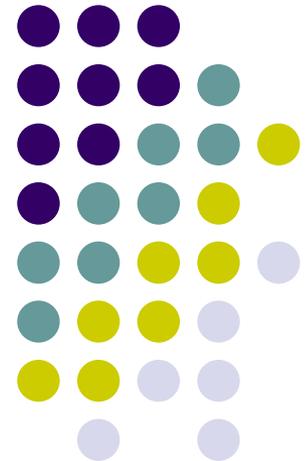


# Interpretationen des quantenmechanischen Formalismus



Reinhold A. Bertlmann  
Philipp Köhler & Tanja Traxler

VO Fallstudien zur naturwissenschaftlichen Erkenntnis – Quantentheorie  
6. Dezember 2010





# Grundlegende Fragen

- Warum verhalten sich die Objekte der **Makro-Welt klassisch** und nicht nach den quantenmechanischen Gesetzen des Mikrokosmos?

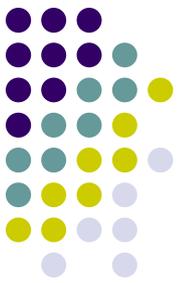
*Warum ist unsere Welt nicht spooky?*

- Wo ist die **Grenze zwischen Quantenwelt und klassischer Physik?**

*Wo beginnt die Welt „verrückt“ zu werden?*

- Welche reale Bedeutung hat die **Wellenfunktion  $\psi$** , mit der quantenmechanische Zustände beschrieben werden können?

*Wer ist Psi?*



# Kopenhagener Deutung

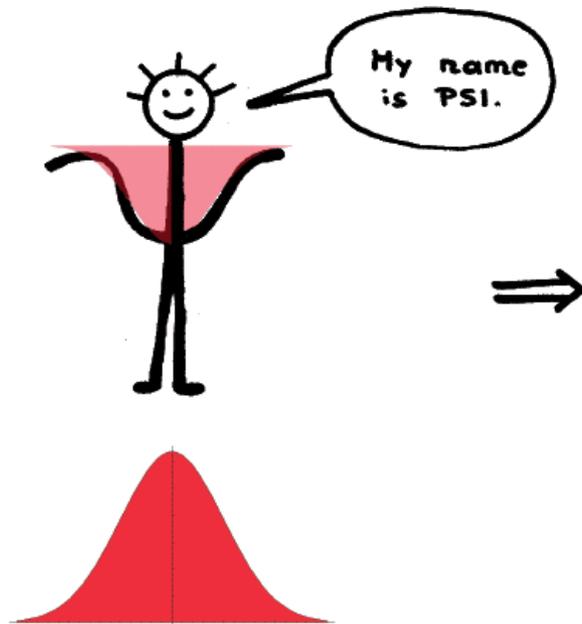
- **Vorreiterin** unter den Interpretationen
- Ursprung: Diskussionen am Institut für theoretische Physik in **Kopenhagen** zwischen 1925 und 1927
- Intellektuelle Väter: Niels **Bohr**, Werner **Heisenberg**, Wolfgang **Pauli**
- Postuliert: **Kollaps der Wellenfunktion** durch Messung, d. h. quantenmechanischer Superpositionszustand wird zerstört, *ein* bestimmter Messwert manifestiert sich
- **Wellenfunktion  $\psi$  keine (reale) physikalische Messgröße**, sondern mathematisches Werkzeug und Maß für Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Messwertes

# Kopenhagener Deutung



micro world  
quantum state

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |n\rangle$$



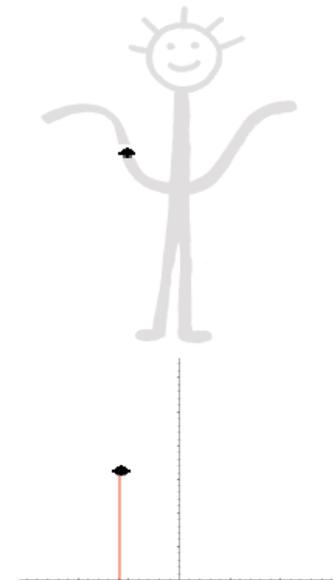
measurement > collapse

$$|n\rangle\langle n|$$

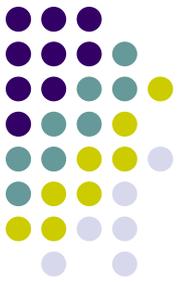


macro world  
observed state

$$|n\rangle$$



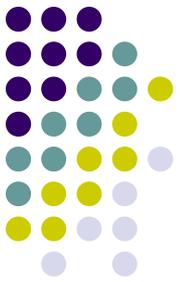
## Kopenhagener Deutung



- Interessantes Detail: obwohl meist gebräuchliche Interpretation bis heute **keine schriftliche Definition**;

Claus Kiefer (2002): „*There has **never been complete agreement** about the actual meaning, or even definition, of this interpretation even among its main contributors. In fact, the Copenhagen interpretation has remained until today an **amalgamation of different views.**“*“

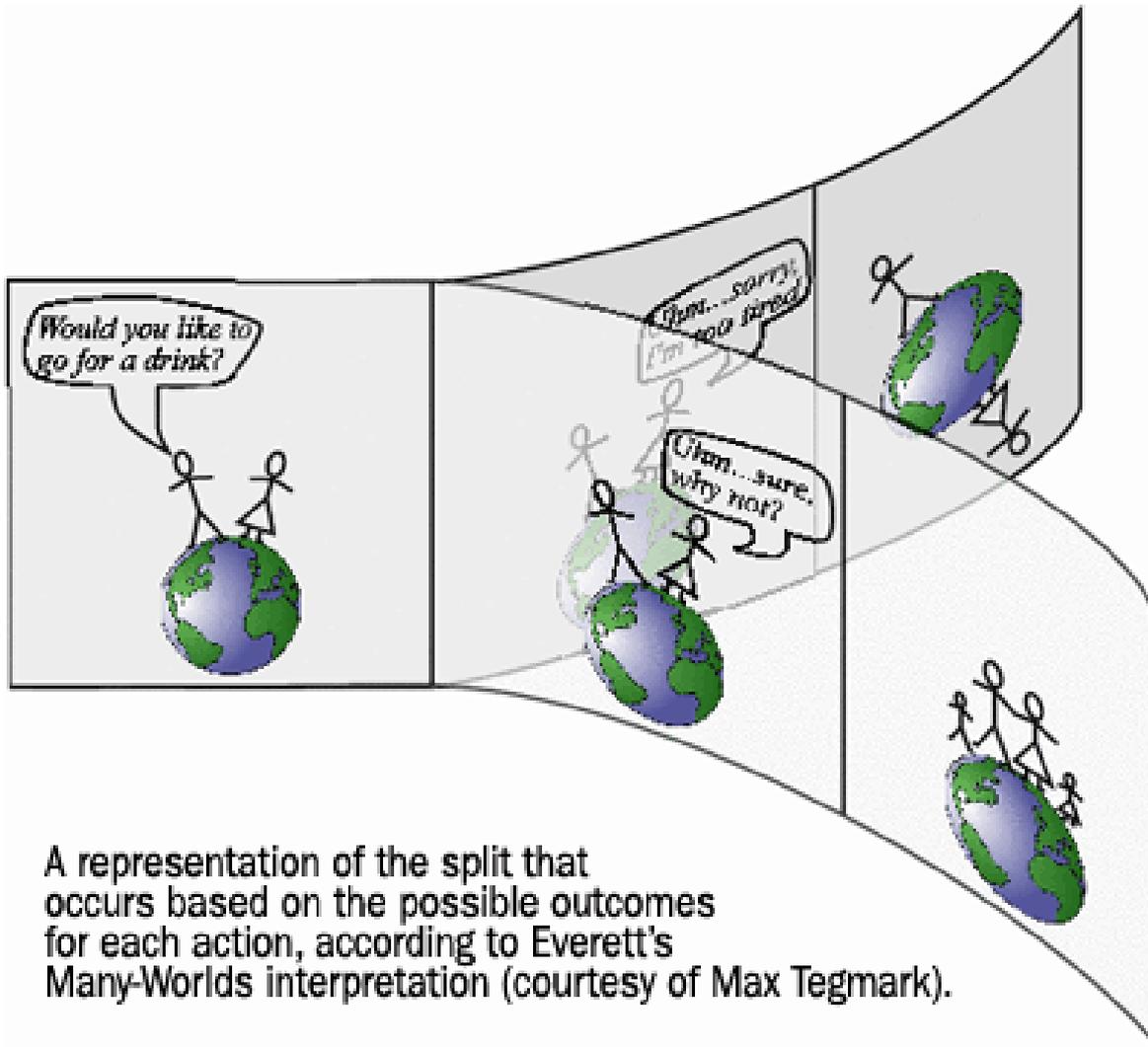
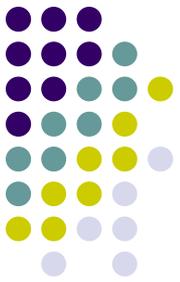
- **Offene Frage**: Warum kommt es zum Kollaps?



# Viele-Welten-Theorie

- Postuliert: **Kollaps** ist nur eine **Illusion**
- Mathematischer Formalismus der Quantenmechanik bekommt **reale Bedeutung**
- An jedem Messpunkt: **Universum spaltet sich**, d.h. es existieren **unendlich viele parallele Welten**
  
- **Nachteile:**
  - Theorie „unökonomisch“
  - Auswahl des Universums nicht erklärbar

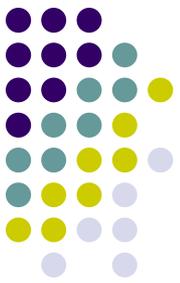
# Viele-Welten-Theorie



A representation of the split that occurs based on the possible outcomes for each action, according to Everett's Many-Worlds interpretation (courtesy of Max Tegmark).

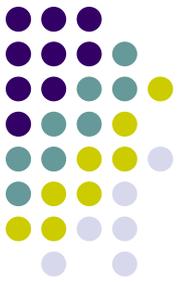
# Viele-Welten-Theorie





# Bohmsche Mechanik

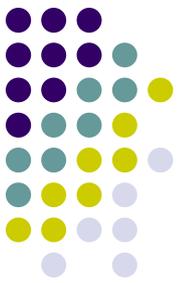
- Entwickelt unabhängig voneinander durch **Louis de Broglie** (1920er Jahre) und **David Bohm** (1950er Jahre)
- **Wellenfunktion  $\psi$  ist reale physikalische Größe**
- **Deterministische Theorie**, Messprozess spielt keine ausgezeichnete Rolle
- Grundidee: Quantenphysikalisches System wird nicht nur durch **Wellenfunktion** beschrieben, sondern auch durch **Teilchenorte** (Trajektorien). Die Trajektorien sind allerdings **verborgene Parameter**, weil Position nicht beliebig genau bestimmbar, solange nicht gemessen worden ist



- **Nachteile:**

- physikalisch kein Mehrwert  
(„nur“ Anschauungs-mäßig)

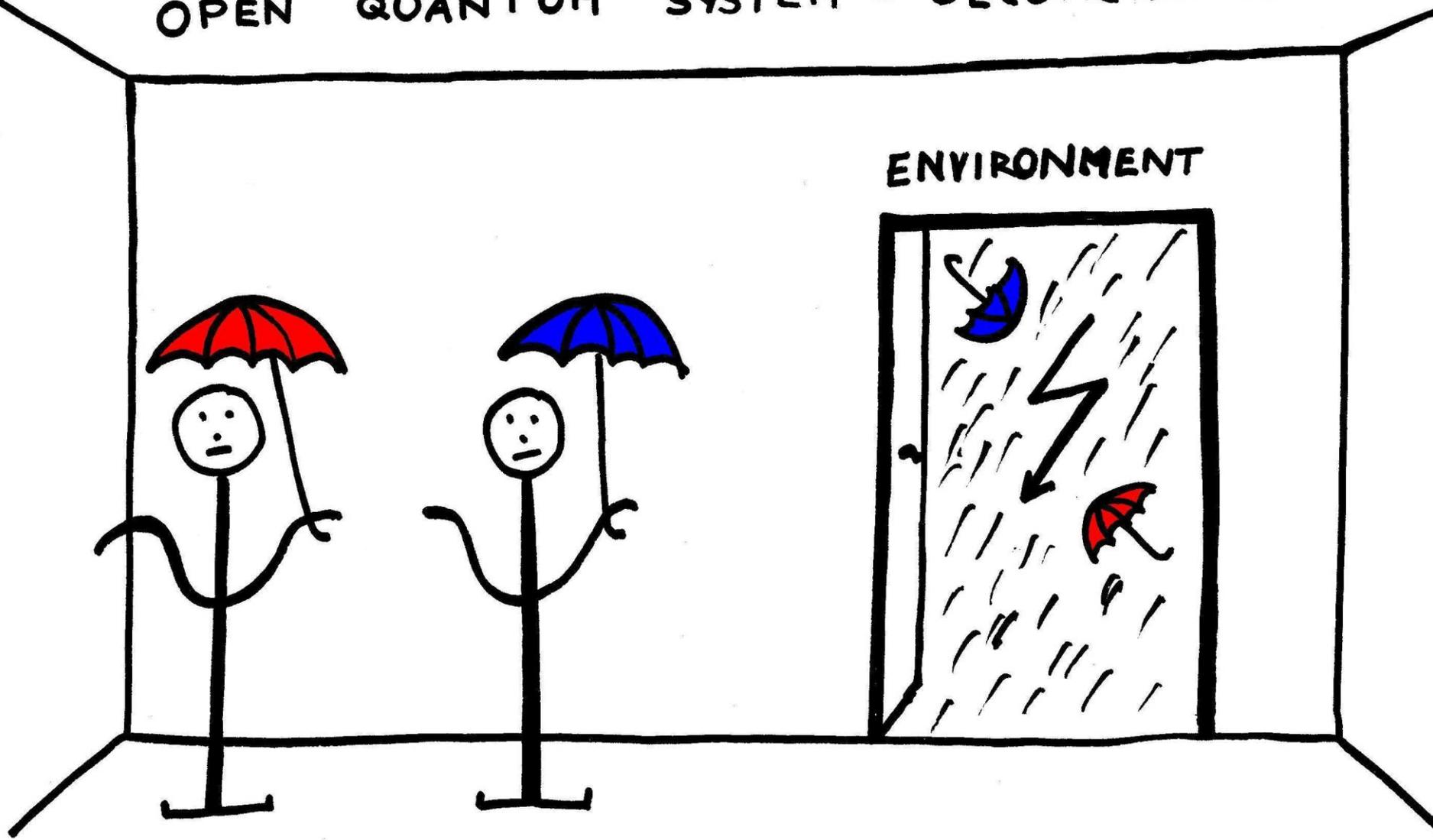
- mathematisch sehr komplizierte Rechnungen



# Dekohärenz

- Grundgedanke: kein Quantensystem ist vollkommen isoliert, es gibt immer **Wechselwirkung mit der Umgebung**.
- Wechselwirkung **zerstört Quanteneigenschaften**, wie Superposition oder Entanglement
- **Kollaps** der Wellenfunktion muss nicht mehr postuliert werden, da der **Dekohärenzprozess** die Quanteneigenschaften zerstört
- **Offene Frage**: Warum kommt es zu Dekohärenz?

# OPEN QUANTUM SYSTEM - DECOHERENCE



# THE BORDER TERRITORY

QUANTUM DOMAIN

CLASSICAL DOMAIN

PHOTONS  
ELECTRONS  
ATOMS

SUN  
PLANETS

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

- o
- o
- o
- o
- o
- o
- o

GRAVITY WAVE DETECTOR

QUANTUM FLUIDS

QUANTUM BILL OF RIGHTS  
INTERFERE IF YOU CAN!!!  
SCHRODINGER'S EQUATION

CLASSICAL LAW AND ORDER  
DO NOT INTERFERE!!!  
NEWTON'S EQUATIONS  
SECOND LAW OF THERMODYNAMICS

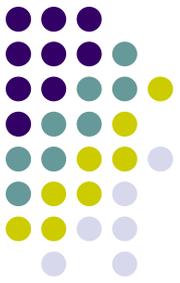
1

SIZE (# OF ATOMS)

$10^{23}$



# Die pragmatische Sicht/ Conclusio



Die vier genannten Interpretationen können experimentell derzeit nicht voneinander unterschieden werden. Solange der Formalismus funktioniert, kann man damit arbeiten, ohne sich darüber Gedanken zu machen, was seine Bedeutung sein könnte.