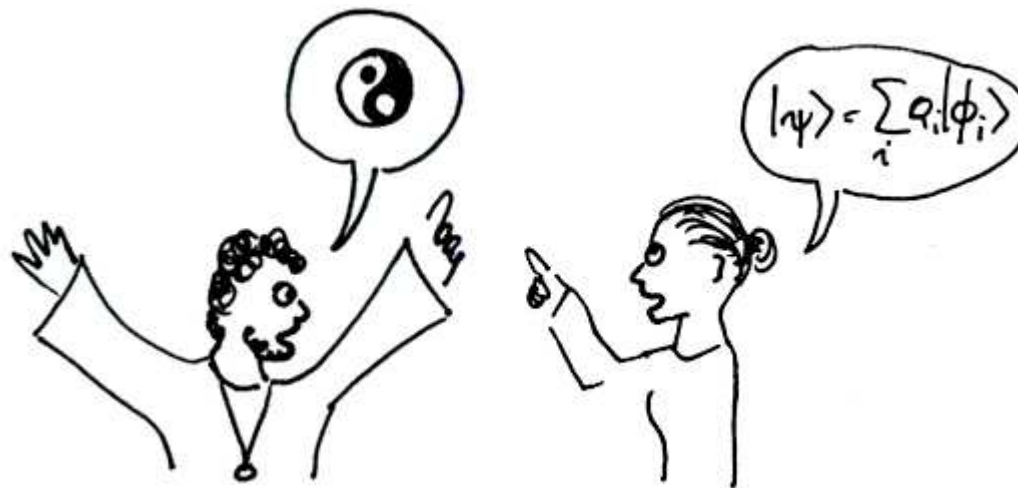


# Der Substanzbegriff in der modernen Physik: Beziehungen zur buddhistischen Lehre?

Lars Jaeger, Gomde, Juli 2013



## Der Substanzbegriff in der modernen Physik: Beziehungen zur buddhistischen Lehre?

Bewusst gewähltes Fragezeichen, da die Antwort in diesem Vortrag nicht eindeutig ausfallen wird, weil

1. Die Interpretation der modernen Physik weder epistemologisch noch ontologisch abgeschlossen ist
2. Auch der Buddhismus keine einheitliche Ontologie besitzt
3. Der Autor über Buddhismus weit weniger weiss als über moderne theoretische Physik

So soll dieser Vortrag

- mehr der Diskussion und der Erweiterung als dem Anspruch des letzten Verständnisses dienen
- ggfs. vorliegende Fehlwahrnehmungen darüber aufzuklären, was die Quantenphysik nun wirklich «zu sagen hat»

**Inhalt**

**I. Der Substanzbegriff in der westlichen Geistesgeschichte:  
Vom Atomismus Demokrits, der klassischen Galilei-Newton'schen  
Mechanik über Kants Antinomie zur Chemie Daltons**

**II. Von Dalton zur frühen Quantenphysik**

**III. Schöne neue abstrakte Welt – die Quantenmechanik**

**IV. Die Deutungsdebatte in der Quantenmechanik**

**V. Neue Überraschungen – Verbindungen mit der  
Relativitätstheorie: die Quantenfeldtheorie**

**VI. Realität makroskopisch und mikroskopisch**

**VII. Philosophische Bedeutung der Quantentheorie und  
Anknüpfungspunkte zu spirituellen Traditionen im Buddhismus**

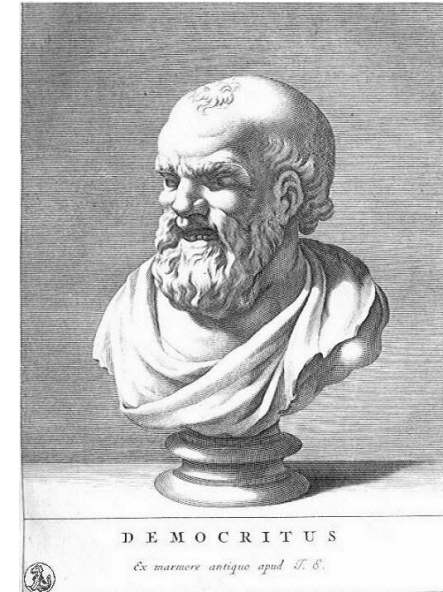
## Der Atomismus Demokrits

„Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter; in Wirklichkeit gibt es nur Atome im leeren Raum.“ (Demokrit)

- Atome sind fest und massiv, und insbesondere unteilbar („*átomos*“)
- Unendlich viele Atome: runde, glatte, krumme, etc
- Jedes Atom hat die Form eines regelmäßigen geometrischen Körpers, wie Kugel, Zylinder, Pyramide, Würfel
- Verschiedene Zusammensetzung führt zu Wasser, Feuer, Pflanzen, oder auch Menschen.
- Auch Sinneswahrnehmung und Seelenexistenz auf Atomen beruhend („Seelenatome“)

➡ **Konsequenter und atomistischer Materialismus**

➡ **Erste Quantentheorie: Atom als kleinste unteilbare Einheit**



Der „lachende Philosoph“ bezeichnete die „Euthymia“ als höchstes Gut.

## Die klassische Mechanik – Galilei und Newton

„Eine Intelligenz, die in einem gegebenen Augenblick alle Kräfte kennt, mit denen die Welt begabt ist, und die gegenwärtige Lage der Gebilde, die sie zusammensetzen, und die überdies umfassend genug wäre, diese Kenntnisse der Analyse zu unterwerfen, würde in der gleichen Formel die Bewegungen der größten Himmelskörper und die des leichtesten Atoms einbegreifen. Nichts wäre für sie ungewiss, Zukunft und Vergangenheit lägen klar vor ihren Augen.“ (Laplace)

- (Bereits idealisierte) Konzepte von physikalischen Körpern dargestellt in mathematischer Sprache (Beginn Galilei, Vollendung Newton)
- Bewegungen und Bewegungsänderungen dieser Körper als Ergebnis von auf diesen wirkenden Kräften (Newtons Gesetz) – in der klassischen Physik nur Gravitation und elektromagnetische Kräfte
- Abläufe in der physikalischen Welt – bestimmt durch Orte und Geschwindigkeiten der Körper - vollständig deterministisch und durch Bewegungsgleichungen (Differentialgleichungen) festgelegt
- Raum und Zeit: absolute Parameter und Bezugsrahmen der physikalischen Vorgänge (Newtons Raum- und Zeitvorstellungen)
- Physikalischen Größen objektiv – und unabhängig vom Beobachtbar – bestimmbar. Physikalischen Objekten besitzen substanziale – d.h. von jeglichem Anderen unabhängige – Eigenschaften



Galileo Galilei (1564-1642).



Isaac Newton (1642-1727).

## Kants Antinomie der reinen Vernunft

„Die menschliche Vernunft hat das besondere Schicksal in einer Gattung ihrer Erkenntnisse: dass sie durch Fragen belästigt wird, die sie nicht abweisen kann; denn sie sind ihr durch die Natur der Vernunft selbst aufgegeben, die sie aber auch nicht beantworten kann, denn sie übersteigen alles Vermögen der menschlichen Vernunft.“ (Kant)

### 2. Antinomie der reinen Vernunft

- „Eine jede zusammengesetzte Substanz in der Welt besteht aus einfachen Teilen, und es existiert überall nichts als das Einfache, oder das, was aus diesem zusammengesetzt ist.“

**Denn:** Man nehme das Gegenteil an. Dann gäbe es keine zusammengesetzten Teile, und es würde gar nichts übrig bleiben. Folglich gäbe es keine Substanz.

- „Kein zusammengesetztes Ding in der Welt besteht aus einfachen Teilen, und es existiert überall nichts Einfaches in derselben.“

**Denn:** Solche einfachen Teilchen müssten einen Raum einnehmen. Aber der Raum ist nicht in solche kleinsten Einheiten teilbar, es sind auch Teilräume des vom kleinsten Teilchen eingenommenen Raum möglich, und daher auch Teile des kleinsten Teilchens.



Immanuel Kant (1724-1804)

## Die Wiedergeburt des Atombegriffs in der Physik

- Untersuchungen an Gasen, die aus verschiedenen Komponenten bestehen (z.B. Luft, Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Kohlendioxid, etc.)
- Entdeckung: Einzelnen Bestandteile der verschiedenen Gassorten üben keinen Einfluss aufeinander aus.
- Hypothese: Gase bestehen aus kleinsten Teilchen.
- Ist nicht alle Materie, also auch Flüssigkeiten und Festkörper, aus kleinsten Teilchen zusammengesetzt?
- Chemische Substanzen: immer ganzzahligen Verhältnisse ihrer Ausgangsstoffe (z.B. Wasser im 2:1-Verhältnis Wasserstoff und Sauerstoff)
- Dalton nannte diese kleinsten Teilchen Demokrit zu Ehren „Atome“



John Dalton (1766-1844).



**Zum ersten Mal begann sich die empirische Wissenschaft mit Atomen zu beschäftigen.**

**I. Der Substanzbegriff in der westlichen Geistesgeschichte:  
Vom Atomismus Demokrits, der klassischen Galilei-Newton'schen  
Mechanik über Kants Antinomie zur Chemie Daltons**

**II. Von Dalton zur frühen Quantenphysik**

**III. Schöne neue abstrakte Welt – die Quantenmechanik**

**IV. Die Deutungsdebatte in der Quantenmechanik**

**V. Neue Überraschungen – Verbindungen mit der  
Relativitätstheorie: die Quantenfeldtheorie**

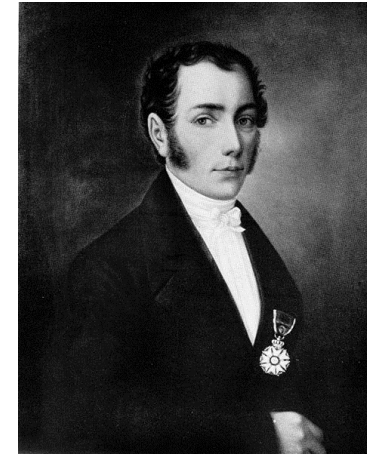
**VI. Realität makroskopisch und mikroskopisch**

**VII. Philosophische Bedeutung der Quantentheorie und  
Anknüpfungspunkte zu spirituellen Traditionen im Buddhismus**

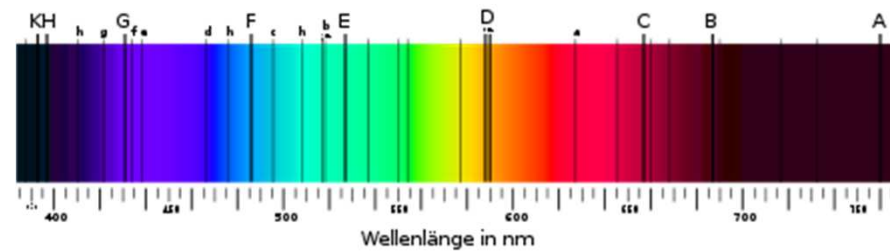
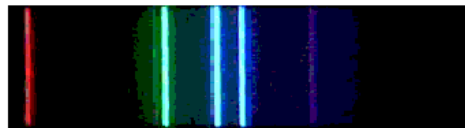
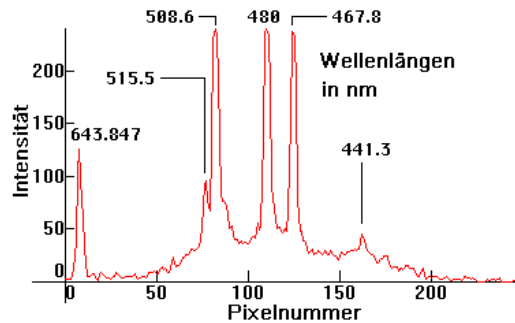


## Fraunhofer-Spektren

- Erste experimentelle Manifestation der Quantenhaftigkeit in der Natur
- Diskrete dunkle Linien im Spektrum des Sonnenlichtes
- Umgekehrt: Gase, die Licht ausgesetzt sind, emittieren Licht mit einem diskreten Spektrum
- Bekanntestes Beispiel aus dem Chemie-Unterricht: Das gelbe Licht des Natriums in der Flamme des Bunsenbrenners



Joseph Fraunhofer  
(1787-1826)



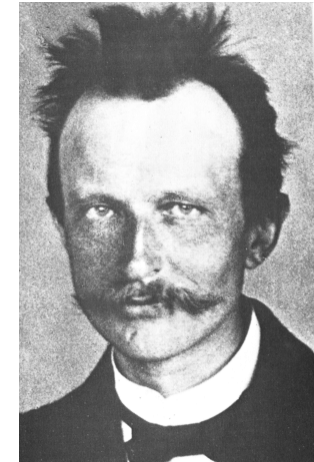
Irgendetwas scheint die Atome dazu zu bringen, nur diskrete Frequenzen zu emittieren bzw. zu absorbieren.

## Plancks Verzweiflung und die erste Quantenhypothese

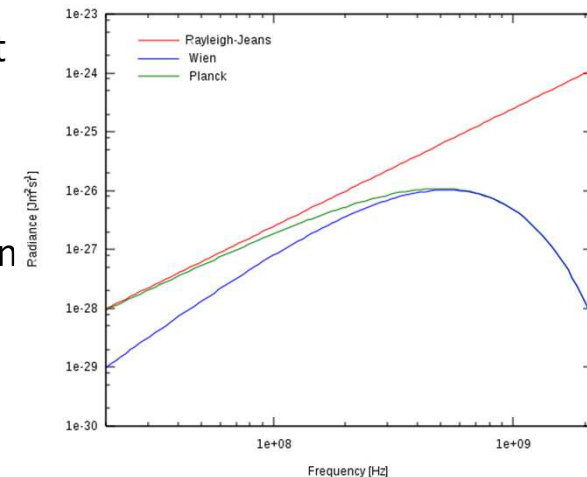
- Untersuchung der Wärmeabstrahlung von Körpern
- Bestehende Gesetze, die auf klassischen Ableitungen beruhten, widersprachen den experimentellen Ergebnissen
- In einem Akt der Verzweiflung“ nahm Planck an, dass die Strahlung von den Körpern nur in gequantelten Energie„häppchen“ emittiert werden. Dies führte ihn zu seiner Strahlungsformel:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

- 14. Dezember 1900 „Geburtstag der Quantenphysik“: Planck stellt bei einer Sitzung der Physikalischen Gesellschaft seine Ergebnisse vor
- Revolutionäre Charakter der Planck'schen These allen Teilnehmern – inklusive Planck selbst – unklar



Max Planck (1858-1947)



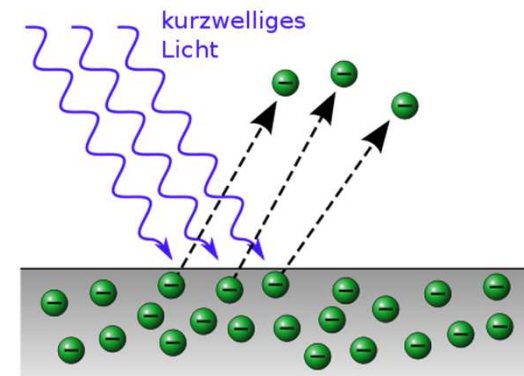
## Einsteins Photonen –Wellen-Teilchen-Dualismus I

- 18. März 1905: Artikel „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ des junge (und noch unbekanntes) Schweizer Patentbeamter Albert Einstein
- Korrekte Erklärung des „photoelektrischen Effektes“, der den Physikern lange ein Rätsel geblieben war
- These: Licht besteht aus kleinsten Teilchen, sog. Photonen
- Bezugnahme auf die Arbeiten von Max Planck

- ➔ **Erste Manifestation eines „Wellen-Teilchen-Dualismus“: Licht hat sowohl Teilchen als auch Wellen-Eigenschaften**
- ➔ **Die neue „Quantentheorie“ Plancks begann in den Köpfen der Physiker ernst genommen zu werden**



Albert Einstein (1879-1955)



Der photoelektrische Effekt

## Das Bohr'sche Atommodell: die erste Quantentheorie

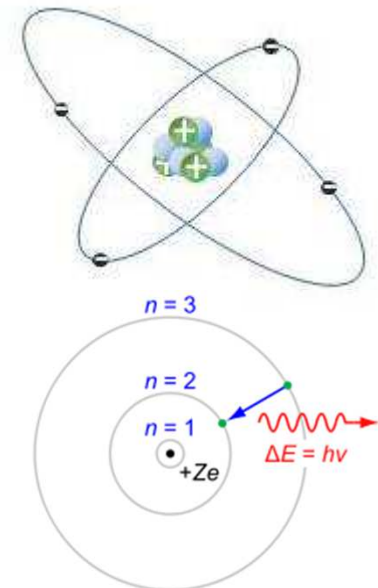
*Experimentelle Entdeckungen zwischen 1890 und 1910 waren wie die Teile eines Puzzlespiels. Das Bild, welches sich den Physikern zunächst in vagen Konturen, doch dann immer klarer offenbarte, zeigte... die Struktur des Atoms! (Autor)*

- Ernest Rutherfords Atommodell auf Basis experimenteller Ergebnisse: Positiv geladener massiver Atomkern, negativ geladene Elektronen darum kreisend
- Allerdings: nach den Gesetzen der klassischen Physik unmöglich! Die Elektronen sollten schnell in den Atomkern stürzen.
- Nils Bohr: Gestützt auf die Arbeiten Plancks und Einsteins: Einführung von Quanten im Atom – nun bezogen auf die Energiezustände des Elektrons
- Gültigkeit der klassischen Physik für das Atom in Frage gestellt
- Elektronen befinden sich nur auf bestimmte Bahnen, auf denen sie in stabiler Form den Kern umkreisen.

**➔ Die Quantentheorie führte zu einer ersten akzeptablen Atomtheorie.**



Nils Bohr (1885-1962)



**Inhalt**

**I. Der Substanzbegriff in der westlichen Geistesgeschichte:  
Vom Atomismus Demokrits, der klassischen Galilei-Newton'schen  
Mechanik über Kants Antinomie zur Chemie Daltons**

**II. Von Dalton zur frühen Quantenphysik**

**III. Schöne neue abstrakte Welt – die Quantenmechanik**

**IV. Die Deutungsdebatte in der Quantenmechanik**

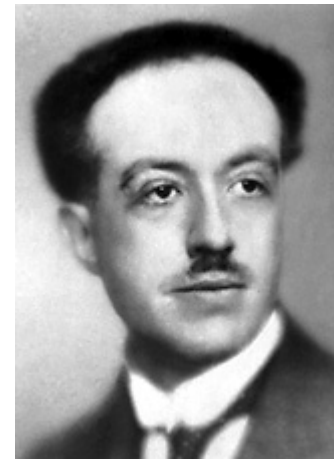
**V. Neue Überraschungen – Verbindungen mit der  
Relativitätstheorie: die Quantenfeldtheorie**

**VI. Realität makroskopisch und mikroskopisch**

**VII. Philosophische Bedeutung der Quantentheorie und  
Anknüpfungspunkte zu spirituellen Traditionen im Buddhismus**

## Elektronenwellen – Wellen-Teilchen-Dualismus II

- Zustand der Quantentheorie um 1920: Quantenmodell des Atoms, Einsteins Lichtquantenhypothese und Plancks Energiequanten noch mit reichlich Erklärungsbedarf
- Mysteriösen Charakter der Quantenwelt bisher nur mit ad-hoc Annahmen erklärt
- 10 Jahre nach Bohrs Atommodell: echte Krise der ‚ersten Quantenphysik‘
- Fehlen eines umfassenden erklärenden und konsistenten Rahmens
- Im Jahr 1923: Gewagte These des jungen Franzosen Louis de Broglie: Wenn sich Licht sowohl als Welle wie auch als Teilchen verhalten kann, warum sollte gleiches nicht auch für Materie, konkret für das Elektron, gelten?
- Tatsächlich: In der Wellenoptik analogen Experimenten verhalten sich Elektronenstrahlen wie Wellen.



Louis-Victor Pierre  
Raymond de Broglie, 7.  
Herzog de Broglie  
(1892-1987)

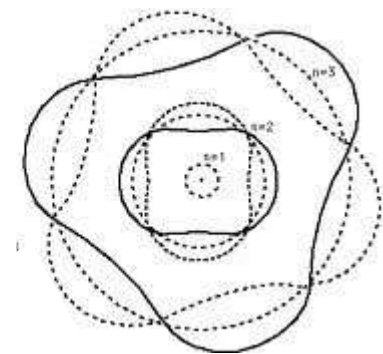
➡ Dies sollte der Anstoss zur Entwicklung einer neuen, konsistenten „Quantenmechanik“ sein.

## Die Wellenfunktion – erste Erklärung der Bohr'schen Bahnen

- Langsame Erkenntnis: Begriffs- und Anschauungswelt der „klassischen Physik“ nicht mehr ausreichend, um die neuen Phänomene zu deuten
- Entdeckung der Wellennatur des Elektrons der entscheidende Anstoss für die nun folgende Entwicklung einer ersten konsistenten Quantentheorie
- Im Jahr 1925 (während seines Weihnachtsurlaubs in Arosa und inspiriert durch eine Affäre): Erwin Schrödinger leitet die entsprechende Gleichung für die neuen Elektronenwellen her, die sog. „Schrödinger-Gleichung“
- Lösungen sind die sog. Wellenfunktion
- Elegante Beschreibung der Atomzustände: Bei räumlicher Beschränkung der Elektronenwellen im Atom nur bestimmte Wellenlängen möglich (stehenden Wellen). Elektronen als (geschlossene) um den Atomkern schwingende Wellen.
- Was das Bohr'sche Modell noch als diskontinuierliche Quantensprünge beschrieb, wird in der „Wellenmechanik“ Schrödingers zu Übergängen von einem elektronischen Eigenschwingungszustand in einen anderen.



Erwin Schrödinger  
(1887-1961)



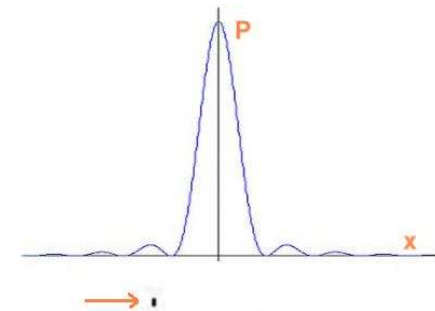
**Die Quantennatur im Mikrokosmos ist eine Manifestation der Wellennatur der Materie**

## Was beschreibt die Wellenfunktion? Borns Wahrscheinlichkeitsinterpretation

- Trotz schöner mathematischer Beschreibung der de Broglie-Wellen und der Elektronenbewegungen im Atom durch die Schrödinger-Gleichung: Das grundlegendste Problem blieb ungelöst: Was sind Elektronen, Materieteilchen oder Wellen?
  - Gemäss unserer alltäglichen Anschauung: Etwas kann nicht Welle und Teilchen zugleich sein.
  - Schrödinger: Lösungen seiner Gleichung beschreiben Dichteschwingungen
  - Idee Borns: Wellen beschreiben nicht Bewegungen des Elektrons, sondern die **Wahrscheinlichkeitsverteilung**, wo es sich zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet.
  - Wellenfunktion als **Überlagerung verschiedener Aufenthaltsorte**
  - Gewisse Entschärfung der Schwierigkeiten des Wellen-Teilchen Dualismus
- ➔ **Doch der Preis dafür war hoch: Dies bedeutete einen fundamentalen Bruch mit einer Weltsicht, dass die Abläufe eines physikalischen Systems deterministisch ablaufen.**



Max Born (1882-1970)





## Heisenbergs Unschärferelation – Die komplette Aufgabe klassischer Begriffe

- Werner Heisenberg: Verzicht auf Vorstellungen von Ort und Geschwindigkeit - schliesslich waren diese weder beobachtbar noch messbar?
  - Beschränkung ausschliesslich auf die von den Atomspektren her bekannten und messbaren Werte für Frequenzen, Energien und Intensitäten
  - Liessen sich die Eigenschaften des Atoms mit diesem neuen, beschränkten Variablenensemble eindeutig beschreiben? Ja! Jedoch nur mit neuen, abstrakten Rechenregeln.
  - Diese stellten sich als äquivalent zur Schrödinger'schen Wellentheorie heraus.
  - Physikalische Interpretation führte zur berühmten Unschärferelation: Ort und die Geschwindigkeit (Impuls) eines Teilchens nicht mit beliebiger Genauigkeit bestimmbar.
  - Die aus der klassischen Physik entnommene anschauliche Vorstellung einer Elektronenbahn (Ort und Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt genau festgelegt) nicht in die Quantenwelt übertragbar.
- ➡ **In gewissem Sinne gibt es keine Elektronenbahn, bevor wir sie beobachten. Doch „gibt“ es dann überhaupt ein Elektron, und was bedeutet seine „Existenz“ ?**



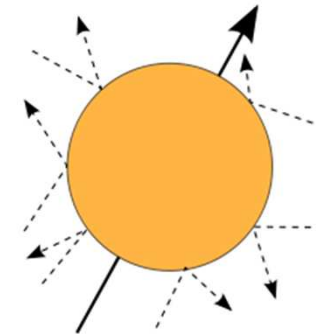
Werner Heisenberg  
(1901-1976)

$$\Delta x \Delta p \gtrsim h.$$

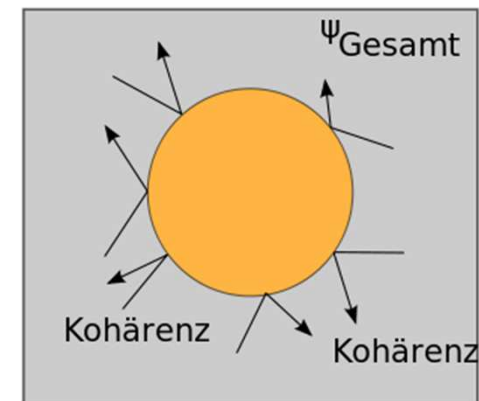
## Subjekt-Objekt-Dualismus aus quantenmechanischer Sicht: Die Bedeutung des Beobachters

- Messen: Untersuchung eines Objekt mit Hilfe eines Messgerätes.
- In der klassischen Physik: Nur Beeinflussung des Messgerätes durch das Objekt zur Ermittlung von dessen Eigenschaften; alle anderen Einwirkungen und störende Rückwirkungen des Geräts aufs Objekt sowie Umwelteinflüsse weitestgehend vernachlässigt.
- Bei Quantenobjekten: Messgerät „stört“ das Objekt immer. Eigenschaften des „eigentlichen“ Objekts nicht mehr „ungestört“ untersuchbar.
- Beobachtende Messung bzw. Messapparat Teil des Gesamtsystems.
- Jeder Beobachter durch die zur Beobachtung notwendige Wechselwirkung mit dem System Teil des Gesamtsystems.

a) klassisch



b) quantenmechanisch



**I. Der Substanzbegriff in der westlichen Geistesgeschichte:  
Vom Atomismus Demokrits, der klassischen Galilei-Newton'schen  
Mechanik über Kants Antinomie zur Chemie Daltons**

**II. Von Dalton zur frühen Quantenphysik**

**III. Schöne neue abstrakte Welt – die Quantenmechanik**

**IV. Die Deutungsdebatte in der Quantenmechanik**

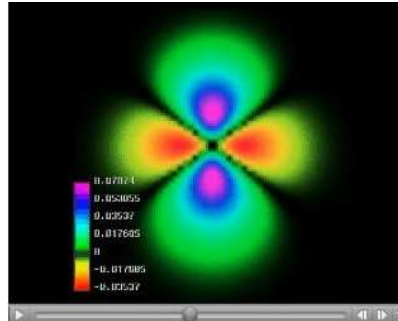
**V. Neue Überraschungen – Verbindungen mit der  
Relativitätstheorie: die Quantenfeldtheorie**

**VI. Realität makroskopisch und mikroskopisch**

**VII. Philosophische Bedeutung der Quantentheorie und  
Anknüpfungspunkte zu spirituellen Traditionen im Buddhismus**

## Was ist ein Elektron? – Teilchen oder Welle?

Zentrale Grundgröße der Quantentheorie ist die Wellenfunktion (mathematisches Symbol:  $\Psi$ )



Wellenfunktion eines Elektrons im Atom

### Doch was ist $\Psi$ ?

#### Bohrs Antwort :

- Beides, Welle und Teilchen, und doch zugleich keines von beiden.
- Elektron ist ein ‚Quantenobjekt‘ und als solches ohne Entsprechung in unserer Anschauungswelt.
- Physiker muss selber wählen, als was er es mit seiner Messanordnung messen will.
- Nur eines kann er nicht: Beides auf einmal – Welle und Teilchen zugleich – messen.

„Wenn man nicht zunächst über die Quantentheorie entsetzt ist, kann man sie doch unmöglich verstanden haben.“

#### Einsteins Antwort (und mit ihm Erwin Schrödingers)

- Idee, dass die Quantenmechanik eine von der Messung unabhängige Existenz von Teilchen nicht mehr zulässt und nur statistische Aussagen über die atomare Welt erlaubt, nur schwer akzeptierbar.
- Es gibt eine dem Elektron zugrunde liegende unabhängige Realität.

„Die Quantenmechanik ist sehr achtunggebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der Alte nicht würfelt.“

## Die Bohr-Einstein Diskussion

### Einstein:

- Hinter den Erscheinungen steht die unabhängige und unveränderliche Existenz von Etwas, das diese Erscheinungen hervorbringt, d.h. eine objektive und unabhängige Realität (klassisch-ontologische Objektauffassung).

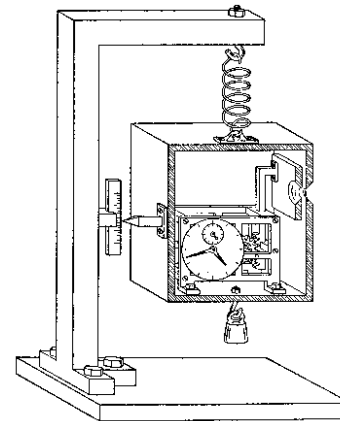
### Bohr:

- Verzicht darauf, den Objekten des quantentheoretischen Formalismus, also der Wellenfunktion, eine Realität in unmittelbarem Sinne zuzusprechen.
- Ort und Impuls keine *objektive* Eigenschaften eines Quantenobjektes.
- Denn: Es ist *in der Natur eines Teilchens*, ihm unterhalb gewisser Grenzen Ort und Impuls nicht mehr zuordnen zu können (Unschärferelation)
- Verweise auf Parallelen in der buddhistischen Lehre

Einsteins liess sich zahlreiche Gedankenexperimente einfallen, um Bohrs Deutung, insbesondere die Unschärferelation, zu widerlegen, blieb dabei zuletzt jedoch erfolglos.



Niels Bohr und Albert Einstein 1927



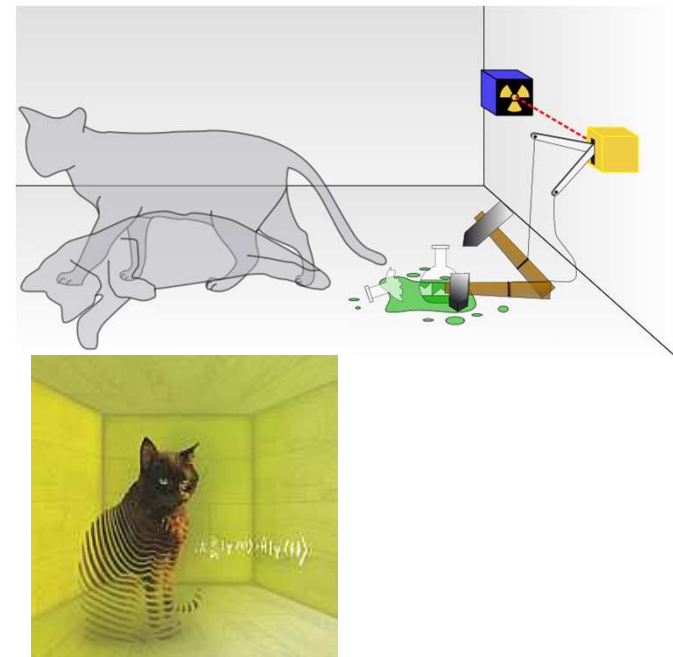
## Die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

- Aufenthaltsort eines Teilchens nicht mehr durch Orts-Koordinaten beschreibbar, sondern durch die **Wellenfunktion**
- Generelle Möglichkeit, dass sich ein quantenmechanisches System in keinem eindeutigen Zustand befindet, sondern in einer **Überlagerung verschiedener Zustände**. Beispiel: verschiedene Orte, deren Wahrscheinlichkeiten durch die Wellenfunktion beschrieben werden
- Wahrscheinlichkeitscharakter quantentheoretischer Vorhersagen nicht Ausdruck der Unvollkommenheit der Theorie, sondern des **prinzipiell non-deterministischen Charakters von mikroskopischen Naturvorgängen**
- Ein Quantenobjekt in seinem vom Beobachter erkannten und gemessenen Verhalten **abhängig vom Messinstrument** – welches immer als makroskopisch-klassisch betrachtet wird
- **Komplementarität** von Teilchen oder Welle: Um physikalische Prozesse auf atomarer Ebene komplett zu beschreiben, sind beide Sichtweisen nötig und ergänzen sich.
- In Abwesenheit einer Messung sollte man überhaupt nicht mehr von einer Existenz des Teilchens sprechen. Es besitzt **keine unabhängigen, substantiellen Eigenschaften** mehr.
- Statt „Realität“ besitzen Quantenobjekte „Potenzialität“.



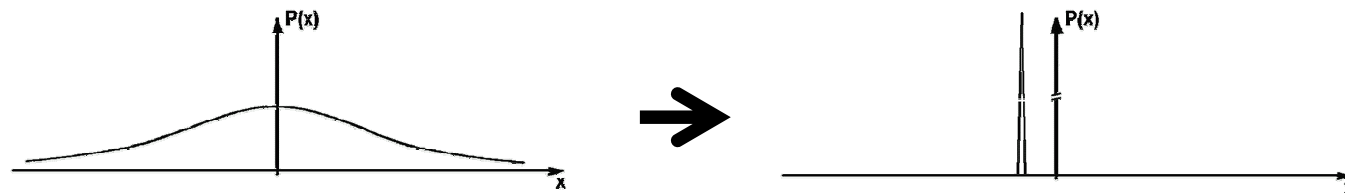
## Superpositionen und Schrödingers Katze

- Allgemein: In der Wellenfunktion eines Systems sind seine möglichen Zustände (z.B. Aufenthaltsorte) überlagert. Gemäss der Heisenberg'schen Unschärferelation kann ihm kein eindeutiger Zustand (z.B. Ort) zugeordnet werden.
- Man spricht auch von „Superpositionen“ (Überlagerungen) quantenmechanischer Zustände.
- Nach der Messung: das System befindet sich in exakt dem gemessenen Zustand.
- Übergang Superposition in eindeutig bestimmten Zustand: **„Kollaps der Wellenfunktion“**.
- Gedankenexperiment: Geschlossener Raum mit einem instabilen Atomkern, der mit gewisser Wahrscheinlichkeit zerfällt. Im Falle des Zerfalls wird Giftgas freigesetzt, das eine Katze im Raum tötet.
- Gemäß der Quantenmechanik: Atomkern im Zustand der Überlagerung zweier Zustände (noch nicht zerfallen *und* zerfallen)
- Übertragung diese Überlagerung auf makroskopisches System: Katze im Zustand der Überlagerung, lebendig *und gleichzeitig* tot



## Das quantenmechanische Messproblem: Spontan zerfallende Wellenfunktionen und andere Spuks

- Vor Messung: Quantensystem in einer Superposition (Überlagerung) verschiedener Zustände, z.B. Überlagerung von möglichen Aufenthaltsorten (Wahrscheinlichkeit durch Wellenfunktion bestimmt)
- Nach Messung: System in einem eindeutigen (dem gemessenen) Zustand

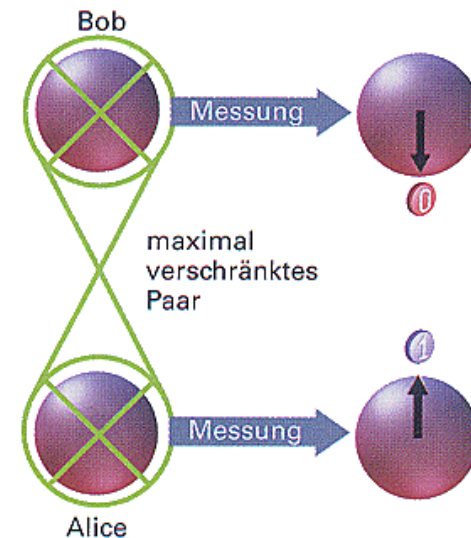


- Beispiel: Ein Elektron fällt auf eine Fotoplatte. Kurz vor dem Auftreten dort (Beobachter hat sich noch nicht dazu ‚entschieden‘, das Elektron zu messen): Elektronenwelle ‚existiert‘ noch. Elektron wäre als Welle messbar, wenn der Beobachter sich noch dazu entscheiden würde, es so zu messen.
  - Nach der Messung: Elektron nicht mehr als Welle detektierbar. Wahrscheinlichkeit, dass das Elektron noch auf irgendeine andere Stelle der Fotoplatte fällt, ist gleich Null.
  - Im Moment des Auftreffens des Elektrons auf die Fotoplatte: Informationsübertragung an alle anderen Raumstellen, dass das Elektron dort nicht mehr auftreten kann?
- ➔ **Einen solchen nicht-lokalen Charakter quantenmechanischer Ereignisse wie den instantanen Kollaps der Wellenfunktion bezeichnete Einstein abwertend als „spukhafte Fernwirkung“.**



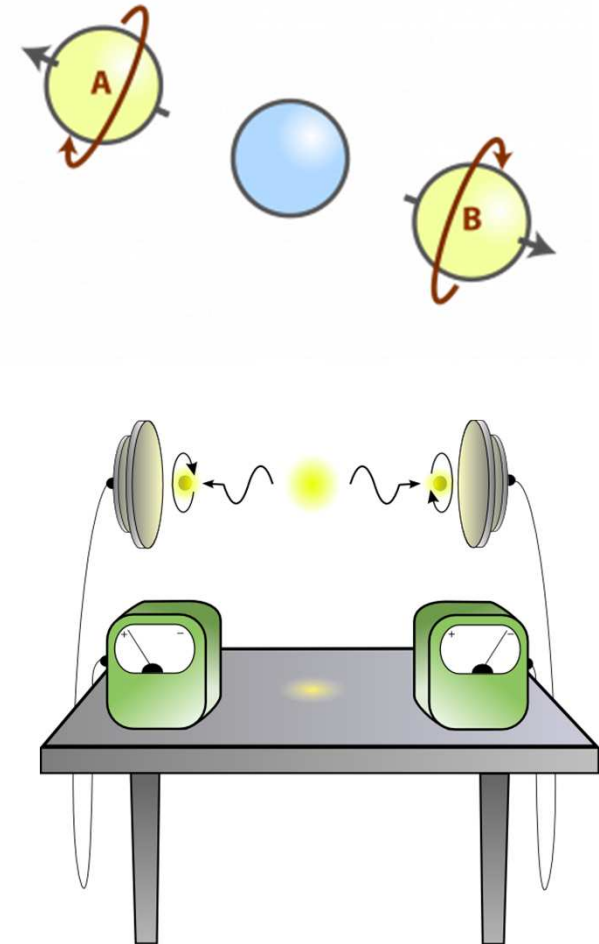
## Quantenmechanische Verschränkung

- Klassische Physik:
  - Subjekt-Objekt-Trennung
  - unabhängigen Existenz der Dinge
  - ein System immer in seine Einzelteile, d.h. unabhängige Zustände, trennbar
- Quantenphysik:
  - Trennung nicht mehr möglich
  - Kein einzelnes Quanten- „Objekt“ mit einer unabhängigen Existenz mehr
  - Beobachter als Teil des Ganzen
- Quanten-»Objekte« (die einzelnen Teilchen) *keine absolute Identität* mehr, keine Individualität, keinen ‚eigenen Charakter‘, sonder tragen nur noch mit „relationaler“ Identität.
- Verschränkung: Verknüpfung der einzelnen Teilchen zu einem nicht-separierbaren Ganzen. Verschränkte Teilchen sind untrennbar miteinander verbundene Quanten-Objekte, die sich als Ganzes in einer Überlagerung von gemäss der klassischen Physik einander ausschliessenden Zuständen befinden können.
- Merkwürdige Konsequenz: Selbst wenn verschränkte Teilchen weit voneinander entfernt, verhalten sie sich wie eine Gesamtheit



## Das Einstein-Rosen-Podolski Paradoxon

- Miteinander verschränkte, jedoch weit voneinander entfernte Teilchen: Verhalten sich wie eine Gesamtheit, deren Dynamik insgesamt und unmittelbar auf die einzelnen Komponenten wirkt
- Vor Messung ihrer Zustände: Unbekannt welches Teilchen in welchem Zustand ist. Jedoch: Information über das eine Teilchen erlaubt unmittelbaren Rückschlüsse auf den Zustand des anderen Teilchens.
- Nach räumlicher Distanzierung Messung an Teilchen am Ort A: Sobald Messung durchgeführt (und Wellenfunktion kollabiert), kollabiert ohne irgendeine Verzögerung auch Wellenfunktion des Teilchens am Ort B, ohne Wechselwirkung zwischen beiden Teilchen.



**Die Quantentheorie ist eine nicht-lokale Theorie: Durch Verschränkung kann in der Quantenwelt ein Ereignis räumlich ohne zeitliche Dimension wirken.**

**Inhalt**

**I. Der Substanzbegriff in der westlichen Geistesgeschichte:  
Vom Atomismus Demokrits, der klassischen Galilei-Newton'schen  
Mechanik über Kants Antinomie zur Chemie Daltons**

**II. Von Dalton zur frühen Quantenphysik**

**III. Schöne neue abstrakte Welt – die Quantenmechanik**

**IV. Die Deutungsdebatte in der Quantenmechanik**

**V. Neue Überraschungen – Verbindungen mit der  
Relativitätstheorie: die Quantenfeldtheorie**

**VI. Realität makroskopisch und mikroskopisch**

**VII. Philosophische Bedeutung der Quantentheorie und  
Anknüpfungspunkte zu spirituellen Traditionen im Buddhismus**

## Diracs Gleichung und Anti-Teilchen

- 1928: Rein theoretische Überlegungen zur Integration der Eigenschaften der speziellen Relativitätstheorie führen Paul Dirac auf eine neue Gleichung für das Elektron.
- Wie aus der Schrödinger-Gleichung lassen sich daraus die Eigenschaften von Atomen herleiten.
- Zudem: Aus ihr ergab sich unmittelbar der Spin des Elektrons, eine speziell quantenmechanische Eigenschaft, die vorher noch ad hoc eingeführt wurde!
- Und: Einige ihrer Lösungen entsprachen Elektronen mit negativer Energie.  
-> Postulat von „Anti-Teilchen“

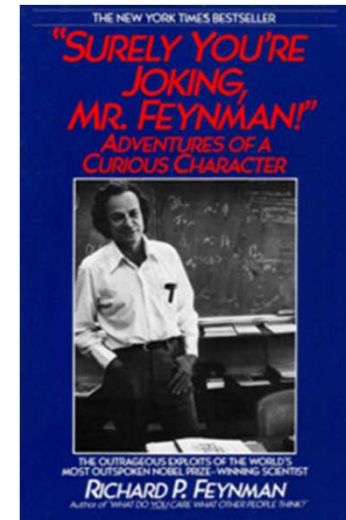


Paul Dirac  
(1902-1984)

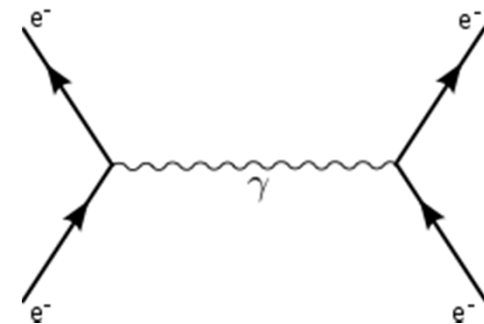
**➔ Die Dirac-Gleichung verkoppelt das Elektron mit dem elektromagnetischen Feld und wurde das Fundament der Quantenelektrodynamik, oder wie es bald hiess, einer relativistischen „Quantenfeldtheorie“.**

## Quantentheorie des elektromagnetischen Feldes

- Ziel: Entwicklung der klassischen elektromagnetischen Feldtheorie in eine Quantentheorie, in der die elektromagnetischen Felder quantisiert auftreten und der **Wellen-Teilchen Dualismus des Photons** erfasst wird
- Zudem: Beschreibung der **Emission und Absorption von Photonen** durch ein Atom zu beschreiben
- Aus der Dirac-Gleichung ergab sich noch ein weiterer Effekt: die **Erzeugung von Teilchen-Antiteilchen Paaren**. Die ergaben sich auch schon aus der Unschärferelation angewandt auf das elektromagnetische Feld.
- **Quantenfluktuationen des elektromagnetischen** Feldes: permanente Entstehung und Vernichtung „virtueller“ Teilchen (-> Casimir Effekt)
- In der „Quantenelektrodynamik“: Elektromagnetische Kraft als Austausch virtueller Photonen
- Anschauliche Beschreibung durch „Feynman-Graphen“

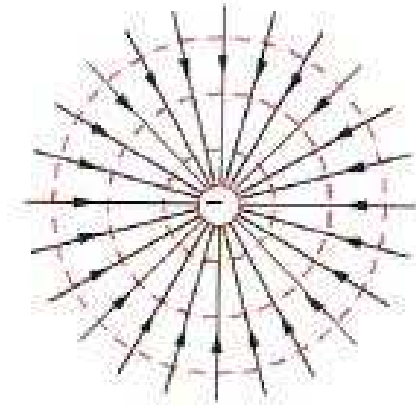


Richard Feynman  
(1918-1988)

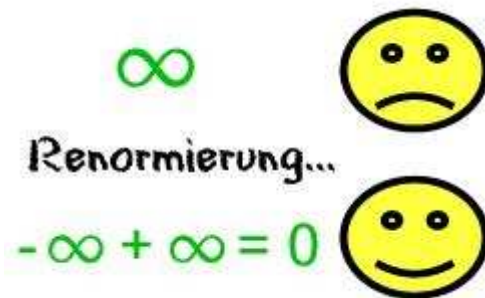
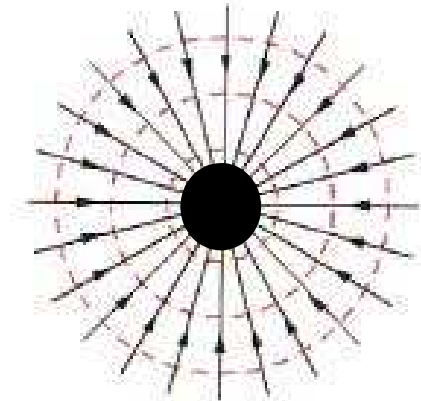


## Das Problem des kleinsten Teilchens und der unendlichen Ladungsdichte - Renormierung

- Virtuellen Teilchen führen zu einem schwerwiegenden theoretischen Problem: Berechnungen auf der Grundlage der Quantenfeldtheorie führen zu unendlich hohen Energien.
- Physikalische Kern der Schwierigkeiten bereits in der klassischen Theorie: Elektron besitzt keine Innenstruktur.  
-> Annahme einer Punktförmigkeit geladener Teilchen.
- Beliebige Nähe geladener Teilchen führt zu unendlichen Ladungsdichten (analog auch Massen)
- Lösung durch Technik der „Renormierung“: Mathematischer Trick, mit dem durch geschickte Neu-Definition der Massen die Unendlichkeiten aufgelöst werden



$$F_{el} \sim \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$



- Einfügung einer Energieskala, in Bezug auf welche die Theorie formuliert wird
- Einbeziehung aller Beiträge außerhalb dieser durch Re-Definition der Ladung

## Der Substanzbegriff in der modernen Quantenfeldtheorie

- Vier Grundkräfte in der Natur: Neben Gravitation und Elektromagnetismus noch starke und schwache Kernkraft
- Entwicklung entsprechender „Quantenfeldtheorien“
- Heute: Grundlegendes Schema für die Klassifikation der Elementarteilchen in der „Standardtheorie“ (für die starke Kraft nannte Gell-Mann dies den „Achtfachen Pfad“)
- Glaube und Hoffnung der Physiker: Alle Kräfte lassen sich in einer vereinheitlichenden Kraft zusammenfassen.
- Gemäss klassischen Vorstellungen sprechen die Physiker immer noch von „Teilchen“ und „Kräften“.
- Im Grunde nur ein Veranschaulichungsstrick: Je tiefer man in die Grundstruktur der Materie eintaucht, desto verschwommener das Teilchenbild, desto mehr lösen sich die Substanzen hinter den einzelnen Phänomenen auf.



Murray Gell-Mann  
(1929 - )

➔ **Ein isoliertes „Teilchen“ – Stück Materie“ gibt es nicht mehr. Es wird permanent von einem fluktuierenden Quantenfeld und seinen „virtuelle Teilchen“ erzeugenden Wechselwirkungen begleitet. Ein „Teilchen“ ist vielmehr eine Wolke aus Feldern, Wechselwirkungen und anderen Teilchen, die allesamt einander bedingen und nicht voneinander trennbar sind.**

**I. Der Substanzbegriff in der westlichen Geistesgeschichte:  
Vom Atomismus Demokrits, der klassischen Galilei-Newton'schen  
Mechanik über Kants Antinomie zur Chemie Daltons**

**II. Von Dalton zur frühen Quantenphysik**

**III. Schöne neue abstrakte Welt – die Quantenmechanik**

**IV. Die Deutungsdebatte in der Quantenmechanik**

**V. Neue Überraschungen – Verbindungen mit der  
Relativitätstheorie: die Quantenfeldtheorie**

**VI. Realität makroskopisch und mikroskopisch**

**VII. Philosophische Bedeutung der Quantentheorie und  
Anknüpfungspunkte zu spirituellen Traditionen im Buddhismus**



## „Realität“ in unserer Erfahrungswelt

### Metaphysische Eigenschaften in unserer Alltagswelt (Makrokosmos)

- *Klare Trennung zwischen Objekte und Subjekte:*  
Dinge ausserhalb des Subjektes existieren und haben Eigenschaften unabhängig von unserer Wahrnehmung/Messung von ihnen.
- *Klare Eigenschaften (Zustände):*  
Dinge haben klar definierte Eigenschaften. Sie befinden sich in einem bestimmten Zustand (z.B. einem exakt bestimmbar Ort) und nicht in einer Überlagerung verschiedener Zustände (z.B. sie können nicht an zwei Orten auf einmal sein).
- *Klares Begrifflichkeit in der traditionellen Metaphysik*
- *Unterscheidbarkeit und „eigenes An sich Sein“ (Identität) der Objekte:*  
Dinge haben eine eigene Identität und lassen sich von anderen Dingen unterscheiden, z.B. durch ihre Positionen im Raum.
- *Deterministische Abläufe:*  
Vorgänge (in der physikalischen Welt) laufen vorherbestimmt nach gegebenen Gesetzen ab.

## „Realität“ im Mikrokosmos

### Metaphysische Eigenschaften in der atomaren Welt (Mikrokosmos)

- *Verschränkung von Objekten*  
Miteinander wechselwirkende Systeme sind untrennbar miteinander verschränkt. Insbesondere muss der Beobachter (Subjekt) in die beobachtete System einbezogen werden. Damit löst sich klare Trennung Beobachter – Natur auf.
- *Superpositionen von Zuständen*  
Die Zustände eines Systems sind nicht eindeutig, sondern können sich aus verschiedenen (klassisch klar getrennten) Zuständen zusammensetzen. Beispiel: Teilchen kann an mehreren Orten zugleich sein, deren Wahrscheinlichkeit durch Wellenfunktion gegeben ist.
- *Traditionelle Metaphysik hat keinen Wirklichkeitsbegriff für Quantenprozesse*
- *Keine Unterscheidbarkeit der Objekte mehr, nur noch „relationale Identität“*  
Einzelne Teilchen besitzen keine von der Umgebung getrennte Existenz. Sie sind auch in ihrem Sein untrennbar mit anderen verbunden. Vielteilchensysteme (wie schon das Helium-Atom) werden durch *gemeinsame Wellenfunktion* beschrieben.
- *Messgrößen verhalten sich stochastisch (nicht dagegen die Wellenfunktion).*

## Verbindungen zwischen Mikrokosmos und Makrokosmos

### Wo liegt die Grenze?

- Bohrs (Kopenhagener) Deutung des Apriorischen der klassischen Gesetze:
  - Wir brauchen notwendigerweise klassische Experimente und Begriffe, um die Quantennatur zu beschreiben.
  - Jegliche anschauliche oder begriffliche Übertragung führt uns jedoch in die Irre (hier gewisser Bezug zu Kant).
  - Trennung: Klassische Physik für Makrokosmos, Quantenphysik für Mikrokosmos
  
- Jedoch können uns die Physiker keine klare Trennung zwischen makro- und mikroskopischer Welt und ihrer spezifischen Gesetzmässigkeit angeben. Wo genau verläuft die Grenze zwischen der bizarr anmutenden Verschränkung aller Komponenten im Mikrokosmos und der Trennbarkeit der Objekte in der klassischen Physik?
  
- Warum messen wir makroskopisch überhaupt klare Zustände?
  
- Mit anderen Worten: Warum wird genau einer von den vielen möglichen klassischen Zuständen realisiert und nicht viele zugleich wie in quantenphysikalischen Superpositionen?

## Auf der Suche nach dem Übergang: Warum erleben wir, was wir erleben? Von der Dekohärenz der Quantenzustände

- „Onto-epistemische Einheit“: Jede physikalische Größe und jede Theorie ist ein Wissen und nicht identisch mit den „Dingen an sich“.
- Darüber hinaus: Einige Physiker sprachen sogar dem Bewusstsein den entscheidenden Schritt in diesem Übergang zu (z.B. Eugen Wigner).
- Neuste Entwicklungen in der Physik – den gesamte Messprozess quantentheoretisch betrachten
- Physiker sehen in der Quantentheorie die grundlegende Theorie und beschreiben die Übergänge zum Makroskopischen ebenfalls mit Hilfe der Schrödinger-Gleichung.
- Dabei kommt der Wechselwirkung zwischen Objekt und dem Messinstrument (sowie auch der Umgebung) eine neue, wichtige Bedeutung zu (Stichwort: „**Dekohärenz**“): In grossen Systemen (viele Freiheitsgrade) mitteln sich die Quanteneigenschaften heraus.

**Inhalt**

**I. Der Substanzbegriff in der westlichen Geistesgeschichte:  
Vom Atomismus Demokrits, der klassischen Galilei-Newton'schen  
Mechanik über Kants Antinomie zur Chemie Daltons**

**II. Von Dalton zur frühen Quantenphysik**

**III. Schöne neue abstrakte Welt – die Quantenmechanik**

**IV. Die Deutungsdebatte in der Quantenmechanik**

**V. Neue Überraschungen – Verbindungen mit der  
Relativitätstheorie: die Quantenfeldtheorie**

**VI. Realität makroskopisch und mikroskopisch**

**VII. Philosophische Bedeutung der Quantentheorie und  
Anknüpfungspunkte zu spirituellen Traditionen im Buddhismus**

## Aufgabe des klassischen Substanzbegriffs kleinster Teilchen

- Das klassische Konzept isolierter Teilchen (wie z.B. das von Demokrit mit Haken und Ösen) verschwindet in der Quantenwelt.
- „Teilchen“ werden permanent von einem fluktuierenden Quantenfeldern und seinen „virtuelle Teilchen“ erzeugenden Wechselwirkungen begleitet.
- Ein „Teilchen“ ist vielmehr eine Wolke aus Feldern, Wechselwirkungen und anderen Teilchen, die allesamt einander bedingen und nicht voneinander trennbar sind.
- Auch existieren diese Teilchen nicht mehr in Raum und Zeit, sondern in einem „hochabstrakten“ – und höher-dimensionalen - „Darstellungsraum“.

### Parallelen zur buddhistischen Ontologie

- Ablehnung des substantiellen Atomismus
- Ständige Veränderung und Vergänglichkeit
- Atome sind teilbar und nicht dauerhaft

## Aufgabe der unabhängigen Existenz der Objekte (Verschränkung der Objekte)

- Die verschiedenen Quanten- „Objekte“ eines Systems (die einzelnen Teilchen) hängen derart miteinander zusammen, dass sie nicht mehr getrennt betrachtet, nicht mehr mit definierten Zuständen beschrieben werden können, sondern nur noch das System als Ganzes.
- Verschränkte Teilchen sind untrennbar miteinander verbundene Quanten-Objekte, die sich als Ganzes in einer Überlagerung von gemäss der klassischen Physik einander ausschliessenden Zuständen befinden können.
- Quanten- „Objekte“ (die einzelnen Teilchen) besitzen keine absolute Identität mehr, keine Individualität, keinen ‚eigenen Charakter‘, sondern tragen nur noch „relationale“ Identität.
- Als einzelne voneinander getrennte Teilkomponenten gibt es sie nicht. Ein einzelnes Quanten-„Objekt“ existiert nicht mehr! => klarer Bruch mit klassischer Metaphysik.
- Bereits bei Kant: Wir können die „Dinge an sich“ nicht erfassen.

### Parallelen zur buddhistischen Ontologie

- Interdependenz und Wechselwirkung aller Dinge: Grundlegende Wirklichkeit ist nichts Eigenständiges, sondern besteht aus Systemen abhängiger Komponenten.
- Pratīyasamutpāda, sunyata: Bedingtes Entstehen
- Kausalitätsvorstellung

## Aufgabe des Subjekt-Objekt-Dualismus

- Trennung von Beobachter (Subjekt) und Objekt in der Quantenwelt nicht mehr möglich
- Messung beeinflusst immer auch das zu messenden Objekt.
- Beobachter ist Teil des Gesamten, er ist mit dem Objekt „verschränkt“.
- Zugleich keine rein subjektivistische Deutung (Auffassung, dass alle Erfahrung von der Welt nur vom Beobachter abhängt ): neuer Wirklichkeitsbegriffes, der in der traditionellen Metaphysik der westlichen Philosophie keine eindeutige Entsprechung findet
- Der gesamte Prozess der Messung/Beobachtung muss quantentheoretisch beschrieben werden. Frage ist daher: Warum erleben wir makroskopisch klare Zustände?

### Parallelen zur buddhistischen Ontologie

- Ablehnung einer dualistischen Trennung der Welt
- Nichttrennbarkeit in einzelne Systeme (=> Nagarjuna)
- Holistische Auffassung



## „Illusion unserer Erfahrungswelt“ – im Mikroskopischen ist alles anders

- Paradoxa, die sich ergeben, wenn wir unsere Anschauungen und Begriffe aus der Alltagswelt auf die Welt des Mikrokosmos anwenden, waren sich bereits Philosophen wie Kant – und wohl auch die indischen Philosophen - bewusst gewesen.
- Quantenphysik macht einen entscheidenden Schritt: Sie lehnten jeden Anspruch auf anschauliche Erklärung mittels unserer „normalen“ Vorstellung ab.
- Physiker verlassen sich rein auf die mathematische Konsistenz ihrer Theorie und machen damit Vorhersagen über den Ausgang bestimmter Prozesse/Experimente.
- Die zugrunde liegende Realität – das „wahre Wesen der Dinge“ ist nun einmal ganz anders als das was wir in unseren Anschauungen und Begriffen erfassen.

### Parallelen zum buddhistischen Denken

- Illusion unserer alltäglichen Erfahrung
- Da wir in unserem alltäglichen Leben der Welt reale und unabhängige Dinge erfassen, gehen wir von unabhängigen und substantiellen Objekten aus. Bereits Nagarjuna hinterfragte die metaphysischen Konzepte dahinter.

## Was bleibt?

- Quantenphysikalische Vorgänge lassen sich nicht mehr in traditionelle metaphysischen Begrifflichkeiten und Anschauungen darstellen.
- Substantialität kleinster Teilchen wird abgelehnt. Vielmehr sind die Teilchen Kombinationen (Wolken) aus Feldern, Energien und anderen Teilchen, die virtuell entstehen und vergehen.
- Hier trifft sich die Quantenphysik mit den Vorstellungen buddhistischer Lehren, insb. Nagarjunas.
- Keine klare Metaphysikalischer Rahmen mehr. Eher Ablehnung/Hinterfragung bestehender Konzepte.