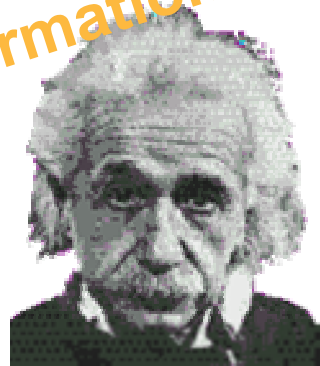


Thomas Görnitz  
FB Physik der J. W. Goethe-Universität Frankfurt/Main

**Vorläufig!**  
**nur zur privaten Information**

# Einstein und die Quanten



**Die Folgen für unser Weltbild  
und für unsere Technik**

Arnoldshain, den 2. 12. 2005

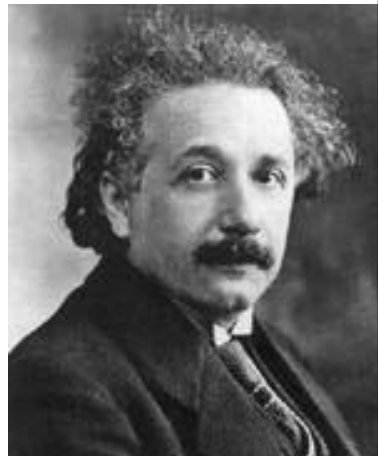
© B. und Th. Görnitz

1

## Albert Einstein

1879 – 1955

- 1905  
Annus mirabilis:
  - Spezielle Relativitätstheorie
  - Lichtquantenhypothese
- 1914-16  
Allgemeine Relativitätstheorie,  
Mathematische Modelle des Kosmos
- 1920 Nobelpreis für Physik



© B. und Th. Görnitz

2

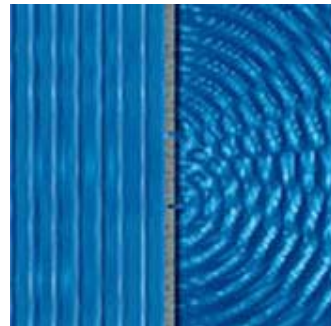
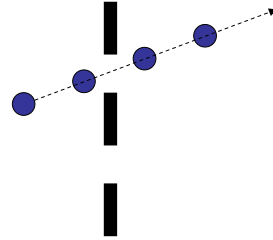
# Das Licht verstehen!

## Zur Geschichte des Lichtes

- **Newton**                      **Teilchen**
- **Huygens**                      **Wellen**
- **Maxwell**
- **Hertz**

# Teilchen – Welle

- Ein Teilchen ist in der klassischen Physik ein Massenpunkt mit einem wohlbestimmten Ort.
- Eine Welle ist in der klassischen Physik ein beliebig weit ausgedehntes Gebilde.



© B. und Th. Görnitz

# Licht

- **Wellen ist,**  
**„wenn etwas schwingt“**
- **Was schwingt beim Licht?**

© B. und Th. Görnitz

6

# Der Äther und seine verrückten Eigenschaften

Der Äther

- Starr – wegen der Polarisation  
(Transversalschwingungen)
- Reibungsfrei – wegen der  
ungebremsten Planetenbewegung

## Ein Markstein 1900

- **Max Planck**

(1858 – 1947)

Die Beschreibung  
der Entstehung  
von Licht

**Hypothese des  
Wirkungsquantums**



## Michelson-Experiment

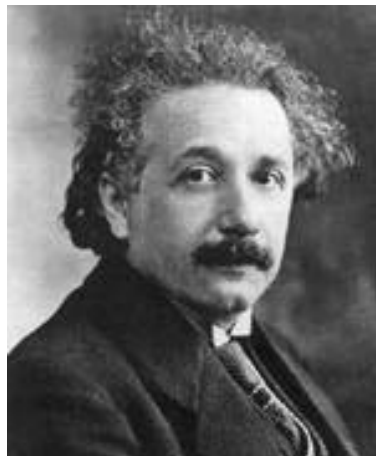
- Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Beobachter
- mathematische Vorarbeiten von Poincaré und Lorentz
- Licht kommt von beschleunigten Ladungen

© B. und Th. Görnitz

9

## Einstein: Spezielle Relativitätstheorie

- Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Beobachter
- Elektrodynamik bewegter Körper
- Zeit und Raum werden Beobachter-abhängig



© B. und Th. Görnitz

10

## noch immer der Äther!

- „Was“ schwingt,
- wenn elektromagnetische Wellen
- sich ausbreiten?

## Wilhelm Hallwachs

- \* 9. Juli 1859 in Darmstadt , †10. Juli 1922 in Dresden.  
ab 1893 Ordinarius für Elektrotechnik an der TH Dresden.
- 1887 Heinrich Hertz: bei Versuchen über Elektromagnetismus:  
Funken an einer Funkenstrecke werden länger, wenn in der Nähe  
gleichzeitig ein anderer Funken übersprang.
- verantwortlich: das ultraviolette Licht des zweiten Funkens.
- Hallwachs: experimentelle Untersuchung des photoelektrischen Effekts  
(Hallwachs-Effekt)
- 1889 schreibt er:  
*Angeregt durch die Versuche von Hrn. Hertz über die Wirkung des  
Lichtes auf den Inductionsfunken hatte ich vor einiger Zeit gezeigt, dass  
bei der Belichtung negativ elektrischer, blanker Metallplatten mit  
geeignetem, ultravioletten Licht sich die negative Electricität den  
electrostatistischen Kräften des Feldes folgend, zerstreut. . . .*

# Hallwachs-Effekt



13

## Das Problem

- Schwingungen sollten sich allmählich aufschaukeln
- Der Effekt geschieht im roten Licht auch nach langer Zeit nicht.
- Im UV setzt er **sofort** ein – **wie bei einem Stoß**

# Einsteins Lichtquantenhypothese

- **Teilchen** laufen auch durchs Vakuum – ohne Äther!
- „wahrhaft revolutionär“

## Zweite Quantisierung

Einstein hat als erster gesehen, dass die Quantentheorie es ermöglicht,

- ein komplexes System mit sehr vielen Freiheitsgraden  
(Elektromagnetisches Feld mit unendlich vielen Freiheitsgraden)
- zu ersetzen durch sehr viele Objekte mit wenigen Freiheitsgraden  
(Photonen)

# Ein paar Bemerkungen zur Physik?

# Was ist Physik?

# Physik

- Physik ist die Wissenschaft, die die **universellen und allgemeingütigen Gesetze** des Verhaltens der Natur sucht.
- Sie unterteilt sich in zwei große Bereiche, die sich in der Herangehensweise an ihren Gegenstand unterscheiden:
  - **die zerlegende Weise der klassischen Physik**
  - **die henadische - auf Einheit zielende – Weise der Quantenphysik**

© B. und Th. Görnitz

19

## klassische Physik

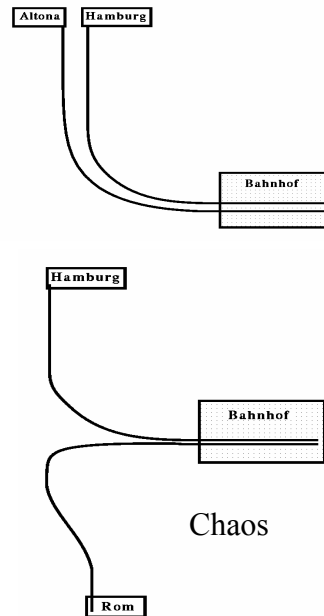
- Die klassische Physik folgt dem Paradigma, dass das **Einfache durch ein Zerlegen** des Komplexen in kleine Teile gefunden werden kann:  
**Lego-Weltbild**
- **Sie beschreibt die Welt als Fakten.**
- Der Höhepunkt der klassischen Physik ist die jahrtausendalte Vorstellung von „Atomen“:  
**Es gibt kleinste Teilchen, aus denen sich alle Naturphänomene herleiten lassen.**



20

# Determinismus

- Die klassische Physik beschreibt die **zeitliche Entwicklung der Fakten** durch Differentialgleichungen
- Das **Wesen der Differentialgleichungen**: Der Zustand des Systems zu einem Zeitpunkt legt die gesamte Entwicklung fest: **Gleise ohne Weichen (auch beim Chaos!)**



© B. und Th. Görnitz

# Quantenphysik

- Die Quantenphysik liefert die notwendige **Korrektur für die Einseitigkeiten der klassischen Physik**.
- Ihre mathematische Struktur ist **henadisch**, d.h. auf Einheit zielend.
- Sie erfasst, dass die **Beziehungen** zwischen den Teilen eines Systems die gleiche Bedeutung haben wie die Teile selbst.
- Die Quantenphysik beschreibt die Fülle der **Möglichkeiten**, die ein System besitzt.

© B. und Th. Görnitz

22

# Naturwissenschaft

## Was ist eine naturwissenschaftliche Erklärung?

Erklären im Rahmen der Naturwissenschaften bedeutet ein Zurückführen, eine Reduktion

- des Unbekannten auf Bekanntes,
- von Unverstandenem auf Verstandenes,
- von komplexen Strukturen auf einfache und damit auf fundamentale Strukturen.

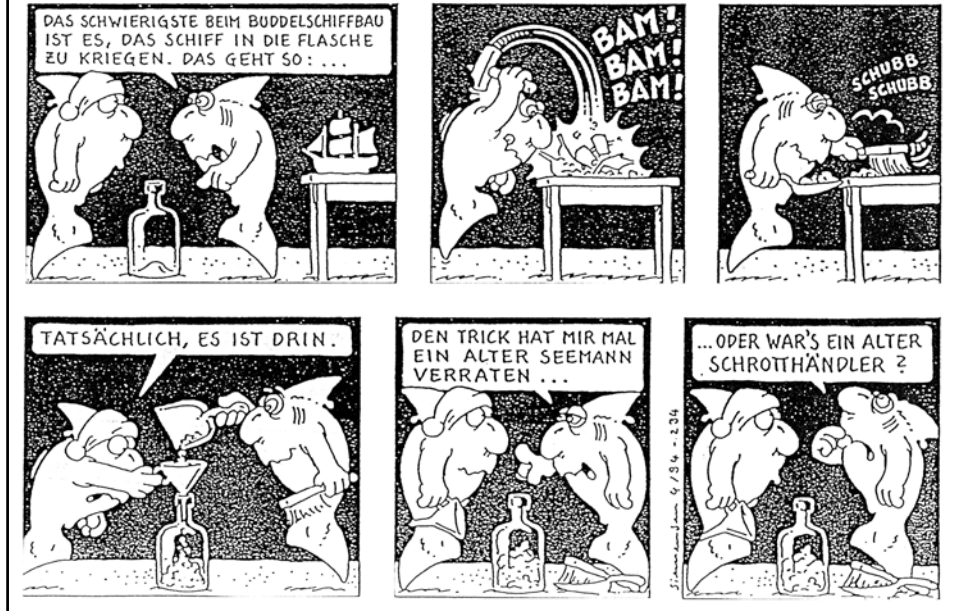
## Bisher: Der Weg zu den Atomen

- **Kinder**
  - und die meisten Naturwissenschaftler –  
suchen das Einfache durch „Zerlegen“.
- „Kleineres“ erscheint uns einfacher als „Größeres“.  
Diese Überlegung hat bereits früh zu der
- **Idee der Atome**
  - der nicht mehr zerlegbaren Grundbausteine –  
geführt.

## Atome in der Chemie

- Erkenntnis- und Erklärungsnutzen  
des Atombegriffes  
war vor allem in der  
neuzeitlichen Chemie recht groß.
- Er reichte **in einem gewissen Maße**  
noch bis in die  
Physik der Atome und Atomkerne.

## Lego-Weltbild der klassischen Physik



## Quarks sind keine „Bausteine“ der Materie

- Das Modell des „Zerlegens in immer kleinere Teilchen“ ist immer weniger nutzbringend, weil alles immer komplizierter anstatt einfacher wird,
- Der darauf aufbauende **Begriff der „Materie“** erweist sich **als zunehmend unklarer.**

# Was sind Quanten?

© B. und Th. Görnitz

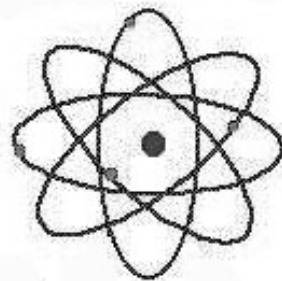
29

## Quanten ?

Historisch: **Aus Atomphysik  
entstanden**

Daher das populäre Bild:

- **Atome als  
„kleinste Teilchen“**
- **als „Bausteine“ der Materie**



© B. und Th. Görnitz

30

# Was sind Quanten?

- Mit dieser Frage werden die „Quanten“ als Objekte intendiert.  
Damit gehört diese Frage **primär** in den **Beschreibungsrahmen der Objekte und Teile** und gerade **nicht zur Quantentheorie!**
- **Eine Quantenbeschreibung, die die inneren Beziehungen eines Systems erfasst, hat zur Voraussetzung, dass das betreffende Objekt aus seinen äußeren Beziehungen zumindest theoretisch herausgelöst wird.**
- In der Beobachtung wird diese Isolierung wieder aufgehoben, der Beobachter stellt eine Beziehung zum Objekt her.

# Was meint man mit „Quanten“?

- „Quanten“ ist ein **Oberbegriff** – wie z.B. „Obst“
- Man hat, wenn man „Obst“ in der Tasche hat, Äpfel oder Birnen oder Bananen darin.
- Die **Quantenobjekte**, die die **Physik bisher** betrachtet, sind z.B. Elektronen, Protonen, Photonen (Lichtteilchen,  $\gamma$ -Quanten) und auch **Quantenbits**.
- **Quantenobjekte werden in ihrem Verhalten durch die Quantentheorie beschrieben.**

# Aspekte aus der Entwicklung der Quantentheorie

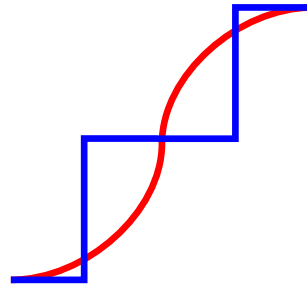
- 1900 Planck: **Quantenhypothese**
- 1925 Heisenberg: **Quantenmechanik**
- 1930 Heisenberg + Pauli: **Quantenfeldtheorie**
- 1970 Weizsäcker: **Quanteninformationstheorie**
- Heute: Bennett, Hawking, Zeilinger, Walter u.v.a.

## Was hat bisher die Quantentheorie bereits erklärt?

- Chemische Vorgänge können durch „Atome“ sehr gut erklärt werden.
- **Aber: Atome werden von der klassischen Physik verboten!**
- Die Quantentheorie hat als erstes die **Existenzmöglichkeit von Atomen** begründet.
- Sie erlaubt es, die Chemie wirklich zu verstehen: Chemie = „Physik der Atomhülle“.

## Was folgt noch aus der Quantentheorie?

- Wenn man sehr genau wird – und bei den Atomen muss man sehr genau sein – zeigt die Natur, dass die klassische Vorstellung von „**beliebig glatten Veränderungen**“ nicht zutrifft.
- Wirkungen sind quantisiert, treten nur in „**Anzahlen**“ oder „**Stufen**“ auf.
- **Veränderungen sind genaugenommen „Quantensprünge“**



© B. und Th. Görnitz

35

## Tatsachen und Missverständnisse über Quanten

© B. und Th. Görnitz

36

## Grundtatsachen über die Quantentheorie

- Quantentheorie ist eine **Theorie fürs Genaue!**
- Quantentheorie ist eine **Theorie über das Ganze!**  
(Ende des „Lego-Weltbildes“!)



© B. und Th. Görnitz

37

## Missverständnis über Quantentheorie

- Haupt-Missverständnis bis heute:
- **Quantentheorie ist (nur!) fürs Kleine**
- Dies entspricht noch Vorstellungen einer Physik über **sichtbare und fassliche Materie**
- einer Physik von **dauerhaften und sichtbaren Objekten, von „Bausteinen“.**
- **Quantenphysik ist hingegen eine Physik der Beziehungen**

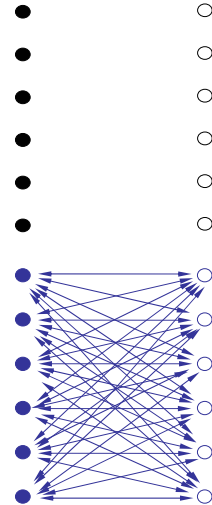
© B. und Th. Görnitz

38

# Quantenphysik ist eine Physik der Beziehungen

*klassische Physik*      *Quantenphysik*  
*Direkte Summe*   ◀ ▶   *Tensorprodukt*  
**der Zustandsräume**

- Die klassische Physik stellt Teilsysteme **additiv** nebeneinander  
( $6 + 6 = 12$  Zustandspunkte)
- Die Quantenphysik kombiniert Teilsysteme **multiplikativ** miteinander  
( $6 \cdot 6 = 36$  Beziehungspfeile)
- **Hier wird das Ganz mehr als lediglich die Summe der Teile**



© B. und Th. Görnitz

39

## Quantentheorie beschreibt Möglichkeiten

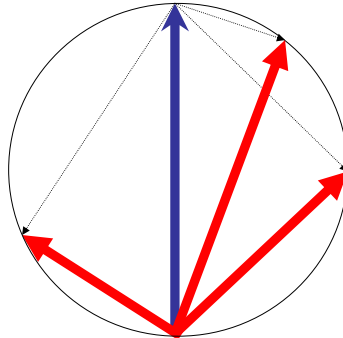
- Quantentheorie erfaßt mit ihren Zuständen  
**die Fülle der Möglichkeiten,**  
die ein System zu einem gegebenem Zeitpunkt besitzt!
- **Hingegen beschreibt die klassische Physik die Welt als Ansammlung von Fakten !**

© B. und Th. Görnitz

40

## Möglichkeiten sind nie eindeutig

- Wenn mit Gewissheit **ein Quantenzustand** (eine Möglichkeit) vorliegt, dann können bei einer Nachprüfung trotzdem **andere Quantenzustände** gefunden werden.



© B. und Th. Görnitz

41

## Quantentheorie determiniert die Möglichkeiten!

- Die **Möglichkeiten**, die die Quantentheorie beschreibt, entwickeln sich nach dieser Theorie streng naturgesetzlich und **determiniert!**
- **Nicht determiniert** sind hingegen die **Fakten**, die an einem System zu gegebenem Zeitpunkt gefunden werden können!

© B. und Th. Görnitz

42

## Wie ist das vorstellbar?

- Stellen Sie sich vor, jemand weiß noch nicht, was er heute abend tun wird.
- **Für heute abend stehen Möglichkeiten fest – sie sind determiniert:**
  - das Kinoprogramm
  - das Theaterprogramm
  - der Stammtisch
  - die Squash-Halle usw
- **Aber die bevorstehende Entscheidung (das künftige Faktum) liegt noch nicht fest**
- Im Rahmen der Möglichkeiten kann man frei handeln.

Da ist nichts „Unschärf“,  
aber die Entscheidung ist  
noch „Unbestimmt“

# Die „Schichtenstruktur“ von klassischer Physik und Quantenphysik

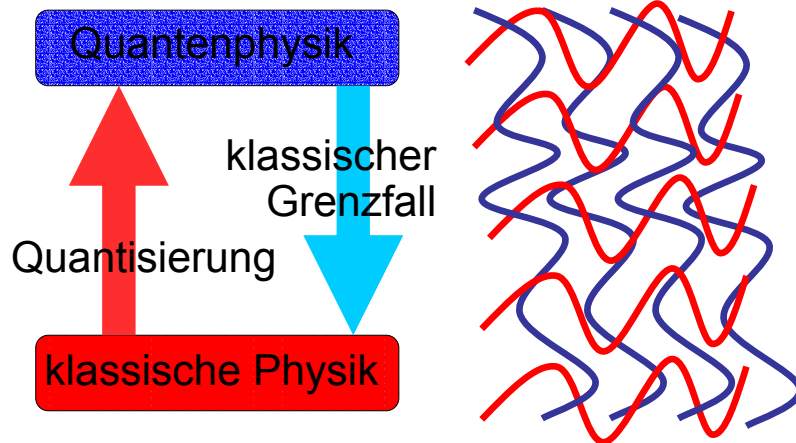
## Die beiden komplementären Beschreibungen der Welt

- **Klassisch:** Zerlegen der Welt in Teile, diese Objekte sind das Wesentliche, die Beziehungen sind eher unwesentlich und werden lediglich in Form von Kräften berücksichtigt, welche die Objekte selbst in ihrer Identität nicht beeinträchtigen.
- **Quantisch:** Die Beziehungen, die zwischen den möglichen Teilen eines Systems bestehen, sind wesentlich. Erst durch die Beziehungen werden die Teile aus dem Ganzen herausgelöst und damit erzeugt und verändert.

## Die Schichtenstruktur von klassischer Physik und Quantenphysik

- Auch wenn die Quantentheorie fundamental ist, erfordert eine vollständige Weltbeschreibung sowohl die Berücksichtigung der Möglichkeiten als auch die der Fakten.
- Daher benötigen wir sowohl den Teil der Physik, der die Welt durch Fakten erfaßt - die klassische Physik, als auch den, der sie in ihren Möglichkeiten beschreibt - die Quantentheorie

# Schichtenstruktur



© B. und Th. Görnitz

47

## Die Quantentheorie befreit von den Zwängen

des Objektivitätsideals der  
klassischen Weltbeschreibung:  
Ein objektiv vorliegender Zustand kann  
bei einer Messung nur von demjenigen  
gefunden werden,  
der ihn selbst erzeugt hat und somit  
kennt!

© B. und Th. Görnitz

48

**Determiniertheit  
der Möglichkeiten!**

**Indeterminiertheit  
der Fakten!**

**Eine schwierige Denkfigur!**

(ohne die Mathematik der  
Quantentheorie nicht zu erraten)

© B. und Th. Görnitz

49

## **Neue Denkmöglichkeiten (von der Quantentheorie eröffnet)**

Die Quantentheorie beschreibt

„**ausgedehnte Ganzheiten**“, die sich über  
**Raum und Zeit** erstrecken können:

Bereits experimentell etabliert:

- **EPR-Experimente** (Einstein-Podolski-Rosen) d.h.  
**räumlich ausgedehnte Quantenobjekte**  
(über viele km), **die sich bei einer Messung sofort  
als Ganzes verändern.**

© B. und Th. Görnitz

50

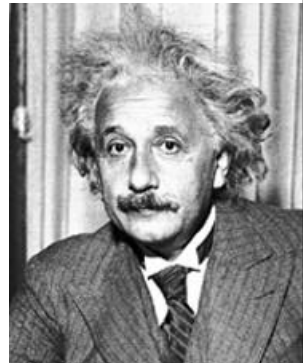
# Einstein: „Der Alte würfelt nicht!“

© B. und Th. Görnitz

51

## Einsteins Weltbild

- Einsteins Weltbild war das der klassischen Physik mit ihrem Determinismus
- Deshalb schlug er einen Gedankenversuch vor, der die – in seinen Augen vorhandene – Absurdität der Quantentheorie aufzeigen sollte



© B. und Th. Görnitz

52

## Einstein – Podolski - Rosen

- Klare Verdeutlichung der Nichtlokalität der Quantentheorie
- Einstein sah Widerspruch zur Relativitätstheorie:
- „Es gibt keine reale Änderung schneller als Licht“

## Heisenbergs Studenten dazu:

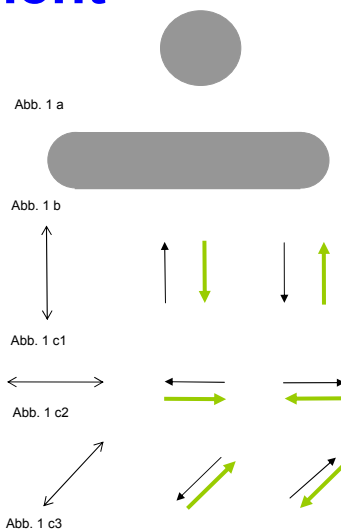
- „Jetzt hat Einstein die Quantentheorie doch verstanden.
- Schade, dass er sie nicht mag“

# Nur Gedankenversuch?

- Bellsche Ungleichung
- Aspekt 1972
- heute vielfach durchgeführt
  
- Alle Experimente gehen so aus, wie Einstein **nicht** gewünscht hatte

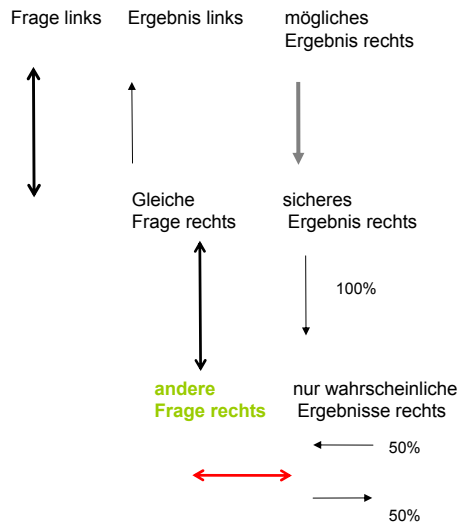
# EPR-Experiment

- **Ein** Quantenobjekt breitet sich im Raum aus.
- Es sei symmetrisch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.
- Wird es durch eine Messung **in 2 Teile zerlegt**, haben diese entgegengesetzte **mögliche** Richtungs-Eigenschaften.
- Mit dem Messergebnis an einem Ende liegt sofort das **mögliche Messergebnis am anderen Ende** mit Gewissheit fest – falls dort die gleiche Messung durchgeführt wird.



# EPR-Experiment 2

- Falls am anderen Ende aber eine **andere** Messung durchgeführt wird,
- so kann auf deren Ausgang lediglich mit Wahrscheinlichkeit geschlossen werden!



© B. und Th. Görnitz

57

# Weitere Quantenphänomene

© B. und Th. Görnitz

58

# Quantentheorie relativiert „fundamentale“ Unterschiede:

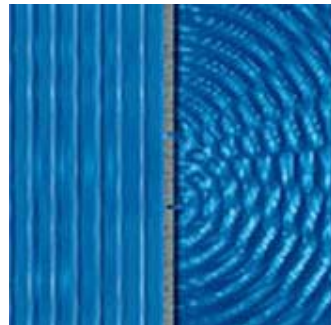
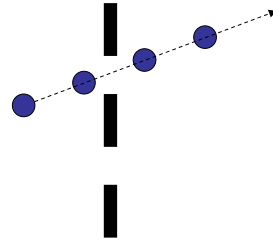
- Welle – Teilchen
- Kraft – Stoff
- Masse – Bewegung
- Objekt - Eigenschaft

© B. und Th. Görnitz

59

## Welle – Teilchen

- Ein Teilchen ist in der klassischen Physik ein Massenpunkt mit einem wohlbestimmten Ort.
- Eine Welle ist in der klassischen Physik ein beliebig weit ausgedehntes Gebilde.



© B. und Th. Görnitz

## Quantentheorie: Welle + Teilchen

- In der Quantentheorie kann ein und dasselbe Quantenobjekt unter bestimmten Bedingungen wie eine Welle und unter anderen wie ein Teilchen wirken!

## Kraft – Stoff

- Die Körper, der Stoff, werden in der klassischen Physik als materiell und undurchdringlich behandelt.
- Auf sie können Kräfte wirken, die sich gegenseitig durchdringen können und die nicht materiell sind.
- In der Quantentheorie ist der Unterschied zwischen beiden kaum noch fassbar (halbzahliger oder ganzzahliger Spin) und beides kann ineinander umgewandelt werden (z.B. in den großen Beschleunigern)

## Masse – Bewegung

- $E = mc^2$ , die berühmteste Formel der Physik, bedeutet die gegenseitige Umwandlung von Materie und Bewegung.
- z.B. stellen die Quarks selbst lediglich einen winzigen Bruchteil der Masse des Protons, (etwa  $m_u = 5/1000$  bzw.  $m_d = 8/1000$ )
- die restliche Masse der Protonen ist die Bewegung der Quarks:

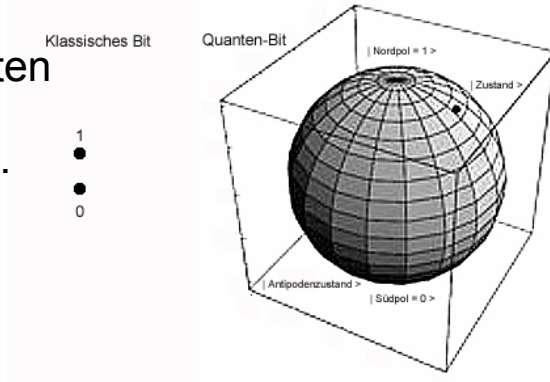
$$m = E/c^2$$

## Objekt - Eigenschaft

- Objekte sollten faktisch existieren – ihre veränderlichen Eigenschaften bestimmen den Zustand.
- Quantentheorie: Zustände beschreiben Möglichkeiten.
- Zweite Quantisierung: Die Objekte der ersten Quantisierungsstufe sind die Zustände (Eigenschaften) der zweiten Stufe.
- virtuelle Teilchen haben lediglich eine „mögliche Existenz“

## Kein Quanten-Nein

- Es gibt kein eindeutiges Quanten-Nein, lediglich ein „ungefährtes“ (66 %),
- Wenn aber Wahrscheinlichkeiten nahe bei Null oder eins sind.
- dann gibt es „Bestätigung“ von Erkenntnissen



© B. und Th. Görnitz

65

## Quanten-Zenon-Effekt

- Ein Quantensystem kann durch fortwährende Messungen des bestehenden Zustandes daran gehindert werden, diesen durch eine normale zeitliche Entwicklung so zu verändern, wie es gemäß der Schrödinger-Gleichung ohne Messung tatsächlich und gesetzmäßig geschehen würde.
- **Ein Quantenzustand kann durch bloßes Beobachten angehalten werden.**
- Die »Beobachtung« unterscheidet sich von anderen Wechselwirkungen dadurch, dass bei ihr Information über Quantenphasenbeziehungen dem System irreversibel entnommen wird.  
Dadurch wird ein Faktum konstituiert und die künftigen Wahrscheinlichkeiten verändert. Somit gelangt das System in einen geänderten Zustand.

© B. und Th. Görnitz

66

# Neue Denkmöglichkeiten

## neue Denkmöglichkeiten von Quantentheorie eröffnet

Die Quantentheorie beschreibt  
„**ausgedehnte Ganzheiten**“, die sich über  
**Raum und Zeit** erstrecken können:

Bereits experimentell etabliert:

- **EPR-Experimente** (Einstein-Podolski-Rosen) **d.h. räumlich ausgedehnte Quantenobjekte** (über viele km), **die sich bei einer Messung sofort als Ganzes verändern.**

# Neues Verständnis der Quantentheorie

- Früher: Statistisches Verständnis: Quantentheorie wie Statistische Physik, **Möglichkeiten aus der Unkenntnis der vielen Objekte**
- Heute: Experimente und theoretisches Verständnis für **Einzelquanten**.
- **Quantenmöglichkeiten sind real, sie beruhen nicht auf einer Unkenntnis von Fakten**

# Nano-Technologie

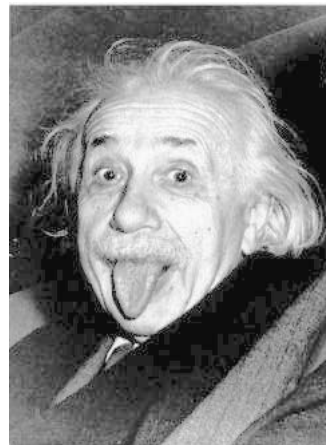
- Die Nano-Technologie arbeitet in einem Grenzbereich, in dem meistens **die zu große Abstraktion** und **die daraus folgende Ungenauigkeit der klassischen Physik** nicht mehr hingenommen werden kann.
- Die Quantentheorie ist genauer, weil sie weniger abstrakt und damit näher an der konkreten Wirklichkeit steht als die klassische Physik.

# Quantenkryptographie

- Aufbauend auf den Datenverbindungen EPR-Experimenten können heute **prinzipiell abhörsichere** Informationskanäle gebaut werden.
- Bei der **Quantenkryptographie** wird die Eigenschaft von Quantensystemen ausgenutzt, dass jede Beobachtung zu einer Veränderung des Quantenzustandes führt.

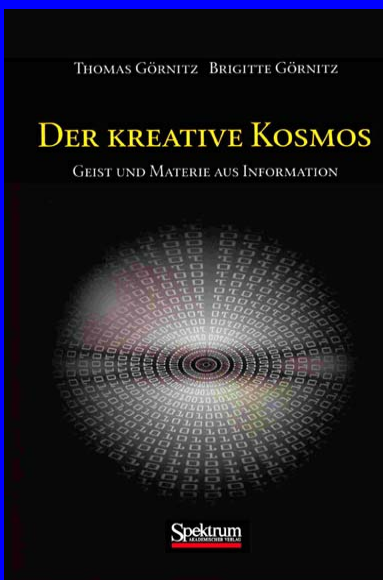
## Einstein war auch dort genial, wo er geirrt hat

- Die Realität der Quanten ist anders, als er gehofft hatte,
- die Quantentheorie ist fundamentaler als die Relativitätstheorie,
- dennoch ist sein Beitrag zur Physik gewaltig.



Herzlichen Dank  
für  
Ihre freundliche  
Aufmerksamkeit

mehr dazu in



Buchenrieder Woche  
am Starnberger See:

**Das Sichtbare und das Unsichtbare**  
—  
**das Bewusste und das Unbewusste**

Mo 24.7. – So 30.7.2006

[www.hausbuchenried.de](http://www.hausbuchenried.de)