

Über die Welt der Quantentheorie

Franz Embacher

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/>
franz.embacher@univie.ac.at

Fakultät für Physik
Universität Wien



Vortrag am Veranstaltungstag
im Rahmen der Eröffnung der Ausstellung
Das DING
[G.A.S-station](#), Berlin, 9. Oktober 2010

Die Dinge und ihre Eigenschaften

Jedes Ding hat Eigenschaften,

- die es von anderen Dingen **unterscheiden**
- und die seinen **Zustand** charakterisieren.

Im Rahmen der Physik nennen wir solche Eigenschaften **Messgrößen** (Observablen).

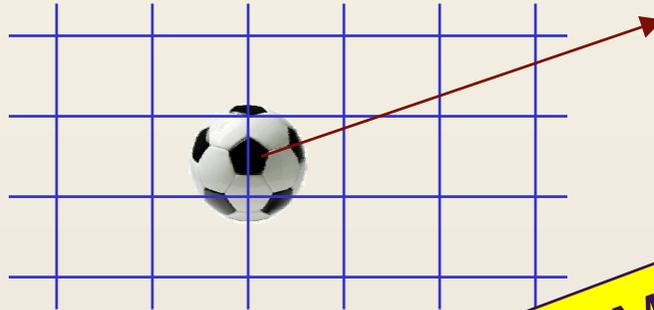
Zumindest **glauben** wird das, weil es unserer Alltagserfahrung entspricht. Wir haben es vom Beginn der Physik bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts geglaubt.

Aber diese Erfahrung trügt....



Die Dinge und ihre Eigenschaften

Beispiel:



Dieses Fußball ist ein ganz normales Fußball. Er befindet sich an einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort und bewegt sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit.

Die Quantentheorie sieht die Dinge anders!
In der Welt der Photonen, Atome und Moleküle gilt das nicht mehr!

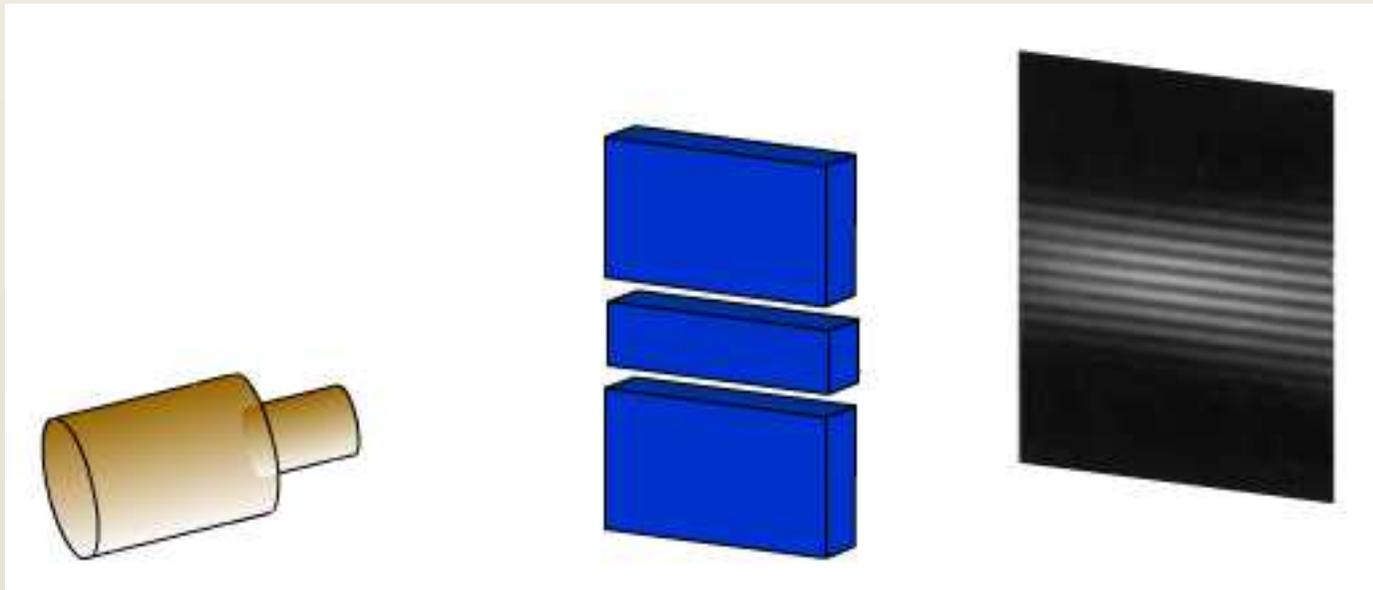


andere Fußbälle...



Die Quantentheorie – die Vorgeschichte

- **Christiaan Huygens** (um 1650): Licht ist ein Wellenvorgang.
- **Thomas Young** (1802): Doppelspaltexperiment
Verstärkung und Auslöschung (Interferenz):



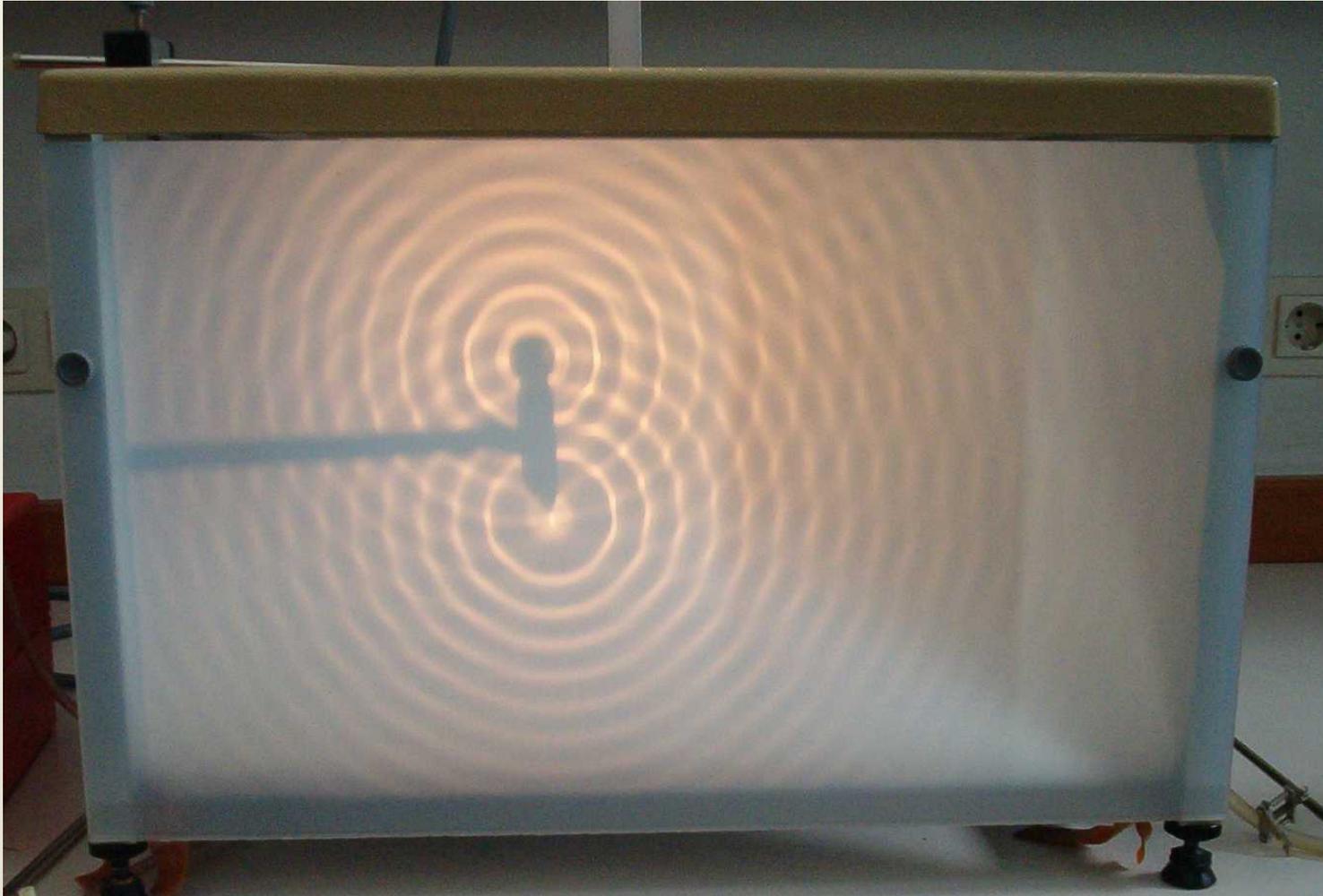
Lichtquelle

Doppelspalt

Streifenmuster



Die Quantentheorie – die Vorgeschichte



Wellenwanne

http://cojobo.net/~t_hildeb/Leistungskurs_13_PH/interferenz/wellenwanne02.jpg



Die Quantentheorie – wie es begann

- **Max Planck** (1900): Materie und Licht können Energie nur in Form von Energiepaketen („**Quanten**“) austauschen.
- **Albert Einstein** (1905): Licht besteht aus Teilchen (**Photonen** oder „Lichtquanten“)
- **Niels Bohr** (1913): Erklärung von Atomspektren
- **Lous de Broglie** (1924): Teilchen haben Welleneigenschaften:

Teilchen \longrightarrow Welle („Wellenfunktion“)

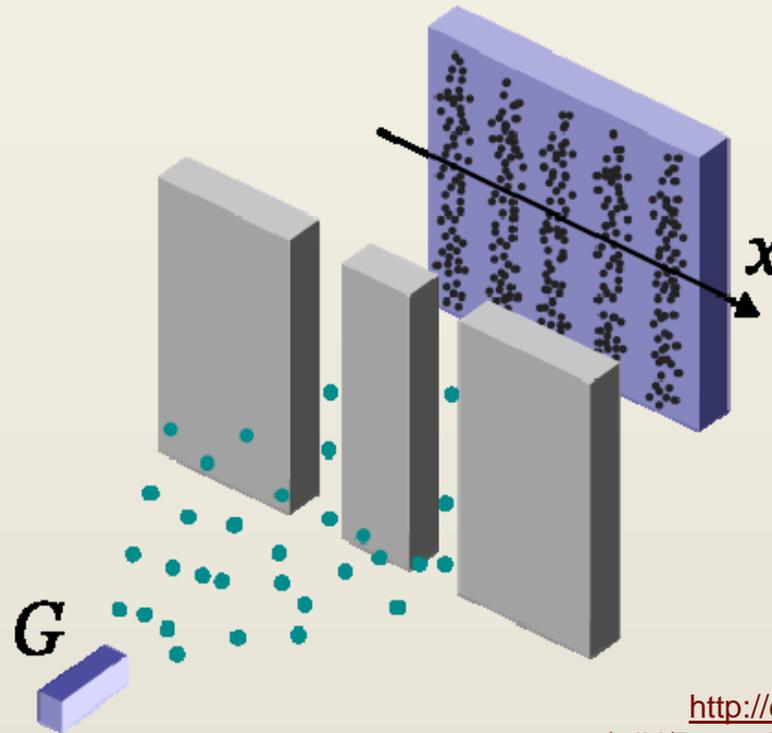
- **Max Born** (1926): Wahrscheinlichkeitsinterpretation

Intensität der „Welle“ \longleftrightarrow Wahrscheinlichkeit



Die Quantentheorie – wie es begann

Doppelspaltexperiment
mit **einzelnen Photonen**



<http://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment>

Intensität der
„klassischen Lichtwelle“



Auftreff-Wahrscheinlichkeit
für das einzelne Photon



Die Quantentheorie – einige Stationen

- **Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, John von Neumann,...**: mathematischer Formalismus, Axiome → Quantentheorie in ihrer heutigen Form, Erklärung der Stabilität und Strahlungseigenschaften der Atome
 - **Richard Feynman,...**: Quantenelektrodynamik, Teilchenphysik auf der Basis der Quantentheorie. Die **gesamte Natur** scheint „quantenmechanisch“ zu funktionieren! (Aktuelles Problem: Gravitation)
- Quantentheorie als eine „Meta-Theorie“ („Gestaltungsprinzip“ für physikalische Theorien)



Quanteninformation

- **John Bell** (1960er), **Alain Aspect** (1970er), **Anton Zeilinger** (1990er, 2010er),....:
Erneutes Interesse an den Grundlagen der Quantentheorie, neue technologische Anwendungen (Nichtlokalität, Quantenteleportation, Quantenkryptografie, Quantencomputer,...)

Zentrale Idee:

Überlagerung von
Wellen



Überlagerung von
„Möglichkeiten“

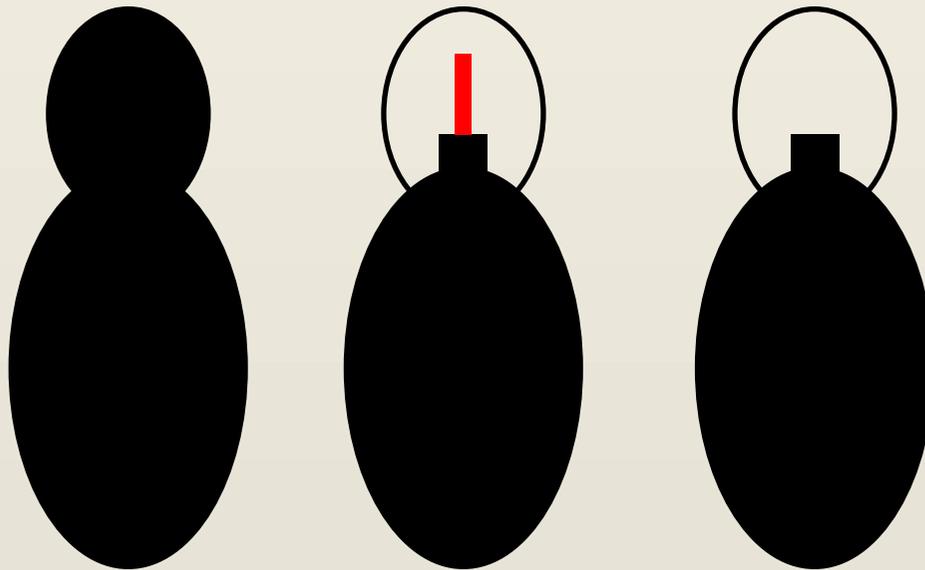
Was bedeutet das?



Das Bombenexperiment

Einstieg in die Quantentheorie ohne Formeln

- Der Elitzur-Vaidman-Bombentest *)



*) Avshalom Elitzur and Lev Vaidman,
*Quantum mechanical interaction-free
measurements*, Found. Phys. 23, 987-97
(1993), [arxiv:hep-th/9305002](https://arxiv.org/abs/hep-th/9305002)



Das Bombenexperiment

Was lernen wir daraus?

- Falls scharfe Bombe entdeckt wurde – **womit** haben wir eigentlich hingeschaut, wenn doch das Photon gar nicht bei der Bombe war?!?

→ **Nichtlokalität!**

- Die Eigenschaft (Messgröße) „**Weg**“ hat zwei möglich Ausprägungen (Werte): „oben“ und „unten“. Im Fall der defekten Bombe hat diese Messgröße keinen „scharfen Wert“! Sie ist „unscharf“ (besser: „**unbestimmt**“)!

→ **Wie real ist die Realität?**



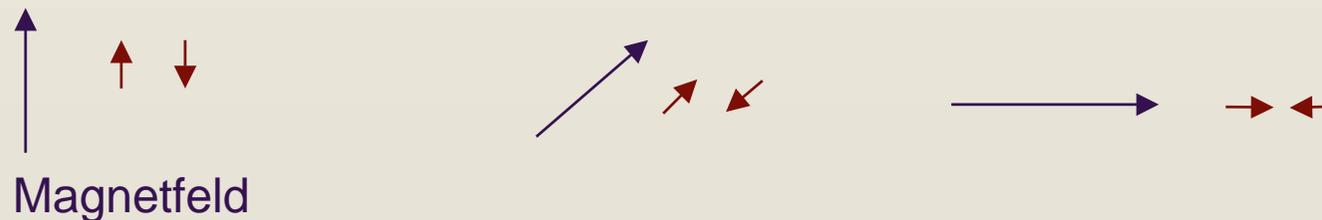
Polarisation und Spin (Two-Level-Systems)

- Teilchen mit Polarisation (Photonen)



Mögliche Ausprägungen: „**absorbiert**“ und „**durchgelassen**“

- Teilchen mit Spin $\frac{1}{2}$ (Elektronen,...)



Mögliche Ausprägungen: „**in**“ und „**gegen**“ Feldrichtung



Gickse

Quantenobjekte, Messung, Verschränkung,
Unbestimmtheit und Teleportation anhand von...

...Quanten-Gicksen!



Teilchen mit Polarisation
(Photonen) oder Spin $\frac{1}{2}$!



Gickse

Teleportation in Bildern



Gickse

Was lernen wir daraus?

- Manche Eigenschaften von Quantenobjekten sind **unbestimmt**. Die möglichen Ausprägungen („Messwerte“) sind irgendwie „gleichzeitig“ vorhanden (wie die Teilwellen einer **Welle!**).
- Eine **Messung** verändert den Zustand.
- **Verschränkung** hat paradoxe Züge.
- Teleportation funktioniert nicht „instantan“, sondern benötigt „normale“ Kommunikation.



Gickse

Kann der klassische Realitätsbegriff gerettet werden?

Manche Eigenschaften von Quantenobjekten sind **unbestimmt**, d.h. sie **stehen**, wenn sie nicht gemessen werden, **nicht fest!**

Einwand (EPR, 1935): Vielleicht sind diese Eigenschaften nicht wirklich **unbestimmt**, sondern lediglich **unbekannt!**?
→ verborgene Parameter?



Gickse

Beispielsweise



gesteuert von einer
unbekannten, aber
realen Größe?



Quantenspiel

Das Quantenspiel:

- 3 Kandidaten. Jeder Kandidat bekommt **eine** von zwei möglichen Fragen:

- **Geschmacksfrage**
mögliche Antworten: süß (+1) oder sauer (-1)
- **Temperaturfrage**
mögliche Antworten: heiß (+1) oder kalt (-1)

- Aufgabe:

- Falls **G T T** oder **T G T** oder **T T G**,
soll das Produkt der Antworten **+1** sein!
- Falls **G G G**,
soll das Produkt der Antworten **-1** sein!



Quantenspiel

Ein bisschen Mathematik:

die g's und t's sind alle +1 oder -1

- Die Strategie:

$(g_1, t_1), (g_2, t_2), (g_3, t_3)$

- Falls **G T T** oder **T G T** oder **T T G**:

$$g_1 t_2 t_3 = +1$$

$$t_1 g_2 t_3 = +1$$

$$t_1 t_2 g_3 = +1$$

$$\rightarrow g_1 g_2 g_3 = +1$$

- Falls **G G G**:

$$g_1 g_2 g_3 = -1$$

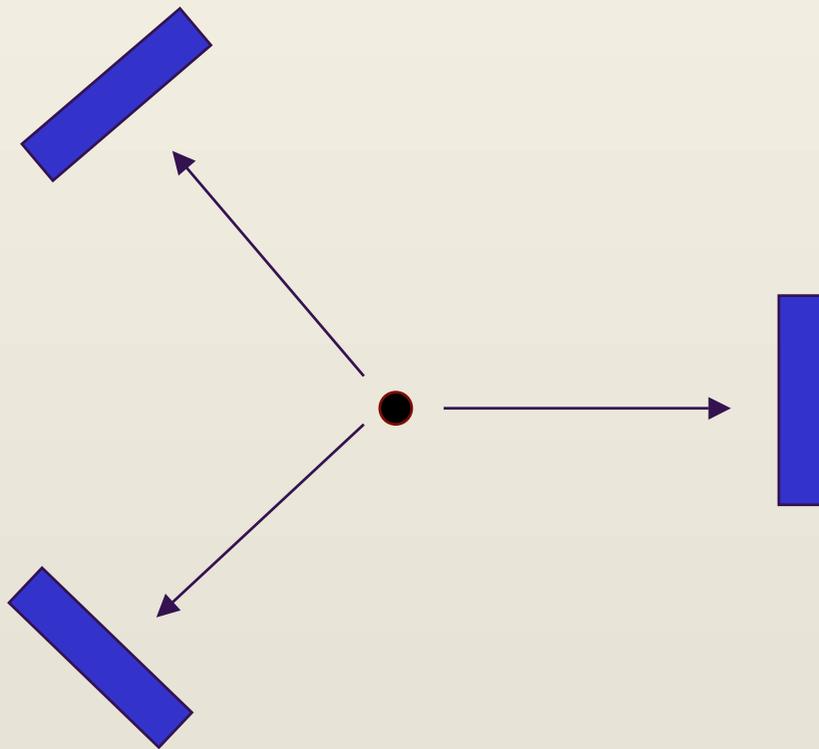
- Widerspruch! \rightarrow Es **gibt keine** sichere Strategie!

Aber Photonen und Teilchen mit Spin können dieses Kunststück!



Quantenspiel

Drei verschränkte Teilchen



„GHZ-Zustand“

G und T entsprechen
Messungen von
Polarisationen mit
unterschiedlich
ausgerichteten
Polarisatoren.



Quantenspiel

Was lernen wir daraus?

- Die Annahme, dass die quantenmechanische **Unbestimmtheit** (d.h. die Unsicherheit der „Antwort“ auf eine Messung) nur eine **Unkenntnis** ist, entspricht einer sicheren Strategie! Es gibt aber keine sichere Strategie.

→ Es gibt keine „verborgenen Parameter“!

Also gibt es Größen in der Natur, die tatsächlich „**unbestimmt**“ sind?

Einzig verbleibender Ausweg: exotische Interpretationen (nichtlokale Wechselwirkung, viele Welten,...)



Identische Teilchen

Jedes Ding hat Eigenschaften,

- die es von anderen Dingen **unterscheiden**
- und die seinen **Zustand** charakterisieren.

Der nächste Skandal:

Elementarteilchen desselben Typs sind **ununterscheidbar**, besitzen also **keine Individualität!**



Quantenkryptografie

Alice und Bob wollen verschlüsselte Nachrichten austauschen! Dazu brauchen sie einen geheimen „Schlüssel“:

- Alice erzeugt eine Zufallsfolge von Photonen



- Bob misst mit zufälligen Polarisatorstellungen
„absorbiert“ = 0, durchgelassen = 1



- Alice und Bob vergleichen (öffentlich) die verwendeten Polarisatorstellungen → gemeinsamer Schlüssel:

1 1 0 ✕ ✕ 0 1 1 ✕ 0 0 1 ✕



Quantenkryptografie

- Alice will Bob eine Nachricht schicken:

Klartext: 0 1 1 0 0 1 1 0 1 ...

Schlüssel: 1 1 0 0 1 1 0 0 1 ...

Summe: 1 0 1 0 1 0 1 0 0 ...

→ kann öffentlich übertragen werden!

- Bob entschlüsselt:

Geheimtext: 1 0 1 0 1 0 1 0 0 ...

Schlüssel: 1 1 0 0 1 1 0 0 1 ...

Summe: 0 1 1 0 0 1 1 0 1 ...

→ ist der Klartext!



Quantencomputer

- Richard Feynman, David Deutsch: Parallelrechnung in den Zweigen („Partialwellen“) einer Überlagerung
- Beispiel: Wie viele Ablesungen sind nötig, um eine Nummer in einem Telefonbuch einer Millionenstadt zu finden?

$$\begin{array}{ccc} \text{cl ... 500000} & / & \text{qu ... 1000} \\ \nearrow & & \nearrow \\ \frac{1 \text{ Million}}{2} & & \sqrt{1 \text{ Million}} \end{array}$$



Und wieso sieht die makroskopische Welt klassisch aus?

- Schrödingers Katze („makroskopische Superpositionen“)
- Die **Umgebung** gewinnt „Information“ über ein **System** (was effektiv eine **Messung** des Systems durch die Umgebung darstellt).
- Wird die Umgebung ignoriert, so **erscheint** das System klassisch („Dekohärenz“):

quantenmechanische
Überlagerung
(Unbestimmtheit)



verhält sich in der
makroskopischen
Welt wie

klassische
Alternativen
(Unkenntnis)



Danke...

... für Ihr Aufmerksamkeit!

Diese Präsentation finden Sie im Web unter

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/dasDing/>