

Klassische Welt - Quantenwelt

Die wissenschaftlich Beschreibung der physikalischen Welt erfolgt mittels mathematischer Modelle, welche (im Idealfall) axiomatisch aus beobachteten und experimentell überprüften Grundannahmen nach den Regeln der mathematischen Logik abgeleitet werden.

Physikalische Theorien lassen sich prinzipiell nicht beweisen, sondern nur falsifizieren.
(Karl Popper)

Eine gute Theorie muss das Potential haben, neue Phänomene vorherzusagen. Die Aufgabe der Experimentalphysik ist es, diese „Vorhersagen“ zu bestätigen.

Beispiel: Elektrodynamik (1864) – *elektromagnetische Wellen* – Heinrich Hertz 1886

Bestandteile einer physikalischen Theorie können nur Objekte und Prozesse sein, die sich messen lassen. Dazu ist

- a) eine begriffliche Grundlage (Teilchen, Masse, Ladung, Bewegung, ... etc.) zu schaffen und
- b) ein Einheitensystem sowie Messvorschriften festzulegen (Bezugsrahmen)

Die „Makroskopische“ Welt wird durch „klassische“ Theorien außergewöhnlich gut beschrieben:

- **Klassische Mechanik**

Newtonsche (Punkt-) Mechanik
Lagrange-Formalismus
Hamilton-Formalismus
Hamilton-Jacobi-Formalismus

Kontinuumsmechanik
Technische Mechanik

- **Klassische Elektrodynamik**

Maxwellsche Gleichungen

- **Klassische Thermodynamik**

Phänomenologische Theorie, die sich auf die Klassische Mechanik = „Statistische Mechanik“ zurückführen lässt

- **Spezielle Relativitätstheorie**

Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

- **Allgemeine Relativitätstheorie**

Allgemeines Kovarianzprinzip

Klassische Physik

„Objekte“ : „Punktmassen = Teilchen“, „ausgedehnte Körper“, „Felder“

„Naturkonstanten“ : Gravitationskonstante, Lichtgeschwindigkeit, Boltzmannkonstante

„Bezugsrahmen“ : Raum und Zeit (Mannigfaltigkeiten, Metrik, Koordinatensysteme)

„Einheitensystem“ : SI, zurückgeführt auf Naturkonstanten, reproduzierbar durch
Messvorschriften

„Naturgesetze“ : Bewegungsgesetze, ausgedrückt durch Differentialgleichungen



Mathematisches Modell

Empirische Überprüfbarkeit

Deterministisch

Treffen von Vorhersagen

Die „Mikroskopische“ Welt wird durch die Quantentheorie nach heutigen experimentellen Maßstäben quasi exakt beschrieben:

- Nichtrelativistische Quantenmechanik Schrödingergleichung
- Relativistische Quantenmechanik Dirac + Klein-Gordon-Gleichung
- Quantenfeldtheorien Quantenelektrodynamik
Eichtheorien der Wechselwirkungen
Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Die Quantentheorie ist eine deterministische Theorie, die aber nur Wahrscheinlichkeitsaussagen zulässt. Erst eine „Messung“ realisiert einen konkreten Eigenschaftswert (z. B. „Ort“, „Impuls“), wobei es komplementäre Eigenschaftspaare gibt, die sich prinzipiell nicht gemeinsam „genau“ bestimmen lassen (Unschärferelationen“

Quantenphysik

„**Objekte**“ : Quantenobjekte, dargestellt durch Observable, die den „Zustand“ eines quantenmechanischen Objektes / Systems beschreiben (Elementarteilchen, Quantengas, Quantenfeld)

„**Naturkonstanten**“ : Plancksches Wirkungsquantum, Lichtgeschwindigkeit, Boltzmann-K.

„**Bezugsrahmen**“ : Raum und Zeit (Mannigfaltigkeiten, Metrik, Koordinatensysteme)

„**Einheitensystem**“ : SI, zurückgeführt auf Naturkonstanten, reproduzierbar durch Messvorschriften (natürliches Einheitensystem: $h=c=k_B=m_p=1$)

„**Naturgesetze**“ : Bewegungsgesetze, welche die „Ausbreitung“ einer „Wellenfunktion“ beschreiben (Schrödingergleichung, Welle-Teilchen-Dualismus)



Mathematisches Modell

Zustandsvektoren im Hilbert-Raum

Treffen von Wahrscheinlichkeitsaussagen

ONTOLOGIE

Problem: Das mathematische Modell der klassischen Mechanik unterscheidet sich diametral von dem mathematischen Modell der Quantentheorie

Die Quantentheorie muss als fundamentale Theorie natürlich auch alle Phänomene der klassischen Physik (z. Z. noch mit Ausnahme der Gravitation) beschreiben. Wieso treten aber die typischen Phänomene der Quantenphysik wie die Superposition von Zuständen oder die Verschränkung von Zuständen nicht in der Makrowelt in Erscheinung?

Übergang „Quantenwelt“ – „Makroskopische Welt“

In diesen Bereich ergeben sich aus dem Formalismus der Quantenmechanik „Paradoxien“ in Hinblick auf die Interpretation der „Wellenfunktion“ und deren Reduktion auf einen Beobachtungswert im Akt der Messung.

Kollaps der
Wellenfunktion

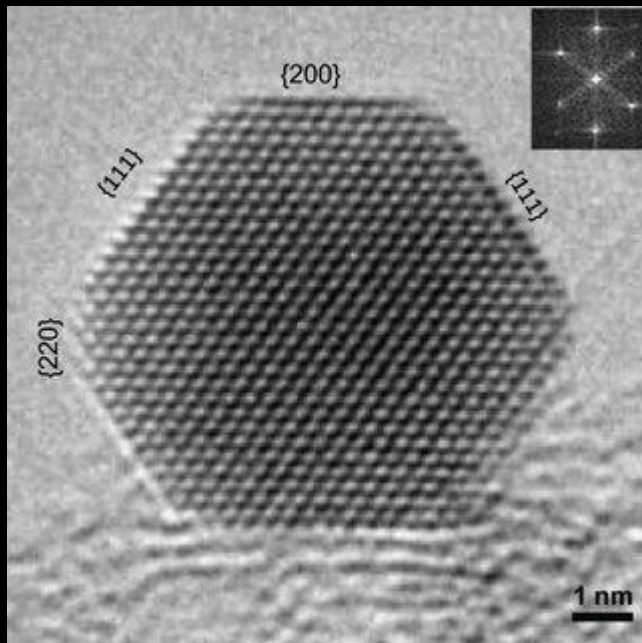


Dekohärenz

Wo endet die „Quantenwelt“ und wo beginnt die „Makrowelt“?

Die „**Quantenwelt**“ ist dadurch gekennzeichnet, dass hier der Welle-Teilchen-Dualismus zutage tritt. Je nach „Messaufgabe“ repräsentieren sich hier „Teilchen“ entweder als „Wellen“ (Interferenzexperimente) oder als „Teilchen“ (Lokalisierungsexperimente).

In der „**Makrowelt**“ sind dagegen die „Quanteninterferenzeigenschaften“ so klein, dass sie dort keine Rolle spielen (mit Ausnahmen – Supraleitung, Suprafluidität, extreme Sternmaterie)



„Räumlicher Bereich“

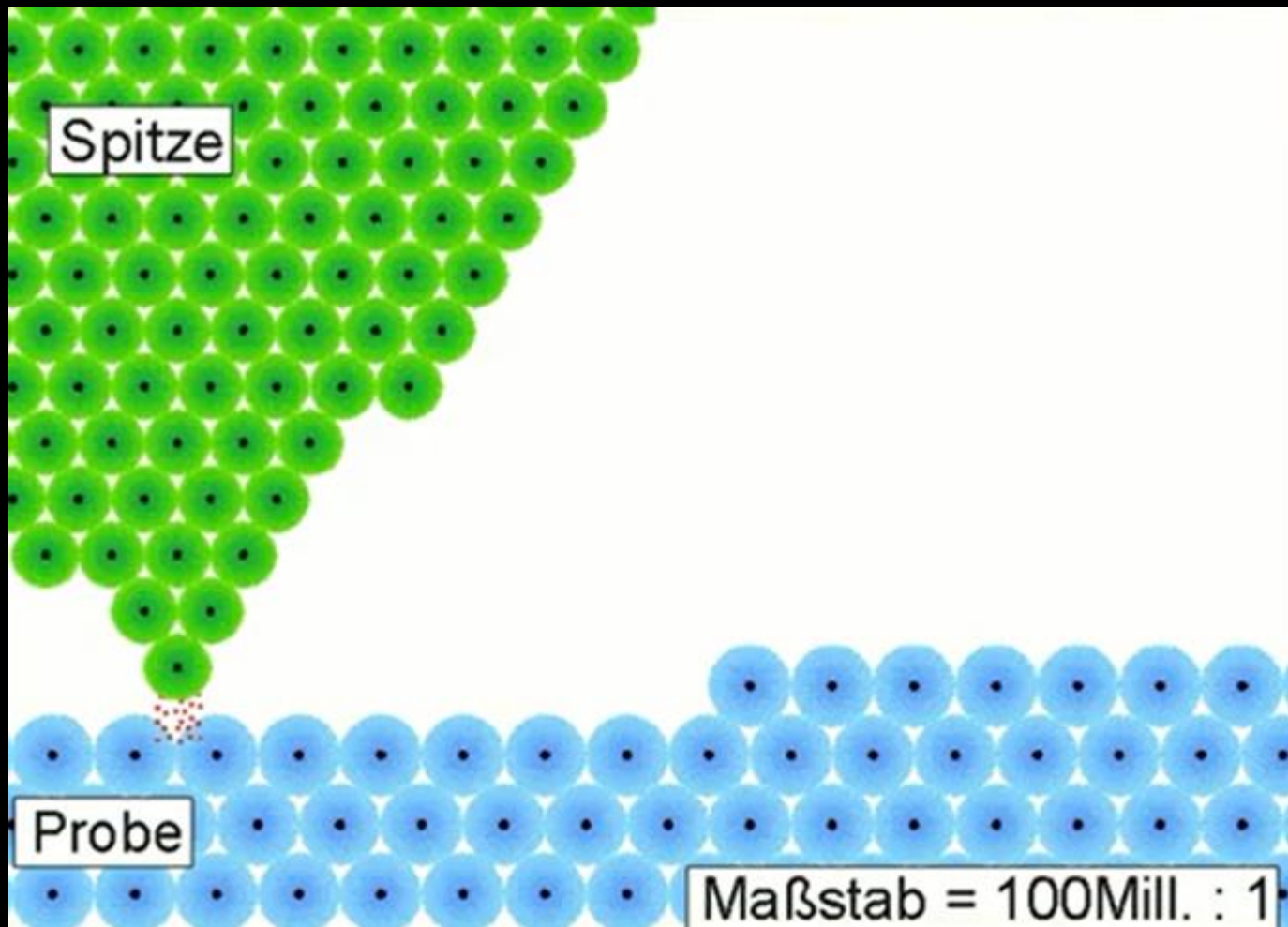
- Molekülgröße (Nanometerbereich 10^{-9} m)
- Planckschen Länge (10^{-35} m)

„Elementarteilchen“

- zeigen keine räumliche Struktur“ (punktförmig)
- haben „Quanteneigenschaften“

Electron Tomography

Atome sichtbar machen – Korrelative Mikroskopie



Tunneleffekt
Tunnelstrom

Rastertunnelmikroskop

Gerd Binnig (Deutschland), Heinrich Rohrer (Schweiz)
Nobelpreis 1986

Gold-Einkristall

