** liefern (normalerweise) **eindeutige Ergebnisse**.

Schrödingergl. = **UND** $\xrightarrow{?}$ Messung = **ODER**

Kopenhagen ist $\neg$ (M2): Messung = Kollaps ($|\Psi\rangle \rightarrow \hat{P}_i |\Psi\rangle$)

“Against measurement”

What exactly qualifies some physical systems to play the role of 'measurer'? Was the wavefunction of the world waiting to jump for thousands of millions of years until a singlecelled living creature appeared? Or did it have to wait a little longer, for some better qualified system . . . with a PhD?

– Bell, *Against 'measurement'*

Bell "Against 'measurement'"

John Bell, *Against 'measurement'*, 1990

*"Here are some words which, however **legitimate and necessary in application**, have **no place in a formulation** with any pretension to physical precision:*

system, apparatus, environment [...], observable [...]

*the worst of all is '**measurement**' [...]*

*it should now be **banned altogether in quantum mechanics**."*

– Bell, *Against 'measurement'*

Heisenberg cut

The first charge against 'measurement', in the fundamental axioms of quantum mechanics, is that it anchors there the shifty split of the world into 'system' and 'apparatus'.

– Bell, *Against 'measurement'*

- ▶ Wo liegt der Heisenberg cut? Messgeräte? Bewusstsein?
- ▶ **QM automatisch nicht mehr fundamental.**
 - ▶ **Alles über dem cut kann QM nicht beschreiben.**
 - ▶ Messgeräte bestehen auch aus Atomen. Diese werden durch die SGL beschrieben.
 - ▶ Falls **Bewusstsein** fundamental, dann werden wir es nie erklären können
- ▶ Sind nur Menschen bewusst?
- ▶ Kein Reduktionismus

Anthropozentrismus?

This is a horrible viewpoint.

Do you seriously entertain the thought that without observer there is no reality? Which observer? Any observer?

Is a fly an observer? Is a star an observer? Was there no reality before 10^9 B.C. before life began?

– Richard Feynman, *Feynman Lectures on Gravitation*

Bells Ansprüche

In the beginning natural philosophers tried to understand the world around them.

Trying to do that they hit upon the great idea of contriving artificially simple situations in which the number of factors involved is reduced to a minimum. Divide and conquer.

*Experimental science was born. But experiment is a tool. **The aim remains: to understand the world.***

To restrict quantum mechanics to be exclusively about piddling laboratory operations is to betray the great enterprise.

A serious formulation will not exclude the big world outside the laboratory.

– Bell, *Against 'measurement'*

Ansprüche an eine Theorie

Ziel: Universum verstehen

Gute Merkmale:

- ▶ **Fundamental** (Theory of Everything?)
- ▶ **Klare Ontologie.** Kein epistemologischer Ansatz.
- ▶ Reduktionistisch
- ▶ Klare und präzise Begriffe

=> Kopenhagener Deutung erfüllt keines. Es gibt aber Theorien die diese Erfüllen.

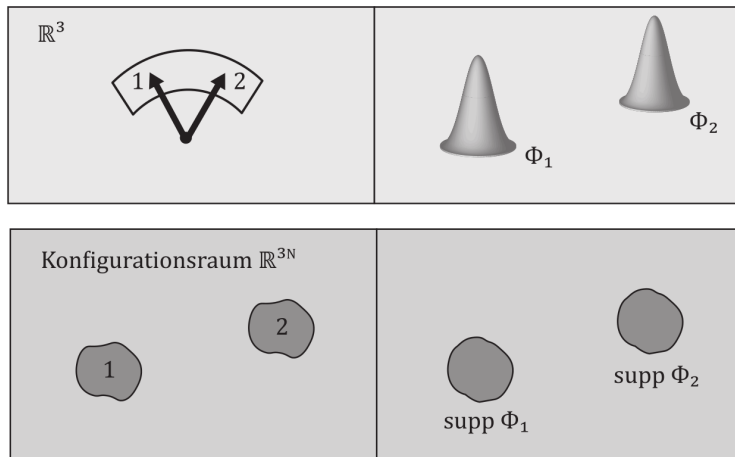
Dekohärenz

Warum kein Kollaps der Wellenfunktion in der QM benötigt wird um den Einfluss von Messungen auf ein System zu erklären

Der Konfigurationsraum

Φ_1 = Zeiger ist auf 1; Φ_2 = Zeiger ist auf 2

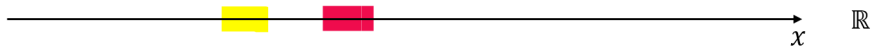
$\Phi_1 + \Phi_2$ = Superposition



Der Doppelspalt und Dekohärenz

$$t = 0$$

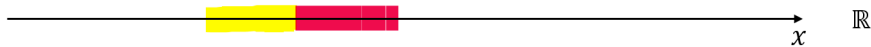
$$\varphi = \varphi_L + \varphi_R$$



Der Doppelspalt und Dekohärenz

$$t = t_1$$

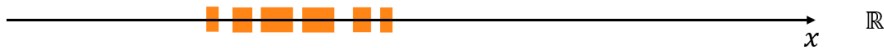
$$\varphi = \varphi_L + \varphi_R$$



Der Doppelspalt und Dekohärenz

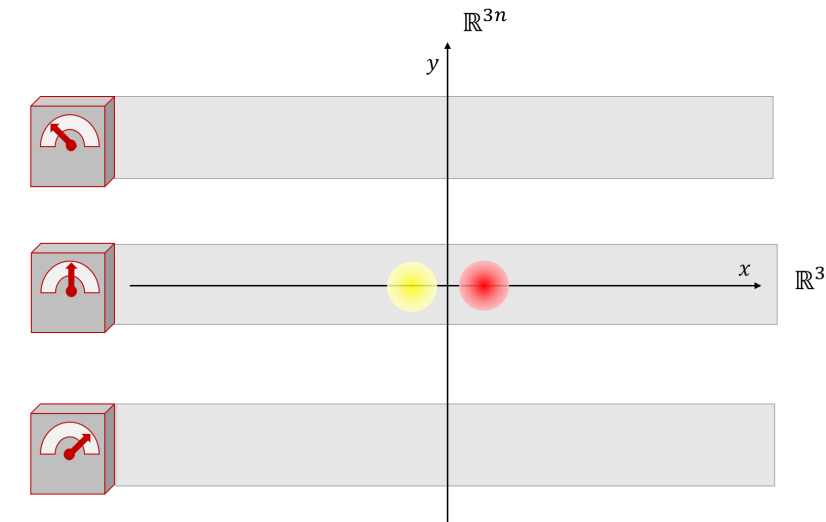
$$t = t_f$$

$$\varphi = \varphi_L + \varphi_R$$

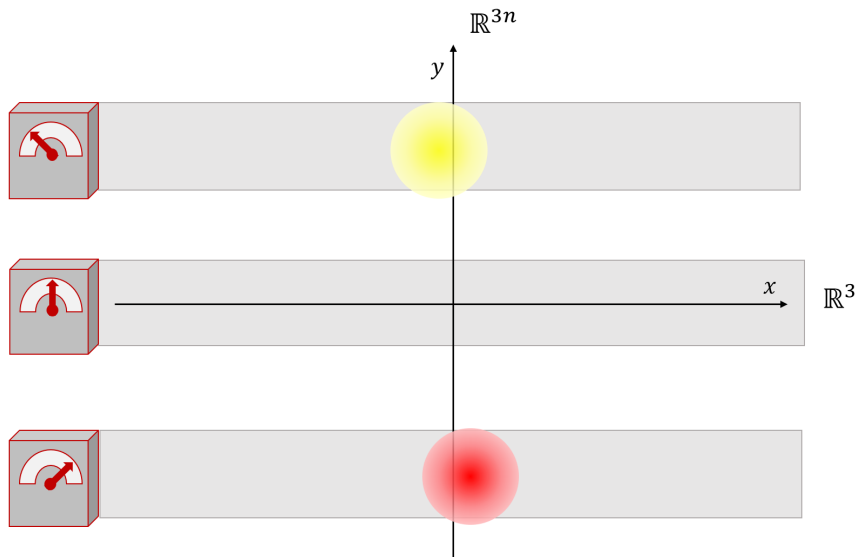


Der Doppelspalt und Dekohärenz

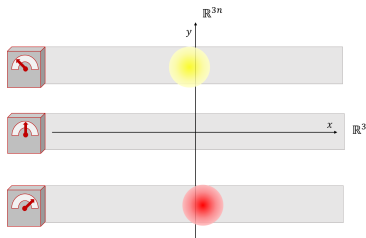
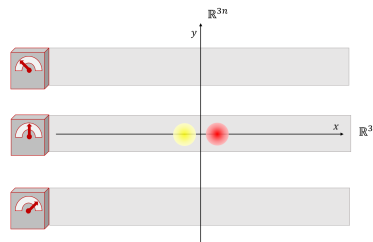
$$t = t_0 \quad \Psi(x, y) = (\varphi_L(x) + \varphi_R(x))\Phi_0(y)$$



Der Doppelspalt und Dekohärenz



Der Doppelspalt und Dekohärenz



$$\varphi_L \Phi_0 \xrightarrow{t_0 \rightarrow t_f} \varphi_L \Phi_L$$

$$\varphi_R \Phi_0 \xrightarrow{t_0 \rightarrow t_f} \varphi_R \Phi_R$$

$$(\varphi_L + \varphi_R) \Phi_0 \xrightarrow{t_0 \rightarrow t_f} \varphi_L \Phi_L + \varphi_R \Phi_R$$

$$\begin{aligned} |\Psi_{t_f}|^2 &= |\varphi_L \Phi_L + \varphi_R \Phi_R|^2 \\ &= |\varphi_L|^2 |\Phi_L|^2 + |\varphi_R|^2 |\Phi_R|^2 \\ &\quad + 2 \operatorname{Re} \varphi_L^* \Phi_L^* \varphi_R \Phi_R \end{aligned}$$

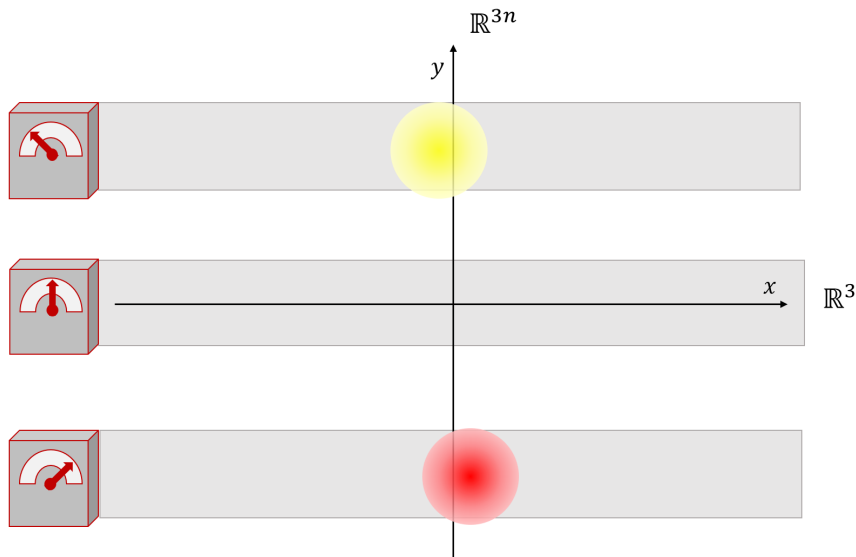
$$\approx |\varphi_L|^2 |\Phi_L|^2 + |\varphi_R|^2 |\Phi_R|^2$$

$$\text{da } \Phi_L^*(y) \Phi_R(y) \approx 0 \forall y$$

Ohne Messung ($t = t_f$):

$$|\varphi_L + \varphi_R|^2 = |\varphi_L|^2 + |\varphi_R|^2 + 2 \operatorname{Re} \varphi_L^* \varphi_R$$

Der Doppelspalt und Dekohärenz



Mythos: Dekohärenz löst das Messproblem

Kohärenz spielt bei der Formulierung des Messproblems keine Rolle!! Und

$$|\alpha\varphi_1 + \beta\varphi_2\rangle\langle\alpha\varphi_1 + \beta\varphi_2| \longrightarrow |\alpha|^2 |\varphi_1\rangle\langle\varphi_1| + |\beta|^2 |\varphi_2\rangle\langle\varphi_2|$$

Ist keine Lösung des Messproblems

Objective Collapse Theories

Ghirardi, Rimini, Weber, *"A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems"* 1985

Die Postulate

1. $\Psi(\vec{q}_1, \dots, \vec{q}_N, t)$ beschreibt mein System vollständig. Zwischen zwei Kollapsen (*flashes*) folgt Ψ der Schrödingergl.
2. Jedes Teilchen $\vec{q}_k$ hat unabhängig eine Wahrsch. für das Auftreten eines **flashes** $(T, \vec{X})_k$
3. Falls ein *flash* $(T, \vec{X})_k$ auftritt **Kollabiert Ψ** :

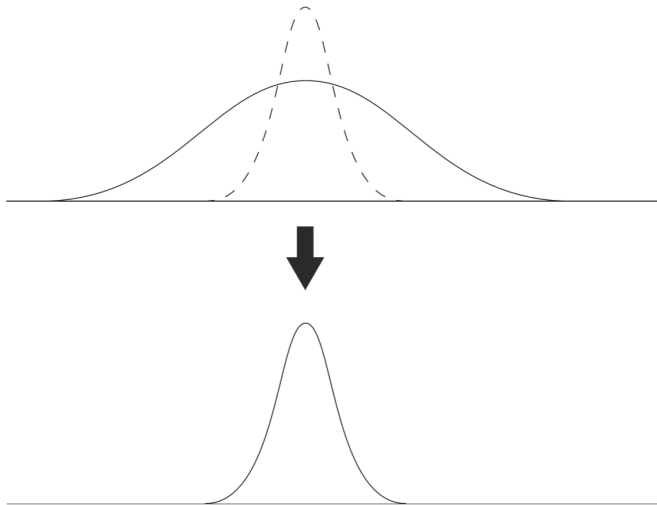
$$\Psi \longrightarrow \frac{\Psi_X^k}{\|\Psi_X^k\|}, \quad \Psi_X^k := L_X^k \Psi; \quad L_X^k := \left(\frac{1}{\pi a^2} \right)^{3/4} \exp \left[-\frac{(\vec{q}_k - \vec{X})^2}{2a^2} \right]$$

4. $a \approx 10^{-7} m$ und $\lambda \approx 10^{-16} Hz$ sind **neue Naturkonstanten**
5. T und $\vec{X}$ sind **Zufallsvariablen** gegeben durch:

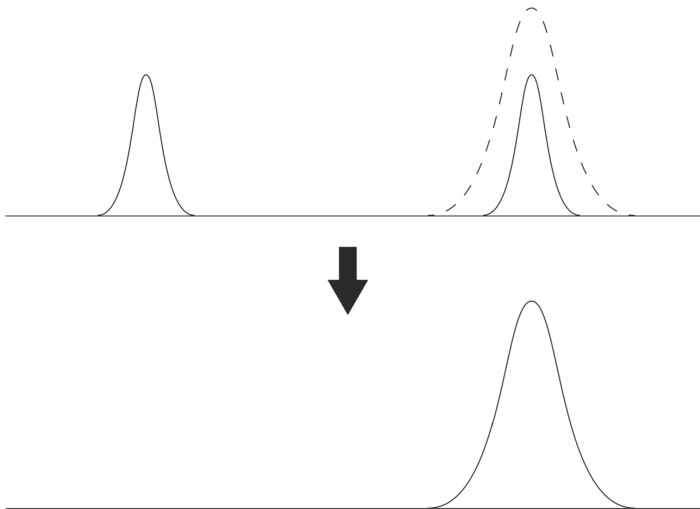
$$\mathbb{P}(T \in dt) = \lambda e^{-\lambda t} dt$$

$$\mathbb{P}(\vec{X} \in d^3\vec{x}) = \rho_k(\vec{x}); \quad \rho_k(\vec{x}) := \int_{\mathbb{R}^{3N}} d^3q_1 \dots d^3q_N |L_X^k \Psi(\vec{q}_1, \dots, \vec{q}_N, t)|^2$$

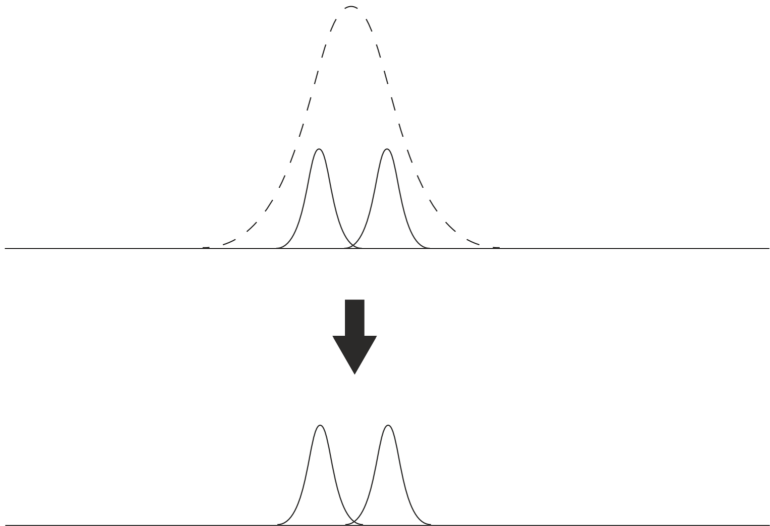
GRW Basics



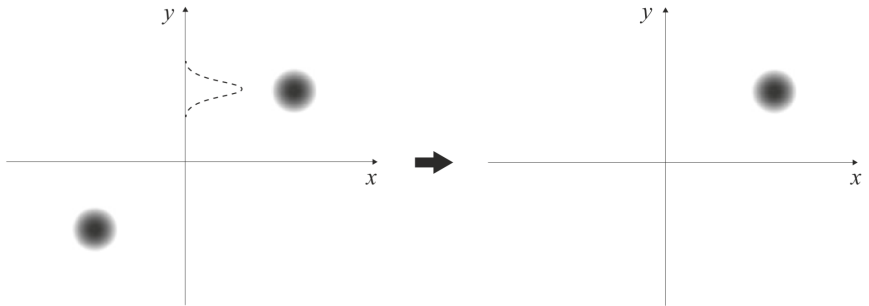
GRW Basics



GRW Basics



GRW Basics



GRW Basics

- $\lambda \approx 10^{-16} \text{ Hz}$. Für 1 Teilchen:

$$\mathbb{P}(T \in \Delta t) = \int_0^{\Delta t} \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda \Delta t}$$

$$\Rightarrow p_1 := \mathbb{P}(T \notin \Delta t) = 1 - \mathbb{P}(T \in \Delta t) = e^{-\lambda \Delta t}$$

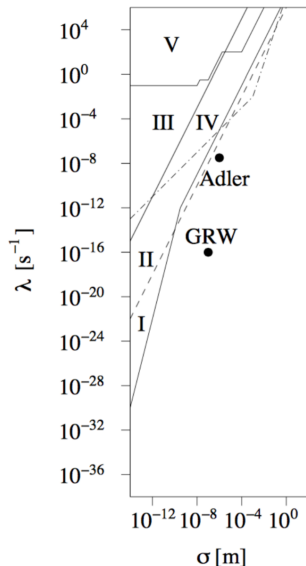
$$\tau := 1/\lambda \approx 10^{16} \text{ s} \approx A_U/10 \Rightarrow \text{kollabiert "nie"}$$

- Für $N \approx 10^{23}$ Teilchen. $p_N := \mathbb{P}(\text{kein Kollpas in } \Delta t)$

$$p_N = (\mathbb{P}(T \notin \Delta t))^N = e^{-N\lambda \Delta t}$$

$$\tilde{\lambda} := N\lambda \approx 10^7 \text{ Hz}; \quad \tilde{\tau} = 1/\tilde{\lambda} \approx 10^{-7} \text{ s} \Rightarrow \text{Katze kollabiert}$$

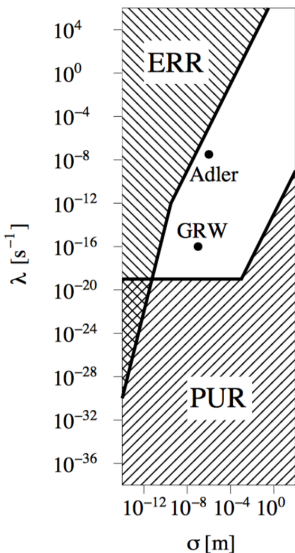
Empirische Unterscheidbarkeit



I = spontaneous x-ray emission,
 II = spontaneous warming of the
 intergalactic medium (dashed line),
 III = spontaneous warming of air,
 IV = decay of supercurrents
 (dashed-and-dotted line),
 V = diffraction experiments.

(aus Norsen, *Foundations of Quantum Mechanics*)

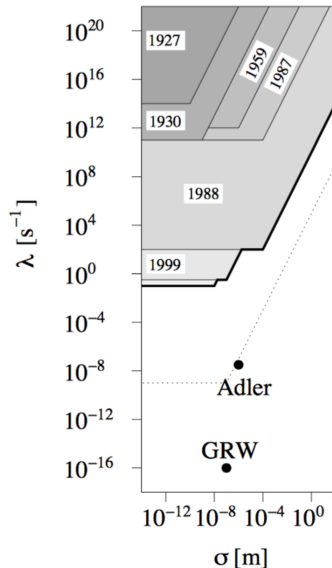
Empirische Unterscheidbarkeit



ERR = empirical
rejection region

PUR =
perceptually
unacceptable
region

(aus Norsen,
*Foundations of
Quantum
Mechanics*)



Ontologie

GRWf: Flashes

Bei jedem Kollaps entsteht ein *Materieflash*. Die Welt besteht aus diesen *Materieflashes*. Wellenfunkt. nicht real.

GRWm: Massendichte

$$\rho_k(x, t) = m_k \int d^3q_1 \cdots d^3q_N \delta(\vec{x} - \vec{q}_k) |\Psi(\vec{q}_1, \dots, \vec{q}_N, t)|^2$$

$$\rho(x, t) = \sum_k \rho_k(x, t)$$

Bohmian mechanics

*I think that conventional formulations of quantum theory [...] are unprofessionally vague and ambiguous. Professional theoretical physicists ought to be able to do better. **Bohm has shown us a way.***

– Bell, *Beables for QFT*

Die Postulate

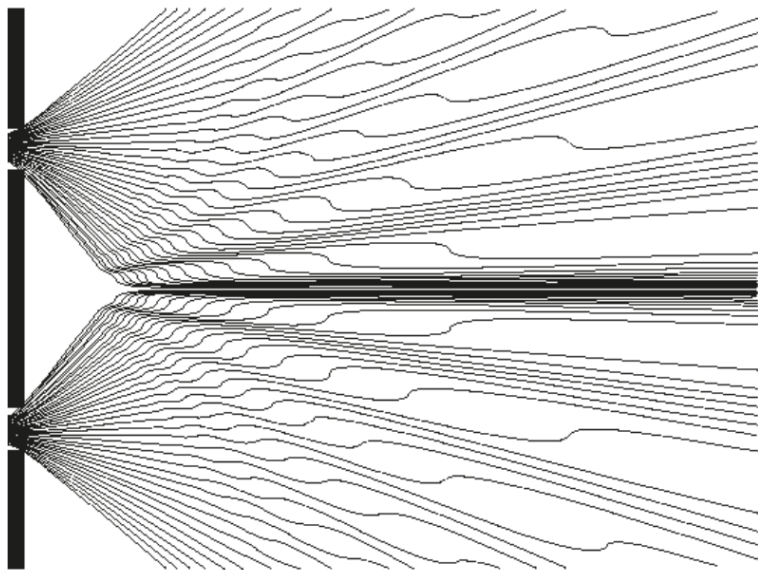
1. Ein System wird vollständig durch das **Tupel** (Ψ, Q) beschrieben. $\Psi(\vec{q}_1, \dots, \vec{q}_N, t)$ folgt dabei immer der Schrödingergl.
2. Es existieren Teilchen mit den **Trajektorien** $\vec{Q}_k(t)$. Diese entwickeln sich gemäß der **Führungsgleichung**:

$$\dot{\vec{Q}}_k(t) = \vec{v}_k^\Psi(\vec{Q}_1(t), \dots, \vec{Q}_N(t), t) \quad \text{mit} \quad \vec{v}_k^\Psi = \frac{1}{m} \operatorname{Im} \frac{\nabla_k \Psi}{\Psi}$$

$$\text{also} \quad \frac{d}{dt} \vec{Q}_k(t) = \frac{1}{m} \operatorname{Im} \frac{\nabla_k \Psi(q, t)}{\Psi(q, t)} \bigg|_{q=(\vec{Q}_1(t), \dots, \vec{Q}_N(t))}$$

Born'sche Regel kann statistisch "**hergeleitet**" werden

Doppelspalt und Bohm'sche Bahnen



Die Begründung

Makroskopische Objekte haben immer einen wohldefinierten Ort (so sieht es zumindest für uns aus)

und die einfachste Art, dies zu erklären, ist, dass sie aus mikroskopischen Objekten bestehen, die selbst zu jeder Zeit einen wohldefinierten Ort haben.

– Dürr & Lazarovici, *Verständliche QM*

Das Bohm'sche Programm

fund. mikro Theorie	klassische stat. Phys.	Bohm Mech
Dynamikerzeuger	H	Ψ_t
Raum	Phasenr. $(q, p) \in \mathbb{R}^{6N}$	Konfig. raum $q \in \mathbb{R}^{3N}$
Phasenraumfluss	$v^H = \left(\frac{\partial H}{\partial p}, -\frac{\partial H}{\partial q} \right)$	$v^{\Psi_t} = \frac{1}{m} \operatorname{Im} \frac{\nabla_k \Psi}{\Psi}$
stat. Herleitung	$\rho(q, p) \propto e^{-\beta H(q, p)}$	$\rho(q) = \Psi(q) ^2$
Begründung von:		
effektive makro Theorie	Thermodynamik	Copenhagen
komische Konzepte	Entropie	Kollaps von Ψ

Unterschiede

- ▶ Wellenfunktion hat Zeitentwicklung, klassischer Hamiltonian aber nicht => Hamilton-Jakobi-Theorie
- ▶ Man kann das reine Bewegungsgesetz nicht direkt testen, nur statistische Aussagen
- ▶ Theoretische Unschärfen (Unschärferelation)

Warum nicht BM?

But in 1952 I saw the impossible done. It was in papers by David Bohm. [...]

Why is the pilot wave picture ignored in 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?

– Bell, *On the impossible pilot wave*

Many Worlds Interpretation

one of the most daring and most ambitious theories ever constructed in the history of science

– Max Jammer

Many Worlds Interpretation

Hugh Everett III, *Theory of the Universal Wavefunction* (PhD Arbeit)

Why doesn't our observer see a smeared out needle?

The answer is quite simple. [...] he himself becomes smeared out, [...]

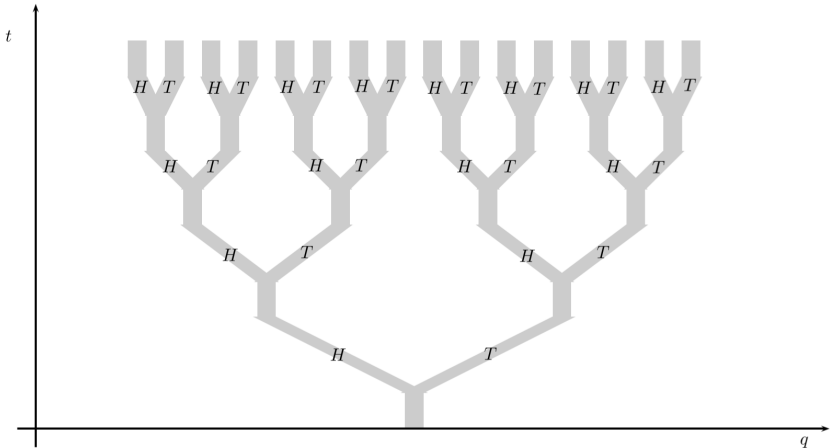
[T]he observer himself has split into a number of observers, each of which sees a definite result of the measurement...

– Everett, *Probability in Wave Mechanics*

Die Postulate

1. Der **Konfigurationsraum** $\mathbb{R}^{3N}$ ist **fundamental**. Die **Universelle Wellenfunktion** Ψ_U entwickelt sich gemäß der Schrödingergl.
2. **Dekohärente Zweige** der Ψ_U entsprechen "unseren" Alltagswelten.
3. Born'sche Regel?
 - ▶ Ein Universum, viele Welten
 - ▶ Mathematisch: Minimalistisch und Natürlich
 - ▶ Deterministisch & Nicht-lokal

Born'sche Regel



Quelle: Norsen, *Foundations of Quantum Mechanics*

Ontologische Komplikationen

- ▶ Wann genau passiert die Weltenaufzweigung?
- ▶ Wieso nehmen wir $\mathbb{R}^3$ wahr, wenn $\mathbb{R}^{3N}$ fundamental?
- ▶ Woraus besteht unsere Welt?
- ▶ Was hat die Wellenfkt. einer Katze mit einer Katze zu tun?
Woraus besteht die Katze?
- ▶ Was sind Teilchen? (Freiheitsgerade?)

⇒ Brauchen Massendichteverteilung?

“Everett gegen Bohm”

Für Everett

- ▶ *"pilot-wave theories are parallel-universe theories in a state of chronic denial"* (David Deutsch)
- ▶ Mathematischer Minimalismus
- ▶ Metatheorie

Für Bohm

- ▶ *"Wenn wir „Teilchen“ sagen, dann meinen wir auch Teilchen"* (Dürr & Lazarovici)
- ▶ Bohm'sche Trajektorien = Tracker unseres Wellenzweiges
- ▶ Klare Ontologie & Weltbild
- ▶ $\mathbb{R}^3$ fühlt sich realer an
- ▶ Wir nehmen nur unsere Welt wahr

Fazit

To take home

- ▶ Man kann aus $\rho(x) = |\Psi(x)|^2$ den Operatorformalismus herleiten
 - ▶ Kann wie immer rechnen
 - ▶ Operatorformalismus = effektive Theorie (e.g. Thermodynamik)
- ▶ QM ohne Beobachter erlauben uns das Universum (besser) zu verstehen