



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Fachdidaktik der
Naturwissenschaften

■ Abteilung Physik und Physikdidaktik



Verschränkung und Dekohärenz

Rainer Müller, TU Braunschweig

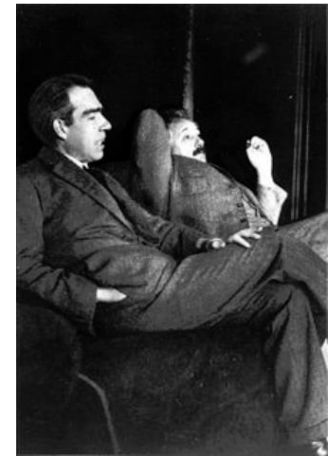
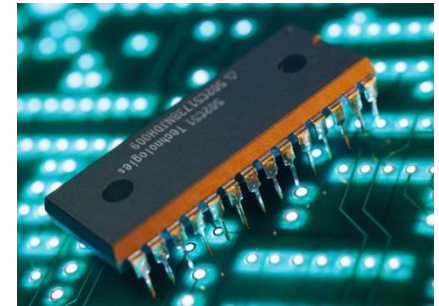
Legitimation – Ziele des Quantenphysikunterrichts

Welche Absichten verfolgt man mit dem Quantenphysikunterricht?

→ hat erheblichen Einfluss auf die Unterrichtsgestaltung

Mögliche Zielsetzungen:

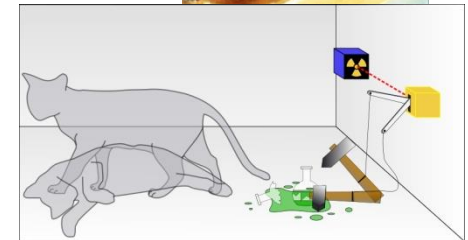
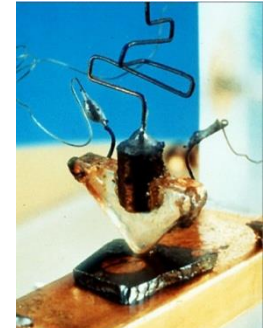
- Die Quantenphysik ist die **Grundlage für wichtige Technologien** (Halbleiter).
- Die Quantenphysik hat das **Weltbild der Physik** im 20. Jh. umgewälzt.
- Im **Studium** werden Kenntnisse der Quantenphysik als Grundlage benötigt.
- Die Quantenphysik ist ein wichtiger **Prüfungsstoff** im Abitur.



Orientierungswissen vs. Verfügungswissen

(von Mittelstraß geprägtes Begriffspaar)

- **Verfügungswissen**
beantwortet die Frage nach dem „Wie?“. Eher auf Technik/Naturbeherrschung ausgerichtet.
- **Orientierungswissen**
beantwortet die Frage nach dem „Warum?“ und „Wozu?“. Soll das Zurechtfinden in der Welt ermöglichen.



Muckenfuß 1996:

Das Verfügungswissen spricht nur diejenigen Schüler an, in deren Lebensplanung die Partizipation an der Naturbeherrschung eine wesentliche Rolle spielt. Davon abgehoben wird das der Aufklärung des Mensch/Natur-Verhältnisses dienende Orientierungswissen.

Ziele des Quantenphysikunterrichts

These:

Physikalische Bildung besteht im Verständnis der Grundzüge eines naturwissenschaftlichen Weltbilds.

Das bedeutet: Eine Einführung in diejenigen grundlegenden Einsichten der Physik, die unser Bild von der Natur prägen.

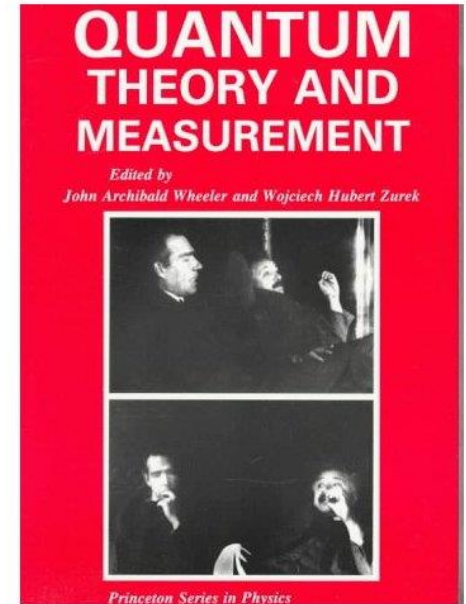
„Für junge Menschen, die keinen naturwissenschaftlichen Beruf wählen, ist der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht in der Schule praktisch die einzige Chance zur systematischen Begegnung mit einem zentralen Teil unserer Kultur“
(BLK-Gutachten 1997)

Perspektivwandel in der Sichtweise der Quantenmechanik

In den vergangen 20 Jahren hat sich die Sicht auf die Deutungsaspekte der Quantenmechanik verändert.

Stellvertretend: „The Big Red Book“ (Wheeler & Zurek 1983):

„Why there is no textbook on the measurement side of quantum theory is clear to anyone who participates in a seminar on the subject, and even clearer to one who gives a course on it: puzzlement!”



Perspektivwandel in der Sichtweise der Quantenmechanik

Was inzwischen passiert ist:

1. Fortschritte im Verständnis der Quantenmechanik. Beispiel:

Dekohärenz

(Joos & Zeh 1985,
Zurek 1991)

DECOHERENCE AND THE TRANSITION FROM QUANTUM TO CLASSICAL

The environment surrounding a quantum system can, in effect, monitor some of the system's observables. As a result, the eigenstates of those observables continuously decohere and can behave like classical states.

Wojciech H. Zurek

Quantum mechanics works exceedingly well in all practical applications. No example of conflict between its predictions and experiment is known. Without quantum physics we could not explain the behavior of solids, the structure and function of DNA, the color of the stars, the action of lasers or the properties of superfluids. Yet well over half a century after its inception, the debate about the relation of quantum mechanics to the familiar physical world continues. How can a theory that can account with precision for everything we can measure still be deemed lacking?

What is wrong with quantum theory?

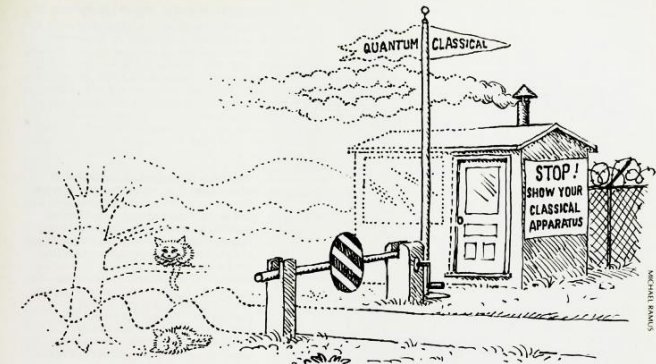
The only "failure" of quantum theory is its inability to provide a natural framework that can accommodate our prejudices about the workings of the universe. States of quantum systems evolve according to the *deterministic, linear Schrödinger equation*,

$$i\hbar \frac{d}{dt}|\psi\rangle = H|\psi\rangle \quad (1)$$

That is, just as in classical mechanics, given the initial state of the system and its Hamiltonian H , one can

Why? Given almost any initial condition the universe described by $|\psi\rangle$ evolves into a state that simultaneously contains many alternatives never seen to coexist in our world. Moreover, while the ultimate evidence for the choice of one such option resides in our elusive "consciousness," there is every indication that the choice occurs long before consciousness ever gets involved. Thus at the root of our unease with quantum mechanics is the clash between the principle of superposition—the consequence of the linearity of equation 1—and the everyday classical reality in which this principle appears to be violated.

The problem of measurement has a long and fascinating history. The first widely accepted explanation of how a single outcome emerges from the many possibilities was the Copenhagen interpretation, proposed by Niels Bohr,^{1,2} who insisted that a classical apparatus is necessary to carry out measurements. Thus quantum theory was not to be universal. The key feature of the Copenhagen interpretation is the dividing line between quantum and classical. Bohr emphasized that the border must be mobile, so that even the "ultimate apparatus"—the human nervous system—can be measured and analyzed as a quantum object, provided that a suitable classical device



Delineating the border between the quantum realm ruled by the Schrödinger equation and the classical realm ruled by Newton's laws is one of the unresolved problems of physics. Figure 1

minima of the effective potential.⁴

If macroscopic systems cannot always be safely placed on the classical side of the boundary, might there be no boundary at all? The many-worlds interpretation (or, more accurately, the many-universes interpretation) claims to do away with the boundary.⁵ The many-worlds interpretation was developed in the 1950s by Hugh Everett III with the encouragement of John Archibald Wheeler. In this interpretation all of the universe is described by quantum theory. Superpositions evolve forever according to the Schrödinger equation. Each time a suitable interaction takes place between any two quantum systems, the wavefunction of the universe splits, so that it develops ever more "branches."

Everett's work was initially almost unnoticed. It was taken out of mothballs over a decade later by Bryce DeWitt, who managed—in part, through his *PHYSICS TODAY* article (September 1970, page 30)—to upgrade its status from virtually unknown to very controversial.⁶ The

by these two viewpoints nevertheless becomes apparent when we ask the obvious question "Why do I, the observer, perceive only one of the outcomes?" Quantum theory, with its freedom to rotate bases in Hilbert space, does not even clearly define which states of the universe correspond to branches. Yet our perception of a reality with alternatives and not a coherent superposition of alternatives demands an explanation of when, where and how it is decided what the observer actually perceives. Considered in this context, the many-worlds interpretation in its original version does not abolish the border but pushes it all the way to the boundary between the physical universe and consciousness. Needless to say, this is a very uncomfortable place to do physics.

In spite of the profound difficulties and the lack of a breakthrough for some time, recent years have seen a growing consensus that progress is being made in dealing with the measurement problem. The key (and controversial) fact has been known almost since the inception of

Perspektivwandel in der Sichtweise der Quantenmechanik

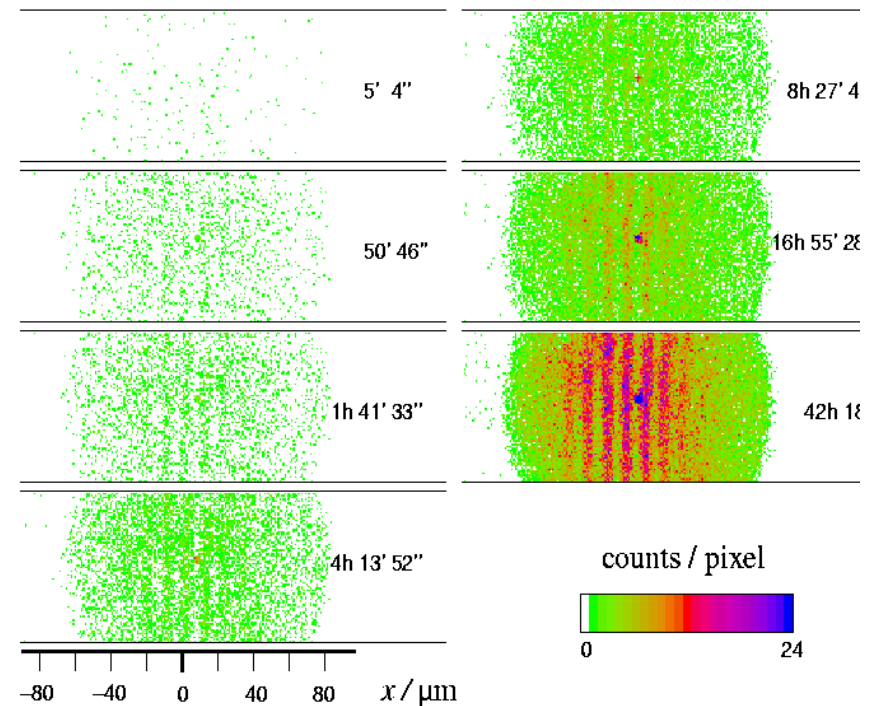
Was inzwischen passiert ist:

2. Große Fortschritte bei Experimenten zu fundamentalen Aspekten der Quantentheorie

Beispiele:

Interferenzexperimente mit Atomen und Molekülen

Doppelspaltexperiment mit einzelnen He-Atomen
(Kurtsiefer et al. 1997)



Perspektivwandel in der Sichtweise der Quantenmechanik

Was inzwischen passiert ist:

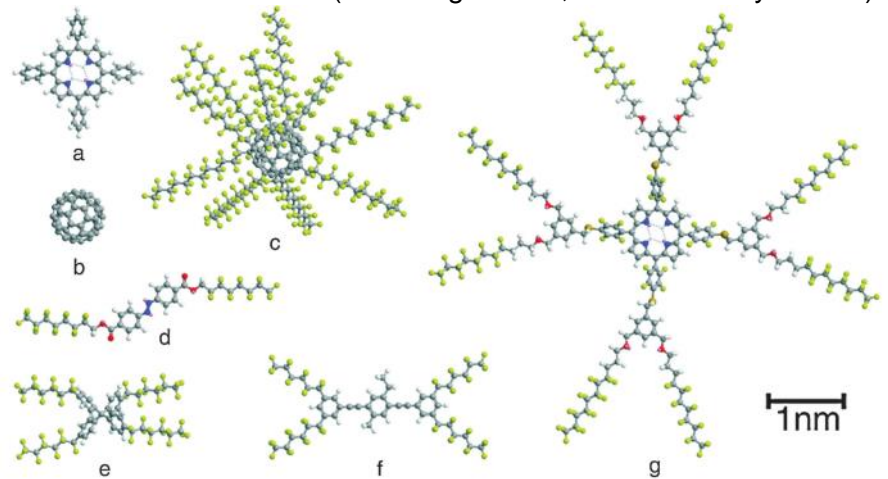
2. Große Fortschritte bei Experimenten zu fundamentalen Aspekten der Quantentheorie

Beispiele:

**Interferenzexperimente mit Atomen
und Molekülen**

Heute: Interferenz mit großen organischen
Molekülen (Arndt, Wien)

(Hornberger et al., Rev. Mod. Phys. 2012)



Perspektivwandel in der Sichtweise der Quantenmechanik

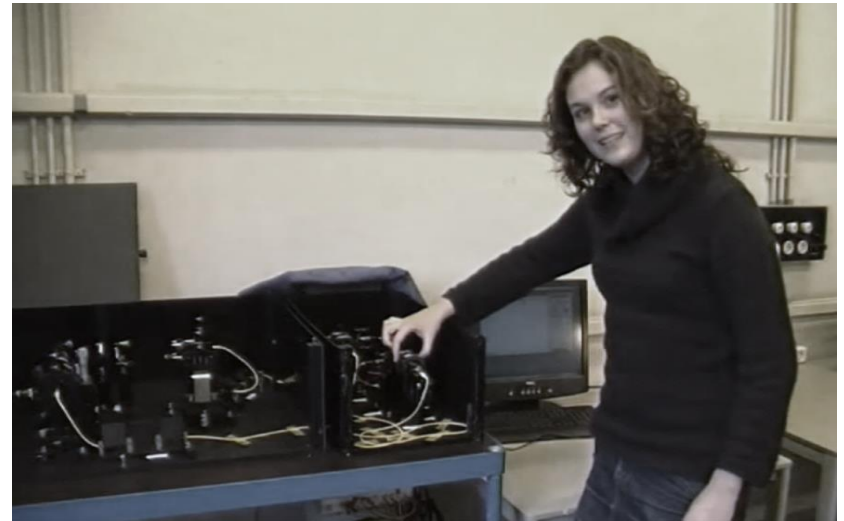
Was inzwischen passiert ist:

2. Große Fortschritte bei Experimenten zu fundamentalen Aspekten der Quantentheorie

Beispiele:

**Verletzung der Bellschen Ungleichung
als Praktikumsversuch**

V. Zwiller et. al., TU Delft
<http://sites.google.com/site/vlabtudelft>



Perspektivwandel in der Sichtweise der Quantenmechanik

Was inzwischen passiert ist:

2. Große Fortschritte bei Experimenten zu fundamentalen Aspekten der Quantentheorie

Beispiele:

Quanteninformation erreicht ein kommerzielles Stadium



Carrier Class Network Security

- Quantum Key Distribution
- Key refresh rate up to 100 256 bit keys a second
- Intrusion Detection
- Always-on base VPN
- Data protection with best of breed encryption technologies
- In-transit data security
- Network compatibility
- Implements industry standards
E884, 3DES, AES
- Integrated encryption and Quantum Key Distribution in one enclosure
- Quantum Key Distribution compatible with DWDM
- Low total cost of ownership
- Core

Backbone connections between Points of Presence (PoPs) or Network Access Points (NAPs)

OVERVIEW

Technology companies have responded to heightened requirements for information security with an avalanche of new cryptography products. As sophisticated as these solutions are, they have this in common: they all rely on computational difficulty as the source of their protection and none can escape the fact that information security that relies on computational difficulty is ultimately vulnerable.

Breaking through to information security that's NOT VULNERABLE means breaking new ground. Breaking with the tradition of refining current solutions; finding new directions; pioneering completely new technologies that can't be threatened by the next new chip or the next new software algorithm: that's been the mission of MagiQ Technologies since 1999.

Presenting MagiQ QPN™ Security Gateway Quantum Key Distribution (QKD) System.

MAGIQ QPN™ SECURITY GATEWAY

Unlike traditional cryptography based security approaches, MagiQ QPN™ Security Gateway is a highly-compatible,

and technological overhead that's required to refresh them. MagiQ QPN™ refreshes keys as often as 100 times per second by incorporating real-time, continuous,

Quelle: Magiq

Perspektivwandel in der Sichtweise der Quantenmechanik

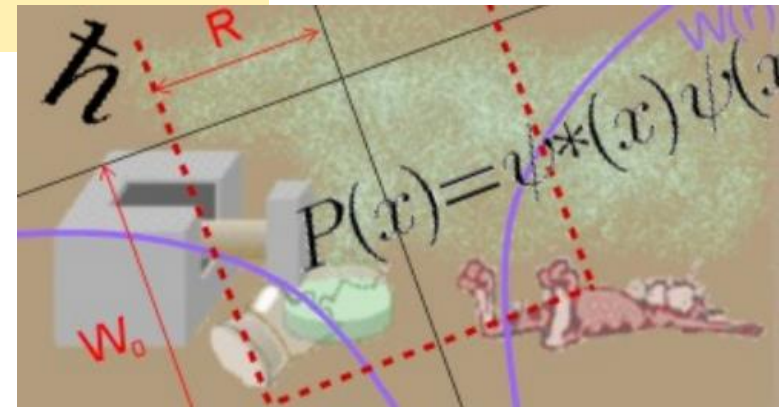
Fazit:

Unsere Sicht auf die Quantenmechanik hat sich in den letzten 20 Jahren gewandelt

Dies sollte sich auch in geänderten Zugängen für die Schule niederschlagen.

→ **Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik (milq)**

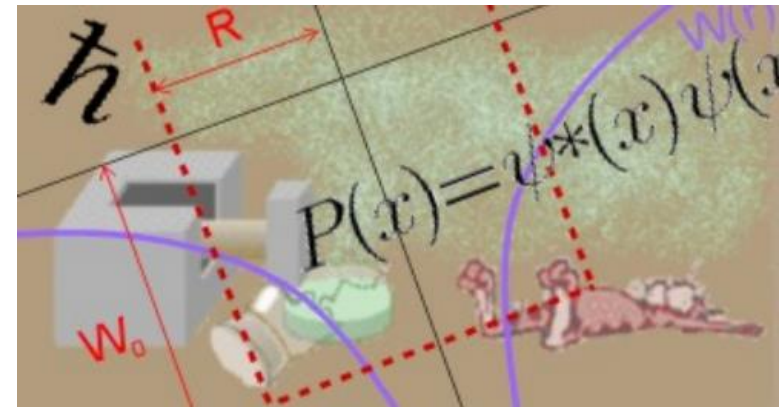
(Müller, Wiesner, Küblbeck,
Damaschke u. a., 1997 ff.)



Grundgedanken von milq

Die folgenden Grundgedanken dienen als Leitlinie bei der Entwicklung:

- Herausstellen der Aspekte, die gegenüber der klassischen Physik das „ganz Neue“ darstellen
- Orientierung an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten
- Bereitstellen klarer Begriffe als Voraussetzung für erfolgreiche Lernprozesse



Grundgedanken von milq

Bereitstellen klarer Begriffe:

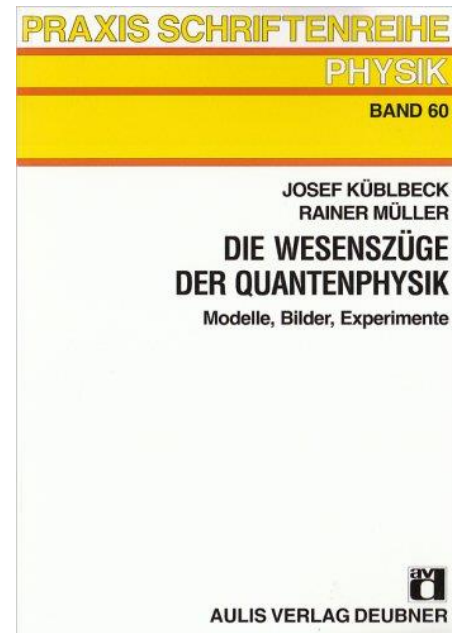
Wesenszüge der Quantenphysik (Küblbeck & Müller 2002)

Wesenszug 1: **Statistisches Verhalten**

Wesenszug 2: **Fähigkeit zur Interferenz**

Wesenszug 3: **Eindeutige Messergebnisse**

Wesenszug 4: **Komplementarität**

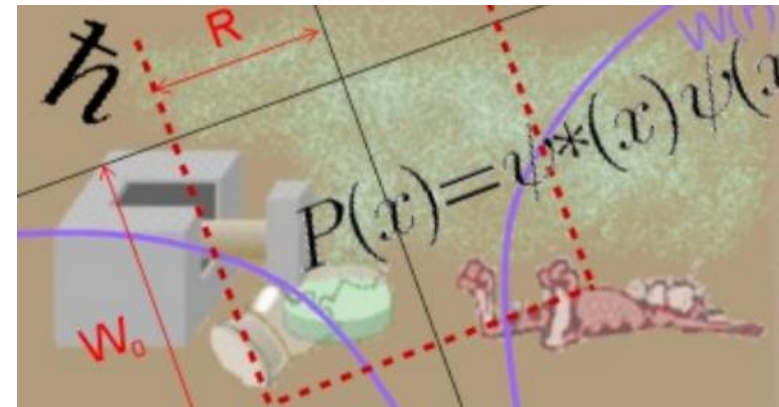


Grundgedanken von milq

In diesem Vortrag: Keine Übersicht über den ganzen Kurs

Stattdessen: Ausführlicher Hintergrund zum Thema
Schrödingers Katze, Verschränkung, Dekohärenz

→ „Für die Hand des Lehrers“



Das Superpositionsprinzip in der Quantenmechanik

Der harmlose Anfang: Ein fundamentales Prinzip der Quantenmechanik:

Superpositionsprinzip:

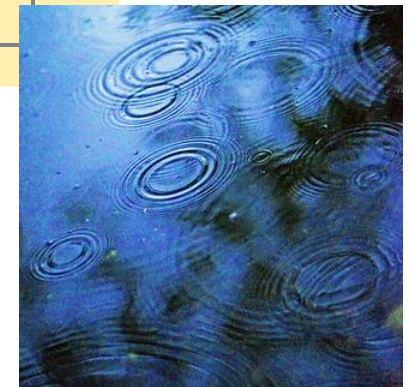
Superpositionsprinzip:

Sind $|\psi_1\rangle$ und $|\psi_2\rangle$ physikalisch erlaubte Zustände eines Systems, so ist auch die Überlagerung

$$|\psi\rangle = a|\psi_1\rangle + b|\psi_2\rangle$$

ein möglicher Zustand.

→ Kohärenz, Interferenz



K.-L. Poggemann/flickr

Das Superpositionsprinzip in der Quantenmechanik

Der harmlose Anfang: Ein fundamentales Prinzip der Quantenmechanik:

Superpositionsprinzip:

Superpositionsprinzip:

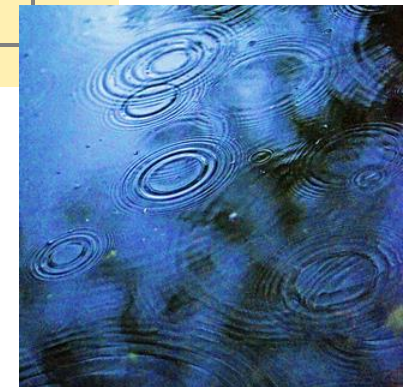
Sind $|\psi_1\rangle$ und $|\psi_2\rangle$ physikalisch erlaubte Zustände eines Systems, so ist auch die Überlagerung

$$|\psi\rangle = a|\psi_1\rangle + b|\psi_2\rangle$$

ein möglicher Zustand.

→ Kohärenz, Interferenz

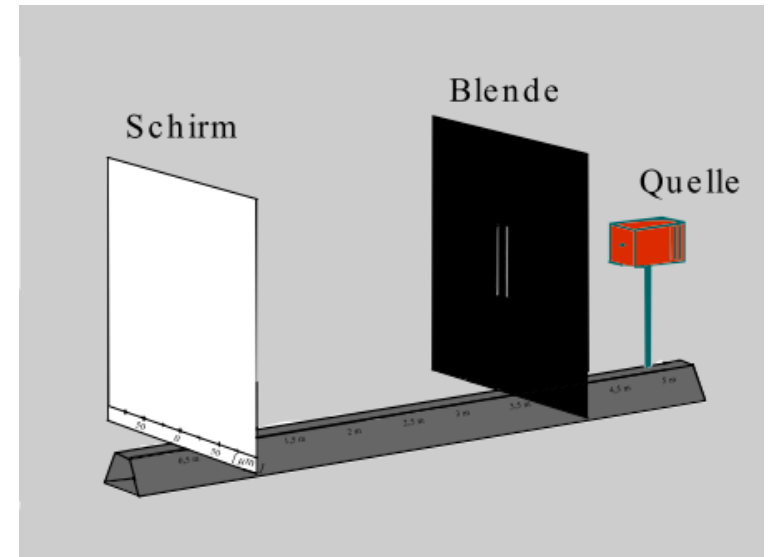
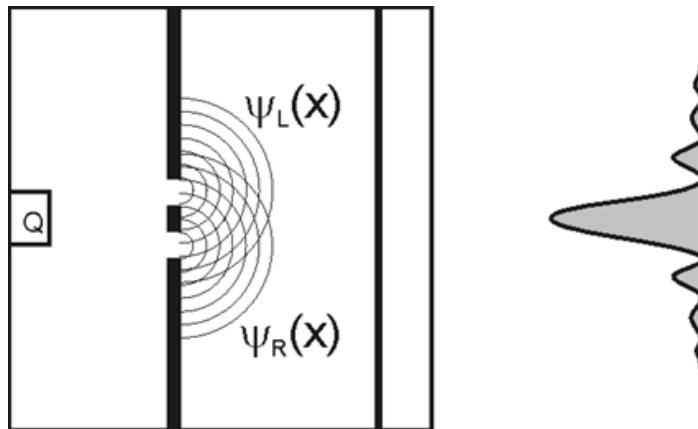
Dirac-Notation



K.-L. Poggemann/flickr

Das Superpositionsprinzip in der Quantenmechanik

Beispiel: Das Doppelspaltexperiment



Das Superpositionsprinzip in der Quantenmechanik

Beispiel: Das Doppelspaltexperiment

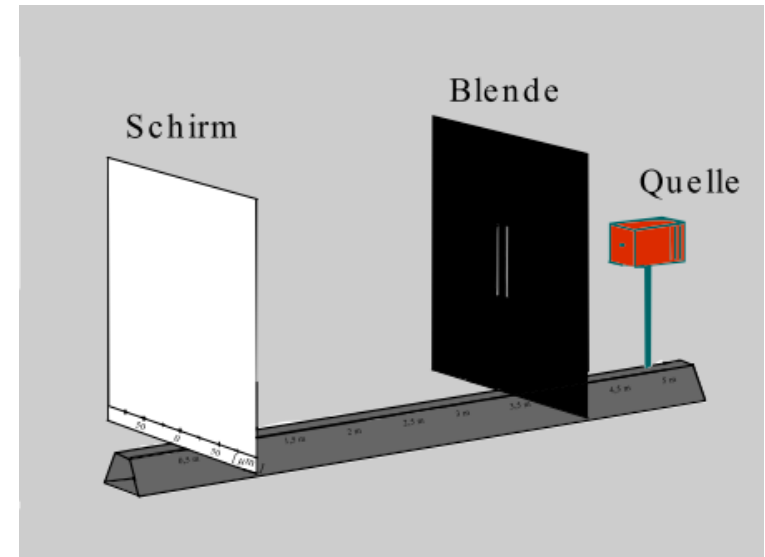
Wellenfunktion am Schirm:

$$|\psi\rangle = a|\psi_L\rangle + b|\psi_R\rangle \quad (a = b = \frac{1}{\sqrt{2}})$$

Wahrscheinlichkeitsverteilung am Schirm:

$$|\psi(x)|^2 = |a|^2 \cdot |\psi_L|^2 + |b|^2 \cdot |\psi_R|^2 + a^* b \cdot \psi_L^*(x) \psi_R(x) + ab^* \cdot \psi_L(x) \psi_R^*(x)$$

Interferenzterme



Das Superpositionsprinzip in der Quantenmechanik

Das Superpositionsprinzip entspricht nicht unseren Alltagserfahrungen in der makroskopischen Welt.

Zwar hat man Superpositionen von ganzen Atomen an verschiedenen Orten beobachtet.

Aber nie beobachtet man Superpositionen eines Fußballs an verschiedenen Orten.

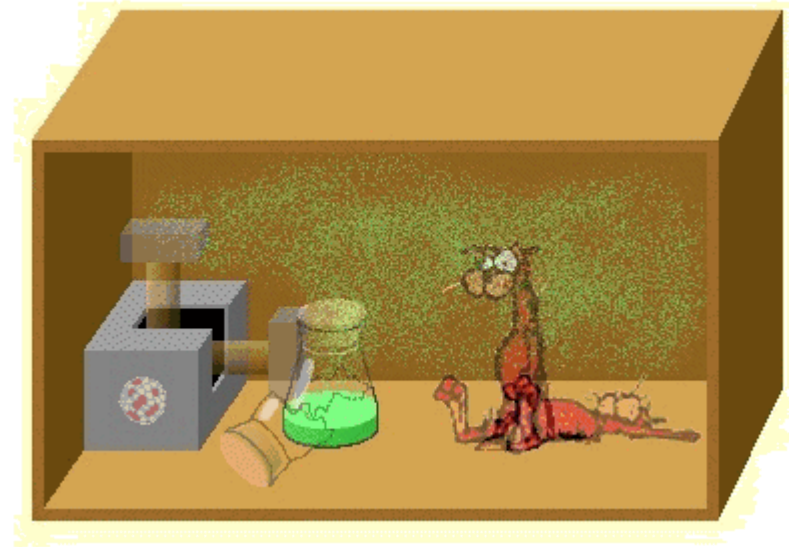
Oder von Katzen ...



Der Weg zur Verschränkung: Schrödingers Katze

Der Doppelspaltversuch sollte Standard im Quantenphysik-Unterricht sein.

Von dort aus: Über Schrödingers Katze ein gangbarer Weg zur Verschränkung



Der Weg zur Verschränkung: Schrödingers Katze

„Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muss): in einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, dass im Lauf einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, dass die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben.“

(E. Schrödinger, 1935).



Analyse des Katzenparadoxons

a) Interpretationsproblem

Wie sieht eine Superposition aus lebender und toter Katze aus?

b) Quantitative Auswirkungen

Konsequenzen, die sich bei Messungen an Objekten in Superpositionszuständen bemerkbar machen würden:

Führe Messungen einer Observablen D an einem Ensemble von Katzen durch

Beispiel: Messe die Höhe der Katzennase über dem Boden.

Beschreibe die Katze durch zwei Zustände

$|\text{😊}\rangle$ („lebendig“) und $|\text{☹}\rangle$ („tot“)



Analyse des Katzenparadoxons

Klassisch:

Mittelwert von D in einem Ensemble von N_1 lebendigen und N_2 toten Katzen:

$$\langle D \rangle = \frac{N_1}{N} D_{\odot} + \frac{N_2}{N} D_{\ominus}$$

relative Häufigkeit

Wert von D
im Zustand \ominus

Analyse des Katzenparadoxons

Quantenmechanisch:

Der Zustand der Katze ist: $|\psi\rangle = a|\text{☺}\rangle + b|\text{☹}\rangle$

Dann ist der Mittelwert von D :

$$\langle D \rangle = |a|^2 \langle \text{☺} | D | \text{☺} \rangle + |b|^2 \langle \text{☹} | D | \text{☹} \rangle + a^* b \langle \text{☺} | D | \text{☹} \rangle + ab^* \langle \text{☹} | D | \text{☺} \rangle$$

„klassische Terme“

Interferenzterme

Bei der Messung von D können Interferenzen zwischen lebendiger und toter Katze auftreten.

→

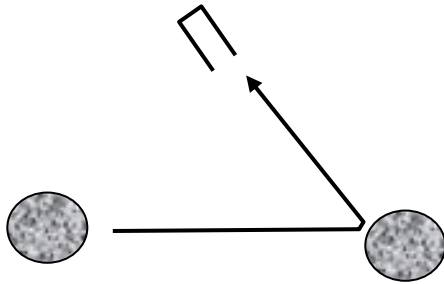
**Keine Interpretation als klassischer Mittelwert möglich!
Ein Überlagerungszustand ist eine klassisch unbekannte Art von Zustand**

Analyse des Katzenparadoxons

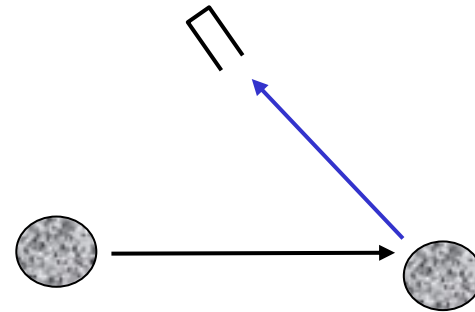
Im mikroskopischen Bereich ist die Interferenz klassisch ununterscheidbarer Alternativen längst experimentell etabliert.

Experiment zur Streuung von ^{12}C -Ionen an ^{12}C (Graphit)

Es gibt zwei klassisch denkbare Möglichkeiten, wie ein Ion am Detektor nachgewiesen werden kann:



1. Streuung

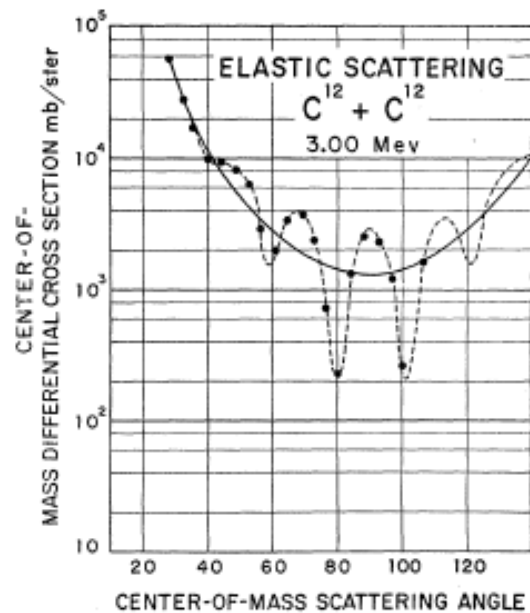


2. Herausschlagen eines Ions aus dem Graphit

Am Versuchsergebnis sind diese Möglichkeiten nicht unterscheidbar → Interferenz?

Analyse des Katzenparadoxons

Experimentelles Ergebnis (Bromley u. a. Phys. Rev. **123**, 878, 1961)

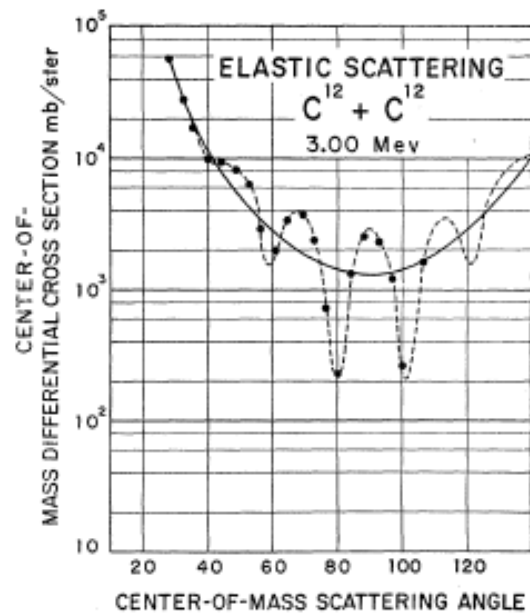


Interferenzmuster im Streuwinkel

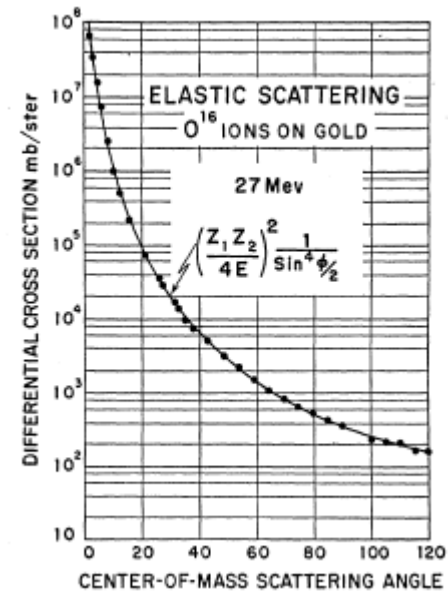
ununterscheidbare
Alternativen ($C \rightarrow C$)

Analyse des Katzenparadoxons

Experimentelles Ergebnis (Bromley u. a. Phys. Rev. **123**, 878, 1961)



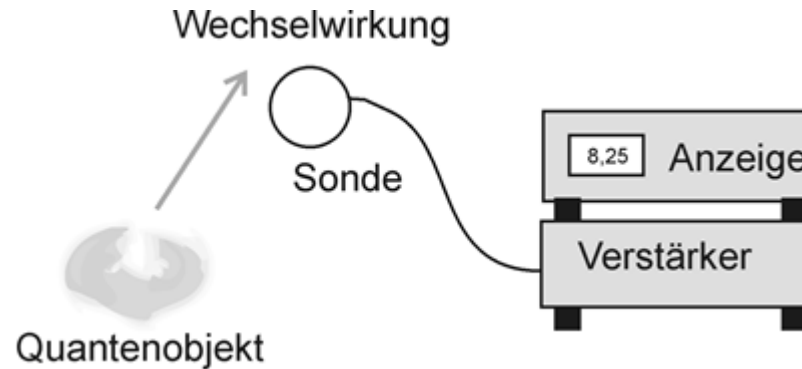
ununterscheidbare
Alternativen ($C \rightarrow C$)



unterscheidbare
Alternativen ($O \rightarrow Au$)

Der quantenmechanische Messprozeß

Schema einer Messung:



System und Apparat müssen in **Wechselwirkung** treten

Ein **Verstärkungsprozeß** ist erforderlich

Annahme: Alle beteiligten Objekte werden durch die Quantenmechanik beschrieben

Die Wechselwirkung muß den Zustand des Apparates so verändern, dass man die gewünschte Information über das System ablesen kann.

Der quantenmechanische Messprozeß

Formale Beschreibung einer Messung

(von Neumann, 1932)

Beispiel:

Messung eines Spins (Stern-Gerlach-Experiment)



Der quantenmechanische Messprozeß



System:

Atom mit zwei Zuständen $|\uparrow\rangle$ und $|\downarrow\rangle$

Apparat:

Magnete, zwei Detektoren mit Verstärkungs- und Anzeigegerät

Zustand: $|Z; r\rangle$

Z : Zeigerstellung Z_{\uparrow} , Z_{\downarrow} oder Z_0 (= Nullstellung)

r : restliche Freiheitsgrade, an denen wir nicht interessiert sind (sehr viele).

Der quantenmechanische Messprozess

Ablauf einer Messung

Fall 1: Atom anfänglich im Zustand $|\uparrow\rangle$

Vor Beginn der Messung:



Zustand vor Beginn der Messung

$$|\psi_0\rangle = |\uparrow\rangle \cdot |Z_0; r_0\rangle$$

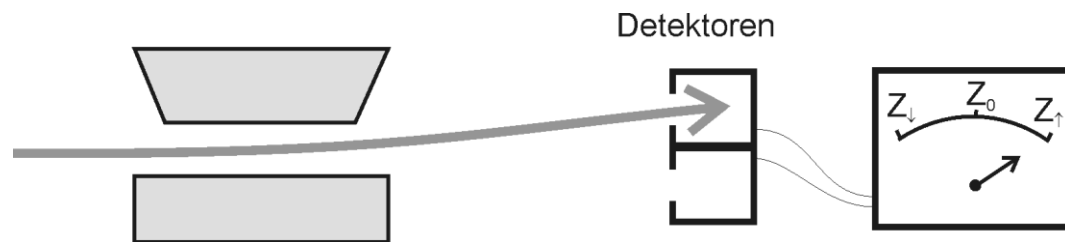
Atom Messgerät in Nullstellung

Der quantenmechanische Messprozess

Ablauf einer Messung

Fall 1: Atom anfänglich im Zustand $|\uparrow\rangle$

Am Ende der Messung:



Zustand am Ende der Messung

$$|\psi_0\rangle = |\uparrow\rangle \cdot |Z_{\uparrow}; r_{\uparrow}\rangle$$

Atom Zeiger zeigt \uparrow an

Der quantenmechanische Messprozess

Ablauf einer Messung

Fall 2: Atom anfänglich im Zustand $|\uparrow\rangle$

Ganz entsprechender Übergang:

$$|\downarrow\rangle|Z_0; r_0\rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle|Z_\downarrow; r_\downarrow\rangle$$

Messproblem in der Quantenmechanik

Nach dem Superpositionsprinzip:

Das Atom muß sich nicht in einem der Zustände $|\uparrow\rangle$ oder $|\downarrow\rangle$ befinden, sondern es kann in einer beliebigen Superposition

$$a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

mit $|a|^2 + |b|^2 = 1$ sein.

→ Anfangszustand Atom + Messgerät

$$|\psi_0\rangle = [a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle] |Z_0; r_0\rangle$$

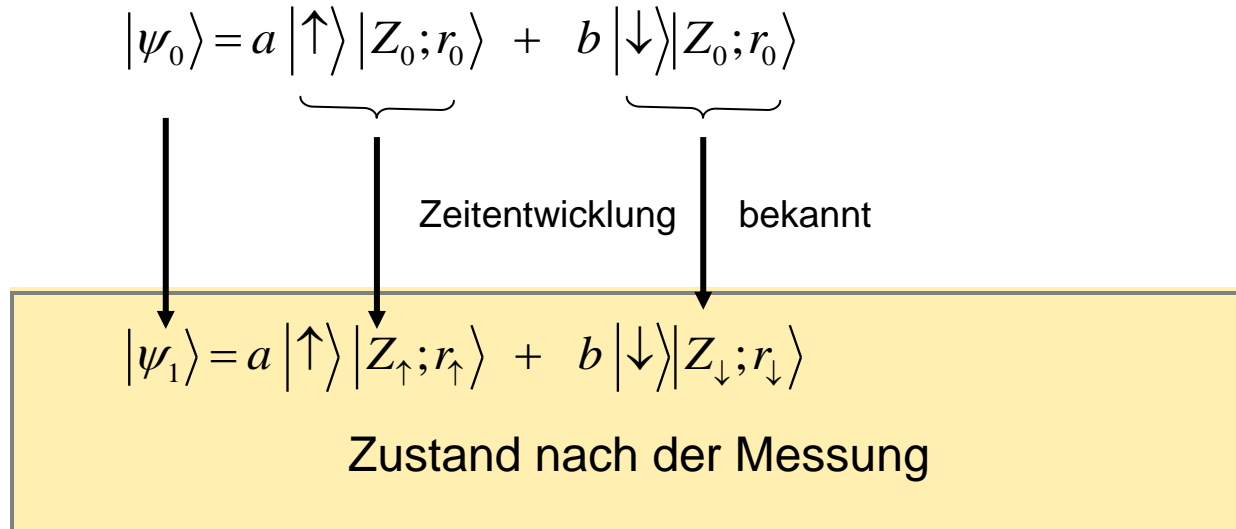
Zustand nach der Messung: **???**

Messproblem in der Quantenmechanik

Zustand nach der Messung

Der Zustand nach der Messung ist durch die **Linearität der quantenmechanischen Zeitentwicklung** eindeutig festgelegt:

Die einzelnen Komponenten einer Superposition entwickeln sich **unabhängig** voneinander.



→ Wieder ein Superpositionszustand klassisch sich ausschließender Alternativen

Messproblem in der Quantenmechanik

Zustand nach der Messung

$$|\psi_1\rangle = a |\uparrow\rangle |Z_\uparrow; r_\uparrow\rangle + b |\downarrow\rangle |Z_\downarrow; r_\downarrow\rangle$$

Zustand nach der Messung

Dies ist ein verschränkter Zustand.

(Kriterium: lässt sich nicht als Produkt $|\psi_{\text{Atom}}\rangle \cdot |\psi_{\text{Messgerät}}\rangle$ schreiben)

Messproblem in der Quantenmechanik

Zustand nach der Messung

$$|\psi_1\rangle = a |\uparrow\rangle |Z_\uparrow; r_\uparrow\rangle + b |\downarrow\rangle |Z_\downarrow; r_\downarrow\rangle$$

Zustand nach der Messung

Folgerungen:

- Das Messgerät zeigt keinen eindeutigen Wert an!
- Der Zeiger befindet sich in einem **makroskopischen Superpositionszustand** (wie Schrödingers Katze)

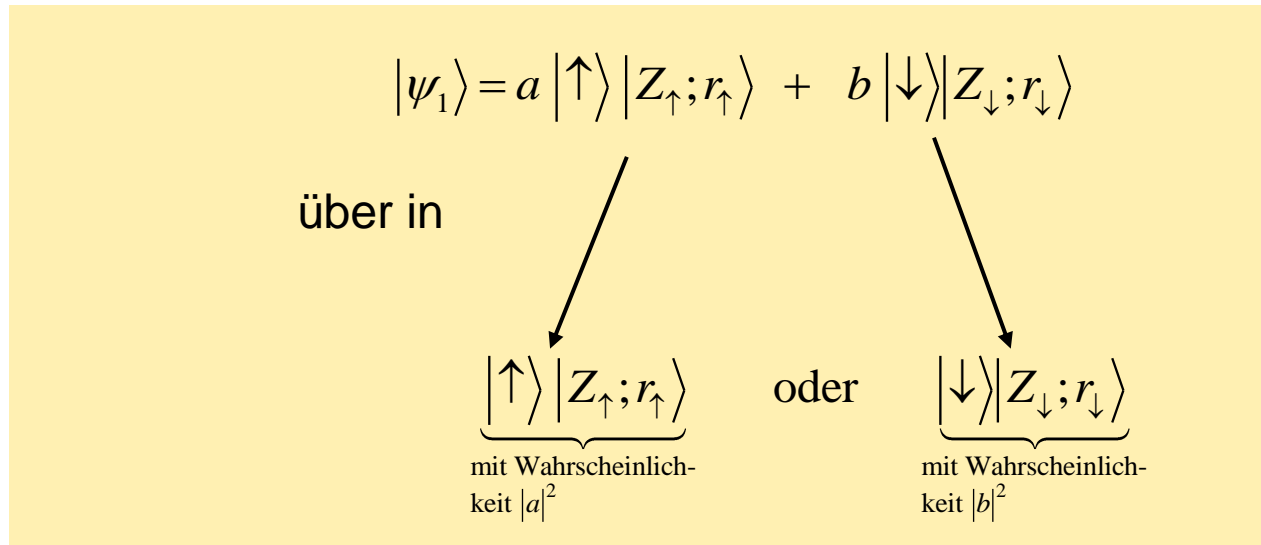
→ Messproblem der Quantenmechanik



Messproblem in der Quantenmechanik

Von Neumanns Ausweg: Zustandsreduktion

Zustandsreduktion: Bei einer Messung geht der Zustand



- Nach von Neumann erfolgt der Übergang abrupt und in stochastischer Weise.
- Nach der Reduktion: Atom und Messgerät befinden sich in wohldefinierten Zuständen.

Messproblem in der Quantenmechanik

Kritik an der Zustandsreduktion:

- Der Prozeß kann **nicht** mit Hilfe der Schrödingergleichung beschrieben werden.
- Nach der von Neumannschen Theorie gibt es also **zwei unabhängige Dynamiken** in der Quantenmechanik.
- Hängen die Naturgesetze wirklich davon ab, ob ein Prozeß eine Messung ist?
- Wodurch genau ist eine Messung charakterisiert?

Dekohärenz

Problem sowohl bei Schrödingers Katze als auch beim Meßprozeß:

Superpositionen makroskopisch verschiedener Zustände

Sie werden in der Natur nicht beobachtet. Warum?

Dekohärenz

Zeh (1970), Zurek (1981, 1991),

Caldeira & Leggett (1983), Joos & Zeh (1985), Gell-Mann & Hartle (1990)

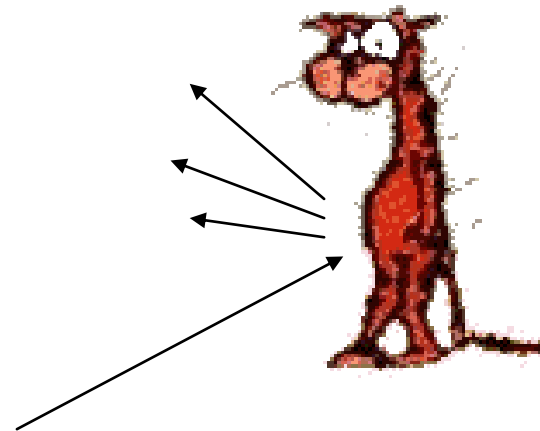
Dekohärenz

Grundgedanke der Dekohärenz:

Ein Objekt kann nie isoliert von seiner **natürlichen Umgebung** betrachtet werden.

Beispiele:

- Die Katze streut einfallendes Licht (man kann sie sehen)
- Sie beeinflusst die sie umgebenden Luftmoleküle
- Sie gibt Wärmestrahlung ab.



Dekohärenz

Grundgedanke der Dekohärenz:

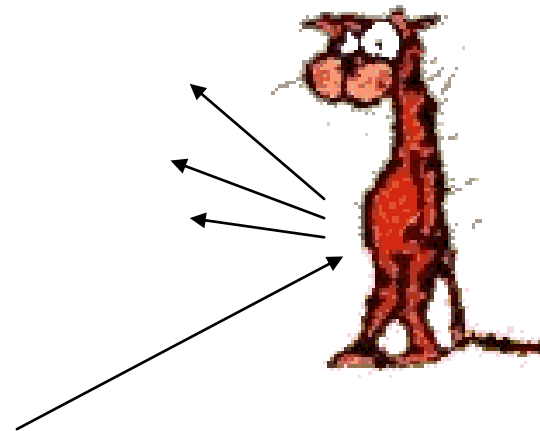
Ein Objekt kann nie isoliert von seiner **natürlichen Umgebung** betrachtet werden.

Makroskopische Objekte können der Wechselwirkung mit ihrer Umgebung nicht entgehen.

Sie müssen als **offene Systeme** betrachtet werden, die mit der Außenwelt wechselwirken.

Der entscheidende Umstand ist:

Die lebende Katze beeinflusst die Umgebung in anderer Weise als die tote.



Dekohärenz

Einbeziehen der Umgebung

Wie vorher: Die Katze wird beschrieben durch die Zustandsvektoren

$$\begin{aligned} |\text{☺}\rangle &\hat{=} \text{ lebendig} \\ |\text{☹}\rangle &\hat{=} \text{ tot.} \end{aligned}$$

Hinzu kommt: Beschreibung der Umgebung:

z.B.

$$\begin{aligned} |\leftrightarrow\rangle &= |\text{Luft}_1\rangle |\text{Luft}_2\rangle |\text{Luft}_3\rangle \dots && \text{(Luftmoleküle)} \\ &\times |\text{Photon}_1\rangle |\text{Photon}_2\rangle |\text{Photon}_3\rangle \dots && \text{(Photonen)} \end{aligned}$$

Im allgemeinen: sehr viele Freiheitsgrade ($\cong 10^{23}$)

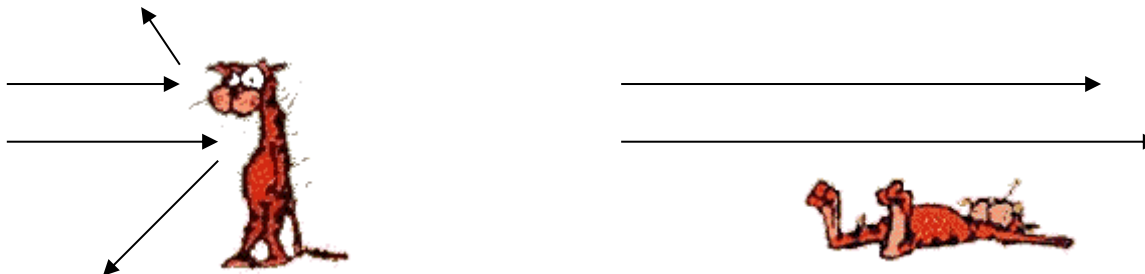
Dekohärenz

Die Tatsache, dass lebende und tote Katzen die Umgebung jeweils anders beeinflussen, wird ausgedrückt durch:

lebendig: $|\text{😊}\rangle \longleftrightarrow |\text{↕}\rangle$

tot: $|\text{☹}\rangle \longleftrightarrow |\text{↔}\rangle$

Beispiel: Gestreute Gasmoleküle



Dekohärenz

Zur Erinnerung:

Der problematische Zustand der Katze war der makroskopische Superpositionszustand aus lebendiger und toter Katze:

$$|\psi_K\rangle = a |\text{☺}\rangle + b |\text{☹}\rangle$$

(Probleme mit Interferenzthemen)

Dekohärenz

Zur Erinnerung:

Der problematische Zustand der Katze war der makroskopische Superpositionszustand aus lebendiger und toter Katze:

$$|\psi_K\rangle = a |\text{☺}\rangle + b |\text{☹}\rangle$$

(Probleme mit Interferenzthemen)

Mit Umgebung:

Bezieht man die Umgebung in die Beschreibung ein, entspricht jeder Komponente der Superposition ein anderer Umgebungszustand.

Zustand Katze + Umgebung

$$|\psi_{K+U}\rangle = a |\text{☺}\rangle |\uparrow\rangle + b |\text{☹}\rangle |\leftrightarrow\rangle$$

Dekohärenz

Quantitative Auswirkungen

Messung einer Katzen – Observablen D , z.B. Katzennasen – Höhe

Mittelwert im Zustand $|\psi_{K+U}\rangle \rightarrow$ **Interferenzterme verschwinden**

$$\begin{aligned} \langle D \rangle &= |a|^2 \langle \text{☺} | D | \text{☺} \rangle \cdot \underbrace{\langle \uparrow | \uparrow \rangle}_{=1} \\ &+ |b|^2 \langle \text{☹} | D | \text{☹} \rangle \cdot \underbrace{\langle \leftrightarrow | \leftrightarrow \rangle}_{=1} \\ &+ a^* b \langle \text{☺} | D | \text{☹} \rangle \cdot \underbrace{\langle \uparrow | \leftrightarrow \rangle}_{\approx 0} \\ &+ a b^* \langle \text{☹} | D | \text{☺} \rangle \cdot \underbrace{\langle \leftrightarrow | \uparrow \rangle}_{\approx 0} \end{aligned}$$

„klassische Terme“

Interferenzterme

Dekohärenz

Quantitative Auswirkungen

Messung einer Katzen – Observablen

Mittelwert im Zustand $|\psi_{K+U}\rangle$

$$\langle D \rangle = |a|^2 \langle \odot | D | \odot \rangle$$

$$+ |b|^2 \langle \ominus | D | \ominus \rangle$$

~~$$+ a^* b \langle \odot | D | \ominus \rangle \cdot \underbrace{\langle \uparrow | \leftarrow \right\rangle}_{\approx 0}$$~~

~~$$+ a b^* \langle \ominus | D | \odot \rangle \cdot \underbrace{\langle \leftarrow | \uparrow \rangle}_{\approx 0}$$~~

Interferenz-
terme

Warum ist das Skalarprodukt ≈ 0 ?

- Produkt aus $\approx 10^{23}$ Faktoren, die alle betragsmäßig ≤ 1 sind.
- Falls nur ein Faktor null ist, ist es das ganze Produkt
- Falls jeder Faktor nur etwas kleiner als 1 ist, ist das Produkt so gut wie Null:

$$(0,999)^{10^{23}} \approx e^{-10^{20}} \approx 0.$$

Dekohärenz

Ergebnis mit Dekohärenz:

$$\langle D \rangle = |a|^2 \langle \text{☺} | D | \text{☺} \rangle + |b|^2 \langle \text{☹} | D | \text{☹} \rangle$$

Keine Interferenz zwischen lebendiger und toter Katze:

Dekohärenz

Das Ergebnis ist als **klassischer Mittelwert** interpretierbar.

Dekohärenz

Zusammenfassung des Dekohärenz-Mechanismus:

- Vernachlässigt man die Wechselwirkung mit der natürlichen Umgebung, treten Probleme mit makroskopischen Superpositionszuständen auf.
- Realistische Beschreibung: mit Einfluss der Umgebung
→ keine quantenmechanische Interferenz feststellbar, entsprechend der Erfahrung
- Makroskopische Objekte verhalten sich **effektiv klassisch**.
- Dekohärenz:
Übergang Quantenmechanik → klassische Physik
- Aber:
Unter entsprechenden Bedingungen (Isolierung von der Umgebung):
Quanteninterferenz auch für relative große Systeme möglich

Ausblick

Der Unterrichtsgang in milq ist noch relativ stark an den traditionellen Inhalten orientiert (Photoeffekt, Elektronenbeugung, Doppelspalt).

Derzeit in Entwicklung :

QuaNTH

Online-Kurssystem zu den Themen Quantenphysik und Quanteninformation

(T. Franz, TU Braunschweig)

The screenshot shows the QuaNTH website interface. On the left is a navigation sidebar with links for 'Hauptseite', 'Kursliste', 'Kontakt', 'Letzte Änderungen', 'Hilfe', 'Werkzeuge', 'Links auf diese Seite', 'Änderungen an verlinkten Seiten', 'Spezielseiten', 'Druckversion', 'Permanenter Link', and 'Editieren'. The main content area displays the article 'A2/Das Bellsche Theorem'. The article text discusses the Bell's theorem, mentioning properties of a theory, experimental data, classical descriptions, and locality. It also mentions the EPR paradox and the work of Einstein, Podolsky, and Rosen in 1935. On the right side of the article, there is a sidebar with a 'Korrelation Einführung' section, a 'Lektionen' section with a list of links including 'Eine Geschichte', 'Diskussion der Geschichte', 'Das Bellsche Theorem', 'Vorstellungen über Verschränkung', 'Das Quanten-FAQ', and 'Zusammenfassung', and a 'Verknüpfungen' section. At the top right of the page, there are buttons for 'Anmelden', 'Seite', and 'Suchen'.

Ausblick

In QuaNTH:

- Konsequente Orientierung an **zeitgenössischen Themen** aus der Quantenmechanik (z. B. Quanteninformation)
- **Moderne Interpretation** der Quantenmechanik, von historischem Ballast befreit (Minimalinterpretation)
- derzeit: Hochschulniveau, aber der Blick richtet sich auch auf die Schule

QuaNTH – Prinzipien:

Statistik

- Die Quantenmechanik ist eine statistische Theorie
- Aussagen beziehen sich auf Präparation und Messung.
- Einzelne Messergebnisse sind praktisch nie vorhersagbar.
- Beschreibung von individuellen Quanten-Teilchen ist nicht möglich (Bell-Theorem).

Lokalität

- Es gibt keine instantane Signalübertragung.

Unbestimmtheit

- Es gibt keinen Zustand eines Systems, der deterministische Vorhersagen für jede Messung liefert.
- Zufall kann in der QM nicht auf Unkenntnis einer präziseren Beschreibung zurückgeführt werden.

Keine Messung ohne Störung

- Jede Wechselwirkung, die Information über einen unbekanntem Quantenzustand liefert, induziert eine quantifizierbare Störung.

Verschränkung

- Zusammengesetzte Quantensysteme zeigen Korrelationen, die nicht mit klassischen Modellen zu erklären ist.