

Der klassische Grenzfall - Dekohärenz

Lisa Carow Fabian Holling

14. Januar 2016

Motivation

- Warum sehen wir (physikalisch) klassische Systeme?
- Wie und wann entstehen klassische Eigenschaften?
- Sind kl. Eigenschaften intrinsische Eigenschaften von Objekten?

Messprozess (bisher)

- Messprozess und "Kollaps" der Wellenfunktion
- Messung = Wechselwirkung zw. zwei Systemen (System und kl. Apparat)

Messprozess

- Messung = WW zweier Systeme
- Warum Sonderrolle der Messung? -> Beschreibung des Messprozesses als WW mit bestimmten Eigenschaften erscheint (naiv) logisch
- Bell 1990 in „Against 'measurement'“: „. . . the word has had such a damaging effect on the discussion, that I think it should now be banned altogether in quantum mechanics.“

Beschreibung der QM ohne Kollaps (bisher)

- De-Broeglie Bohm (zusätzliche „Führungsgleichung“)
- Everett (viele nicht messbare Welten/Verschränkung des Gesamtsystems)

Beschreibung der QM ohne Kollaps - Dekohärenztheorie

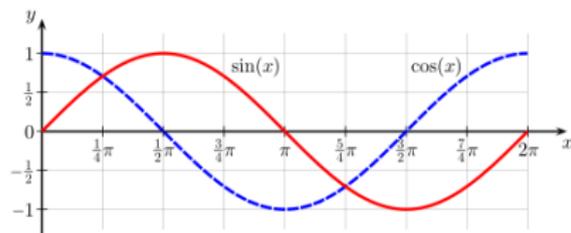
- Dekohärenz - von lat. *cohaerere* - zusammenhängen
- Lässt sich gut mit Everetttheorie vereinbaren
- Grundidee von 1929, jedoch bis 1970 nicht weiter beachtet (Es gab ja schließlich die Kopenhagener Interpretation)

Dekohärenz - Idee

- Die zu messenden Quantensysteme wechselwirken mit den Freiheitsgraden der Umgebung
- Quantensystem und Umgebung "gekoppelt"
- schon 1929 Mott als mögliche Erklärung für nicht erwartetes Verhalten von α -Teilchen in Nebelkammer entdeckt
- 1970 H.-Dieter Zeh: Prägt maßgeblich die Forschung, u.a. durch Einführung des Wortes „Dekohärenz“.

Exkurs: Was ist überhaupt *Kohärenz*?

- „Kohärenz“ = „Zusammenhang“

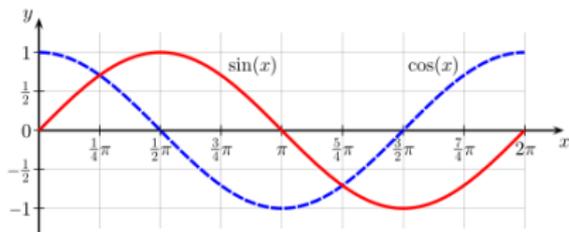


ebene Welle:

$$\begin{aligned}\psi &= e^{i(k \cdot r - \omega \cdot t)} \\ &= \cos(kr - \omega t) + i \cdot \sin(kr - \omega t)\end{aligned}$$

Exkurs: Was ist überhaupt *Kohärenz*?

- „Kohärenz“ = „Zusammenhang“
- physikalische Kohärenz: feste Phasenbeziehung („Ähnlichkeit“) zweier Wellen zueinander / einer Welle zu sich selbst

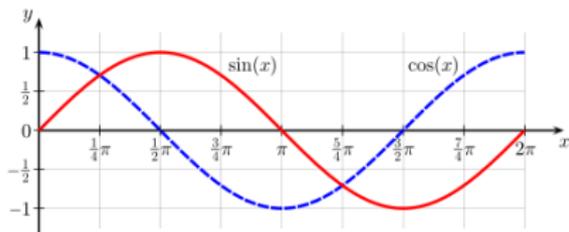


ebene Welle:

$$\begin{aligned}\psi &= e^{i(k \cdot r - \omega \cdot t)} \\ &= \cos(kr - \omega t) + i \cdot \sin(kr - \omega t)\end{aligned}$$

Exkurs: Was ist überhaupt Kohärenz?

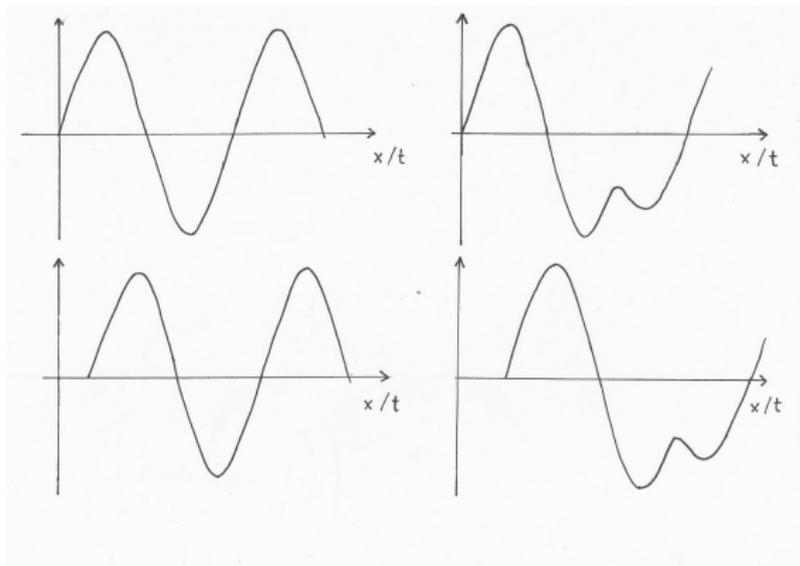
- „Kohärenz“ = „Zusammenhang“
- physikalische Kohärenz: feste Phasenbeziehung („Ähnlichkeit“) zweier Wellen zueinander / einer Welle zu sich selbst
- Phase: Argument der Wellenfunktion



ebene Welle:

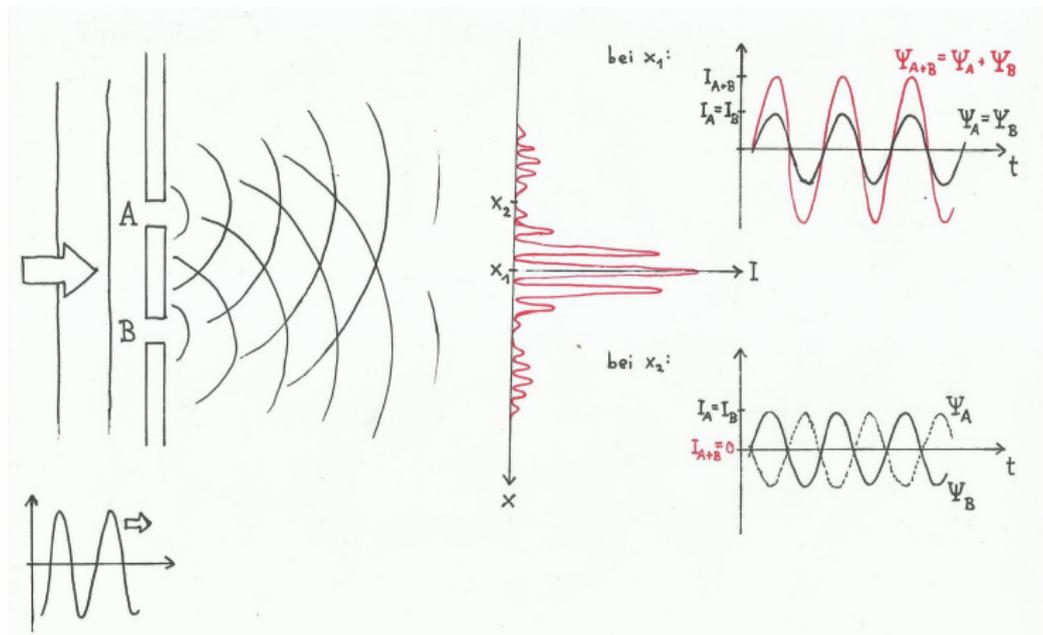
$$\begin{aligned}\psi &= e^{i(k \cdot r - \omega \cdot t)} \\ &= \cos(kr - \omega t) + i \cdot \sin(kr - \omega t)\end{aligned}$$

a) kohärente Welle:



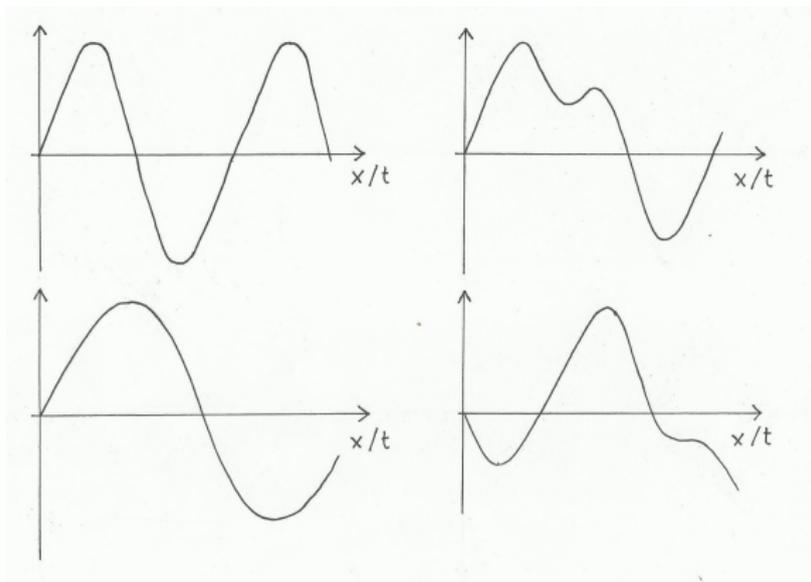
beide Fälle: fester Phasenverschub von ca. $\frac{\pi}{2}$

resultierende Superposition:

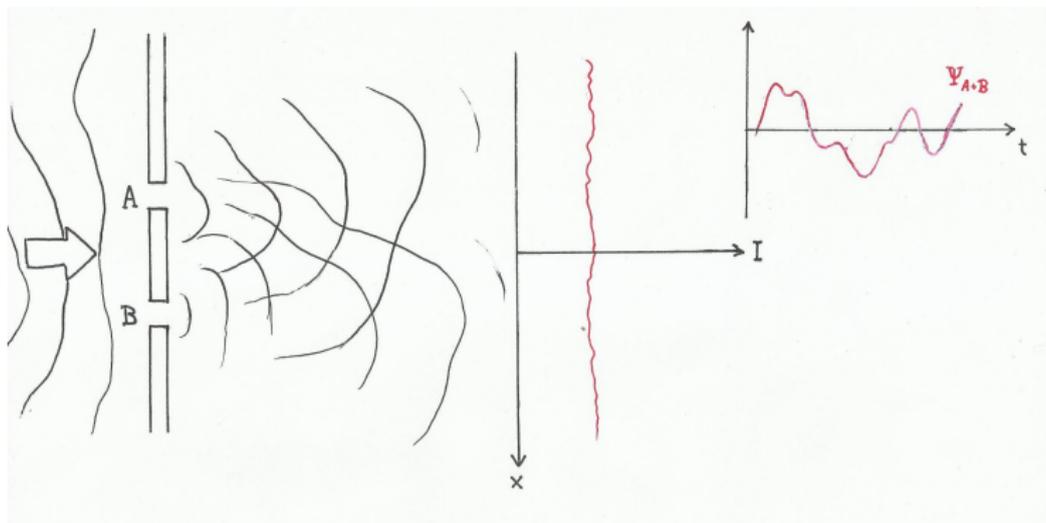


typisches Interferenzmuster (Interferenz = Superposition von *Wellen*)

b) inkohärente Welle:



resultierende Superposition:



keine *stationäre* Interferenz (kein Interferenzmuster)

Fazit

„Kohärenz = Fähigkeit zur Erzeugung von stationärer Interferenz“

...und Interferenz (Superposition) sorgt gerade für charakteristisch quantenmechanische Erscheinungen

Frage: Wieso verschwindet offensichtlich die Kohärenz der Wellenfunktion in vielen Fällen?

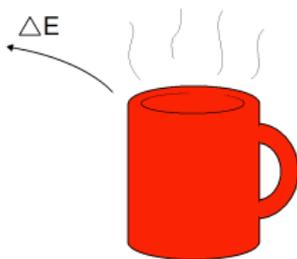
→ Wechselwirkungen mit Umwelt müssen berücksichtigt werden

Das Konzept „Umwelt“

- Umwelt hat eine Schlüsselrolle in Dekohärenztheorie inne
- ist Physikern bereits bekannt aus statistischer Physik
- Bsp.:



Was passiert?



- Tasse gibt Wärme(=Energie)menge ΔE ab
- Raum nimmt ΔE auf



- Tasse kühlt um eine ΔE entsprechende Temperatur ab
- Raum erwärmt sich um eine ΔE entsprechende Temperatur
- ABER: Temperaturerhöhung des Raums winzig, denn ΔE verteilt sich auf extrem viele Luftmoleküle des Raums („unendlich viele Freiheitsgrade“)

Zusammenfassung: Beschreibung eines offenen¹ Systems:

1. Betrachte System + Umwelt und ihre Wechselwirkung.

¹„offenes System“=System, das mit Umgebung wechselwirkt

Zusammenfassung: Beschreibung eines offenen¹ Systems:

1. Betrachte System + Umwelt und ihre Wechselwirkung.
2. Berechne, wie sich System und Umwelt verändern.

z. B. Tasse erkaltet um $\Delta T(\text{Tasse})$, Raum erwärmt sich um $\Delta T(\text{Raum})$

ABER: Änderung der Umwelt ist verschwindend gering (QM: nicht beobachtbar)!

z. B. $\Delta T(\text{Raum}) \ll \Delta T(\text{Tasse})$; die ausgetauschte Größe *dissipiert* in die Umwelt

¹„offenes System“=System, das mit Umgebung wechselwirkt

Zusammenfassung: Beschreibung eines offenen¹ Systems:

1. Betrachte System + Umwelt und ihre Wechselwirkung.
2. Berechne, wie sich System und Umwelt verändern.
z. B. Tasse erkaltet um $\Delta T(\text{Tasse})$, Raum erwärmt sich um $\Delta T(\text{Raum})$
ABER: Änderung der Umwelt ist verschwindend gering (QM: nicht beobachtbar)!
z. B. $\Delta T(\text{Raum}) \ll \Delta T(\text{Tasse})$; die ausgetauschte Größe *dissipiert* in die Umwelt
3. Ignoriere Änderung der Umwelt, betrachte nur das System.
z. B. indem man $\Delta T(\text{Raum})=0$ setzt; auf mathematischer Ebene: „Ausspuren der Umwelt aus der Dichtematrix“

¹„offenes System“=System, das mit Umgebung wechselwirkt

Wie sieht es in der QM aus?

	Stat. Physik		Quantenphysik
System:	Tasse Tee	→	„Quantensystem“
Umwelt:	Luftmoleküle	→	z. B. Photonen
Austausch:	Wärme	→	Phase der Wellenfunktion

Erinnerung: Phasenbeziehung \longleftrightarrow Kohärenz \longleftrightarrow Superposition

Übertragung auf die QM:

- Was bedeutet die „Dissipation der Phase(nbeziehung) in die Umwelt“ im QM-Fall?

Übertragung auf die QM:

- Was bedeutet die „Dissipation der Phase(nbeziehung) in die Umwelt“ im QM-Fall?
- Umwelt-Wellen (z. B. Photonen) kollidieren mit System-Wellenfunktion

Übertragung auf die QM:

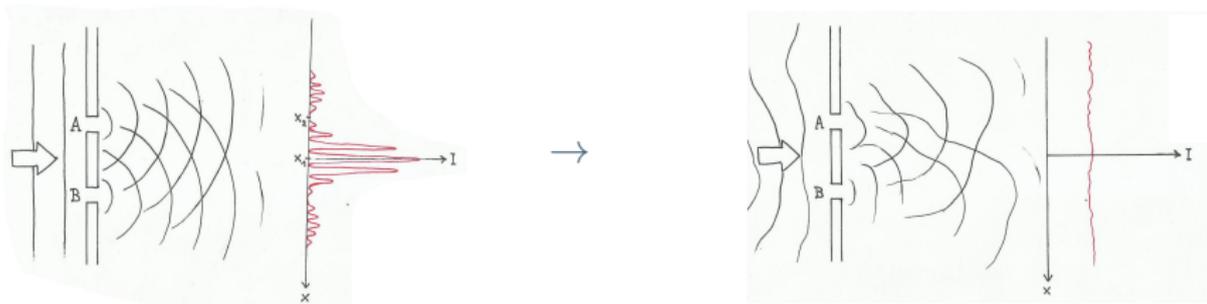
- Was bedeutet die „Dissipation der Phase(nbeziehung) in die Umwelt“ im QM-Fall?
- Umwelt-Wellen (z. B. Photonen) kollidieren mit System-Wellenfunktion
- Impulsaustausch:

$$\psi_S^{(vor)} = e^{i(k_S^{(vor)} r - \omega t)} \rightarrow \psi_S^{(nach)} = e^{i(k_S^{(nach)} r - \omega t)}$$

$$\psi_U^{(vor)} = e^{i(k_U^{(vor)} r - \omega t)} \rightarrow \psi_U^{(nach)} = e^{i(k_U^{(nach)} r - \omega t)}$$

(bei jeder Interaktion zwischen S und U)

Ergebnis: *im System keine Interferenz erkennbar* :



Superposition ist stattdessen auf das Gesamtsystem „System + Umwelt“ ausgeweitet!

Zeh²: Superposition wird „dislokalisiert“

²D. Zeh: *Dekohärenz und andere Quantenmißverständnisse*, 12.Juni 2009

Vorzugsbasis

- Wieso dekohärieren Systeme bzgl. einer best. Basis?

- Wieso dekohärieren Systeme bzgl. einer best. Basis?
 - Atom in Orbital/Energie-EZ (dislokalisiert)

- Wieso dekohärieren Systeme bzgl. einer best. Basis?
 - Atom in Orbital/Energie-EZ (dislokalisiert)
 - makroskop. Objekte in Orts-EZ (lokalisiert)

- Wieso dekohärieren Systeme bzgl. einer best. Basis?
 - Atom in Orbital/Energie-EZ (dislokalisiert)
 - makroskop. Objekte in Orts-EZ (lokalisiert)
- Berechnung der reduzierten Dichtematrix ergeben robusteste Basis

Vorzugsbasis

- Wieso dekohärieren Systeme bzgl. einer best. Basis?
 - Atom in Orbital/Energie-EZ (dislokalisiert)
 - makroskop. Objekte in Orts-EZ (lokalisiert)
- Berechnung der reduzierten Dichtematrix ergeben robusteste Basis
- diese ist Vorzugsbasis des Systems

klassisches Verhalten

- Erstmals 1985 von Joos und Zeh quantitativ berechnet: Lokalisierung von Objekten
- Bereits durch sehr schwache Kopplung Dekohärenz
- Beispiel: Staubkorn mit Radius 0.001 cm im Weltall. Allein durch kosmische Hintergrundstrahlung erscheint das Staubkorn lokalisiert
- Kiefer: „Dabei wird das Teilchen nicht etwa durch einen Stoß in seiner Bahn gestört; es ist vielmehr die Umgebung, die verändert wird. Die Wechselwirkung erzeugt nur eine Verschränkung mit der Hintergrundstrahlung; diese Verschränkung führt zur Dekohärenz. Verschränkung ist also nicht nur verantwortlich für die reinen Quanteneigenschaften eines Systems, sondern auch für die Entstehung klassischen Verhaltens.“

klassisches Verhalten nicht intrinsisch

- klassisches Verhalten ist keine Eigenschaft, die den Objekten per se innewohnt
- Dekohärenz läuft meist sehr schnell ab
- "scheinbarer Kollaps" (im Gegensatz zum "dynamischen Kollaps" der Schrödinger-Gleichung)

klassisches Verhalten nicht intrinsisch

- klassisches Verhalten ist keine Eigenschaft, die den Objekten per se innewohnt
- Dekohärenz läuft meist sehr schnell ab
- "scheinbarer Kollaps" (im Gegensatz zum "dynamischen Kollaps" der Schrödinger-Gleichung)

Experimente

- bestätigen theoretische Vorhersagen von bspw. Zeh und Joss (1985)
- zum Beispiel: die „Wiener Experimente“ mit Fullerenen („große“ Kohlenstoffmoleküle)

Dekohärenz und Everett-Interpretation

a) System + Messapparat:

$$|\uparrow\rangle |M_0\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle, \quad |\downarrow\rangle |M_0\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle$$

- Gesamtheit aus System + Messapparat wird betrachtet
- System in Eigenzustand $|\uparrow\rangle$ oder $|\downarrow\rangle$
- ideale Messung: Messapparat $|M\rangle$ zeigt Systemzustand an ohne ihn zu verändern

b) System in Superposition + Messapparat:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle$$

- Endzustand kann nicht mehr als Produkt geschrieben werden, z. B.

$$\begin{aligned} \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle &\neq (\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) (|M_\uparrow\rangle + |M_\downarrow\rangle) \\ &= \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \alpha |\uparrow\rangle |M_\downarrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle \end{aligned}$$

d. h. Messapparat $|M\rangle$ und System *verschränkt*

b) System in Superposition + Messapparat:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle$$

- Endzustand kann nicht mehr als Produkt geschrieben werden, z. B.

$$\begin{aligned} \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle &\neq (\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) (|M_\uparrow\rangle + |M_\downarrow\rangle) \\ &= \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \alpha |\uparrow\rangle |M_\downarrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle \end{aligned}$$

d. h. Messapparat $|M\rangle$ und System *verschränkt*

- Messapparat und System befinden sich gemeinsamer Superposition

b) System in Superposition + Messapparat:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle$$

- Endzustand kann nicht mehr als Produkt geschrieben werden, z. B.

$$\begin{aligned} \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle &\neq (\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) (|M_\uparrow\rangle + |M_\downarrow\rangle) \\ &= \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \alpha |\uparrow\rangle |M_\downarrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle \end{aligned}$$

d. h. Messapparat $|M\rangle$ und System *verschränkt*

- Messapparat und System befinden sich gemeinsamer Superposition
- solche makroskopischen Superpositionen werden aber nicht beobachtet!

b) System in Superposition + Messapparat:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle$$

- Endzustand kann nicht mehr als Produkt geschrieben werden, z. B.

$$\begin{aligned} \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle &\neq (\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) (|M_\uparrow\rangle + |M_\downarrow\rangle) \\ &= \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \alpha |\uparrow\rangle |M_\downarrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle \end{aligned}$$

d. h. Messapparat $|M\rangle$ und System *verschränkt*

- Messapparat und System befinden sich gemeinsamer Superposition
- solche makroskopischen Superpositionen werden aber nicht beobachtet!
- von Neumann: Gesamtzustand *kollabiert*

c) System in Superposition + Messapparat + Umwelt:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle |E_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle |E_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle |E_\downarrow\rangle$$

- Umwelt $|E\rangle$ wird mitverschränkt

c) System in Superposition + Messapparat + Umwelt:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle |E_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle |E_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle |E_\downarrow\rangle$$

- Umwelt $|E\rangle$ wird mitverschränkt
- Superposition des Systems wird auf Umwelt „abgewälzt“ („dislokalisiert“)

c) System in Superposition + Messapparat + Umwelt:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle |E_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle |E_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle |E_\downarrow\rangle$$

- Umwelt $|E\rangle$ wird mitverschränkt
- Superposition des Systems wird auf Umwelt „abgewälzt“ („dislokalisiert“)
 - Everett: Superposition ist der Messung daher nicht mehr zugänglich

c) System in Superposition + Messapparat + Umwelt:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle |E_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle |E_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle |E_\downarrow\rangle$$

- Umwelt $|E\rangle$ wird mitverschränkt
- Superposition des Systems wird auf Umwelt „abgewälzt“ („dislokalisiert“)
 - Everett: Superposition ist der Messung daher nicht mehr zugänglich
 - Dekohärenz: „Herausmitteln“ („Ausspuren“) der Umwelt \rightarrow klassische Erscheinung

Überblick: Drei Reichweiten des Superpositionsprinzips

a) System + Messapparat:

$$|\uparrow\rangle |M_0\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle, \quad |\downarrow\rangle |M_0\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle$$

b) System in Superposition + Messapparat:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle$$

c) System in Superposition + Messapparat + Umwelt:

$$(\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle) |M_0\rangle |E_0\rangle \rightarrow \alpha |\uparrow\rangle |M_\uparrow\rangle |E_\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle |M_\downarrow\rangle |E_\downarrow\rangle$$

Fazit: Dekohärenz vs. Everett-Interpretation

- nehmen Universalität der QM (des Superpositionsprinzips) an
- Everett:
 - schon für ein Umwelt-Teilchen spaltet sich die gesamte Welt in Komponenten einer umfassenden Superposition auf
 - d. h. wir sind in der Superposition mit enthalten
 - daher Superposition prinzipiell unbeobachtbar
 - Problem: Wahrscheinlichkeitsinterpretation
- Dekohärenz:
 - erklärt klassisches Erscheinen mit Statistik
 - ermöglicht Wahrscheinlichkeitsinterpretation
 - löst Problem der Vorzugsbasis
bezüglich welcher Observablen spalten sich die Everett-Welten auf?

Zusammenfassung

- Dekohärenztheorie aktueller Stand der Forschung
- Wechselwirkung mit Umwelt und Messprozess sind QM zu beschreiben
- Das System und die Umgebung sind verschränkt



- Verschränkung und insb. Dekohärenz ist im Fokus der Forschung
- Im physikalischen Alltag von Interesse, bspw. für Quantencomputer
- Kann aber auch Fragen wie: „Superposition von QM Zuständen im Gehirn?“ beantworten