

A close-up portrait of Guido Kuper, a man with short brown hair and glasses, smiling. He is wearing a light blue shirt. The background is dark.

# **Guido Kuper: Quantenphysik - Was ist los im Mikrokosmos?**

## **Vortragsabend**

Der Osnabrücker Physiker Guido Kuper hat sich das Ziel gesetzt, physikalische Zusammenhänge lebendig und für den Laien verständlich darzustellen. Er war schon einmal im Februar 2020 zu Gast im Kuk-Haus und hat über "Einsteins Relativitätstheorie - eine Reise durch Raum und Zeit" berichtet.

Am Montag, den 05. Dezember 2022 um 19:30 Uhr, ist er wieder da und wird in die folgende Themenwelt einführen:  
"Quantenphysik - Was ist los im Mikrokosmos? Eine phantastische Reise durch die verrückte Welt der kleinsten Dinge!".

Er wird uns in die skurrilen Phänomene einführen, die in der sogenannten Quantenwelt zu finden sind und wird uns unter anderem erklären, was denn Quanten sind, was es mit einem Quantensprung auf sich hat und was das Ganze mit unserer Alltagswelt zu tun hat. Auch wichtige historische Schritte bei der Entdeckung dieser Welt werden kurz erläutert.

Termin: Montag, 5. Dezember 2022, 19:30 Uhr  
Ort: KuK-Haus, Am Krümpel 1a, 49201 Dissen

# Quantenphysik

*Was ist los im Mikrokosmos?*

*Eine phantastische Reise  
durch die Welt der kleinsten Dinge!*

Guido Kuper, Dezember 2022

## Zur Motivation...

---



*Wenn jemand  
die Quantenmechanik verstanden hat,  
dann ist er verrückt  
oder  
er hat sie nicht verstanden!*

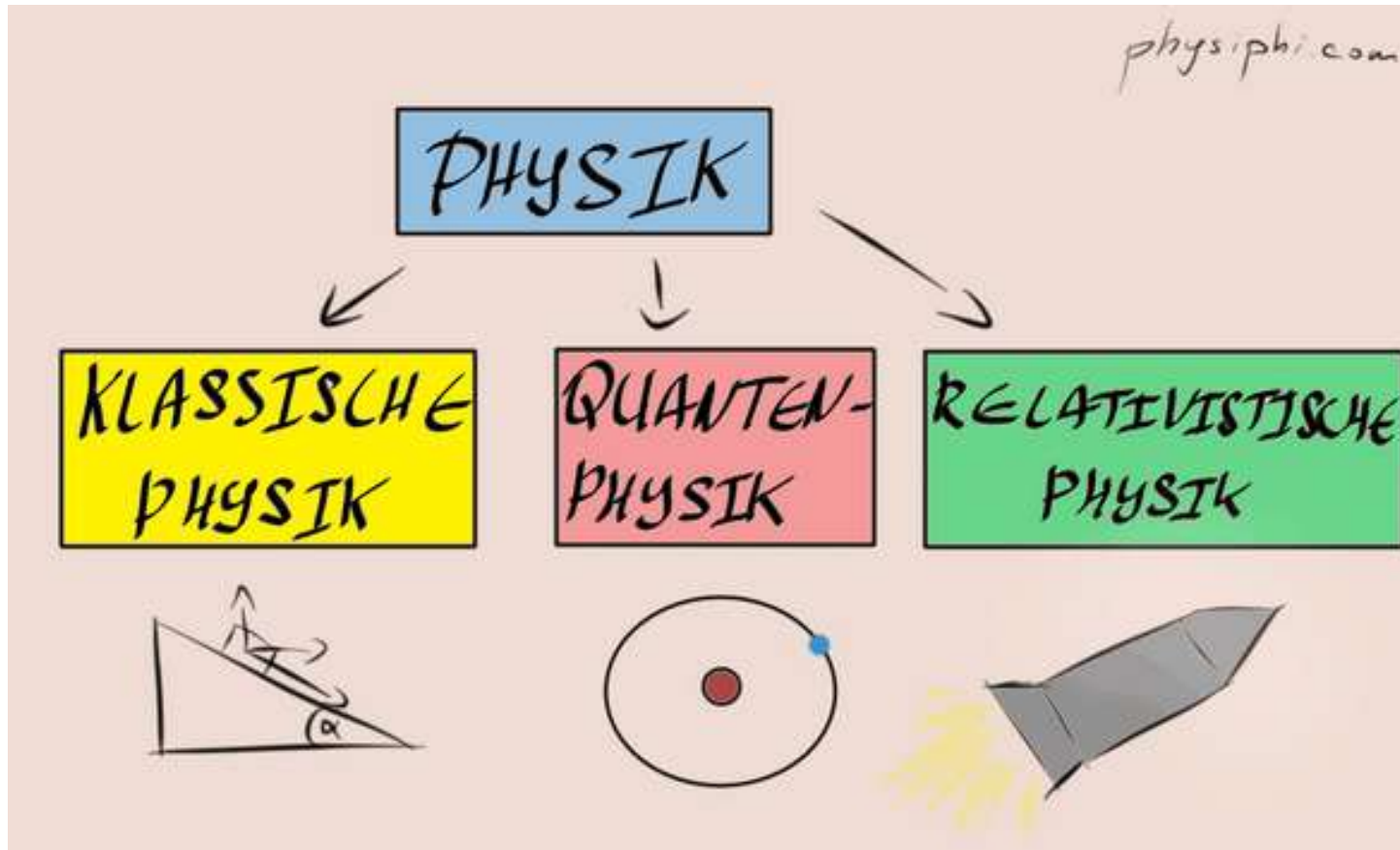
(Nils Bohr, Quantenphysiker)

# Quantenphysik - Einführung

---

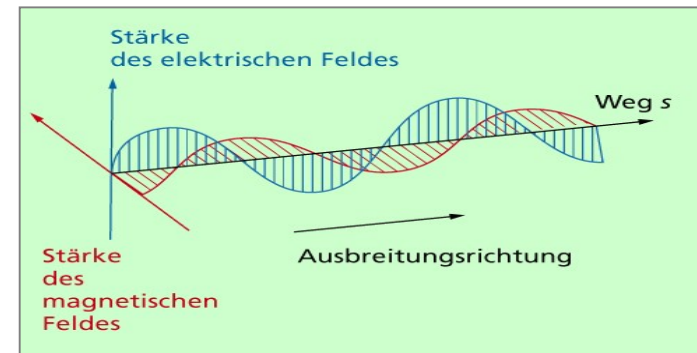
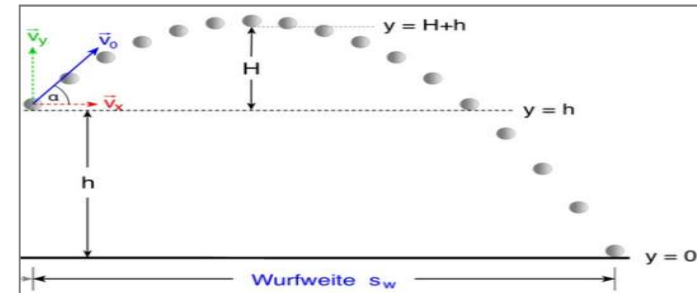
- Wie ist der **Aufbau der Materie**?
- Was haben Quanten mit **Teilchen und Wellen** zu tun?
- Was sind **Quanten** und was sind **Quantensprünge**?
- Welchen **verrückten Verhaltensregeln** folgen Quanten?
- Was hat es mit „**Schrödingers Katze**“ auf sich?
- Wo sind denn **Quantenphänomene im Alltag** zu finden?

# Klassische Physik als Ausgangspunkt



# Erkenntnisse bis zum Ende des 19. Jahrhunderts

- Gesetze der **Mechanik**
  - Galilei, Kepler, Newton
  - Freier Fall, Wurfbahnen, Gravitationsgesetz, Planetenbewegung
- Gesetze des **Elektromagnetismus**
  - Maxwell
  - Elektrizität, Magnetismus
  - Licht als elektromagnetische Welle
- Ausbreitung von **Wellen**
  - Wasserwellen
  - Schallwellen



# Entwicklung einer wissenschaftlichen Theorie

## Variante A

1. (Zufällige) Beobachtung
2. Wissenschaftliche Erklärung

Beispiel:

Newton, Schwerkraft

Quantenphysik



## Variante B

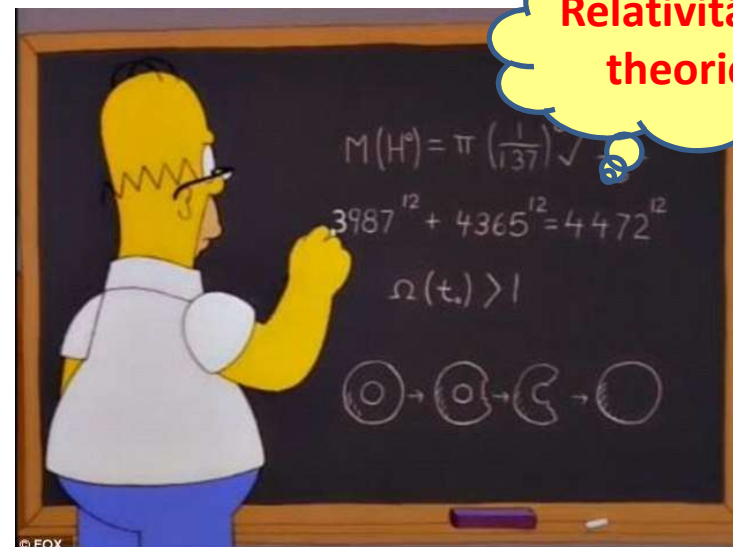
1. Wissenschaftliche Herleitung
2. (Suche nach) Beobachtung

Beispiel:

Relativitätstheorie

Elementarteilchen-Physik,

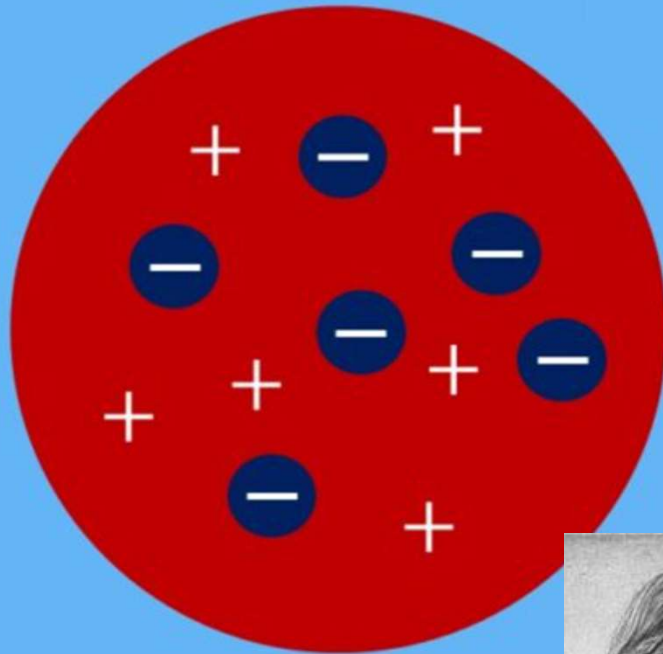
Suche nach dem Higgs-Teilchen



## Atommodelle

# Entdeckung der Atome - Atommodelle

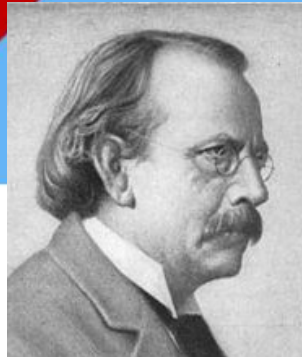
## Atommodell Thomson



Atome haben eine  
gleichmäßig verteilte positive Masse

Darin enthalten sind negative Teilchen:  
Elektronen

"Rosinenkuchenmodell"



Joseph John Thomson  
(1903)

# Entdeckung der Atome - Atommodelle

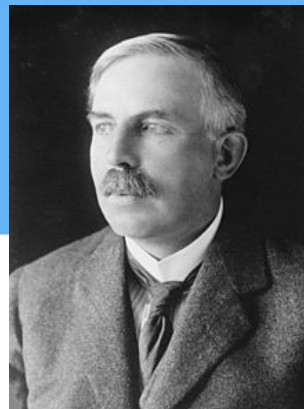
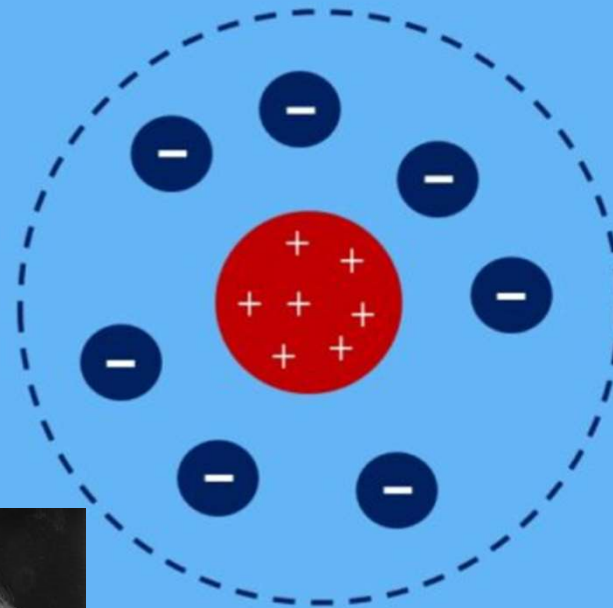
## Atommodell Rutherford

Atom...

...besteht aus großer,  
negativ geladener Hülle

...hat kleinen, positiven Kern

Grundlage durch Streuversuch  
von Rutherford

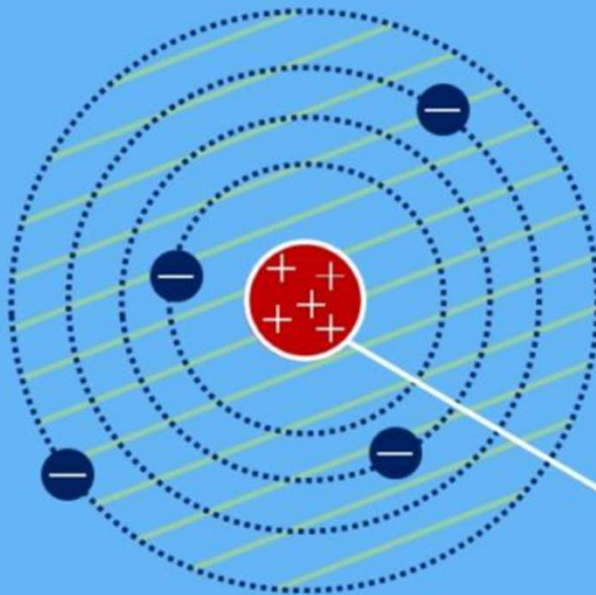


Ernest Rutherford  
(1909)

# Entdeckung der Atome - Atommodelle

## Bohrsches Atommodell

entwickelt vom Physiker Niels Bohr



Erstes Modell mit Elementen der Quantenmechanik

Elektronen bewegen sich auf Kreisbahnen

- fester Radius
- bestimmte Energien

Atomkern

Niels Bohr  
(1913)



# Entdeckung der Atome - Atommodelle

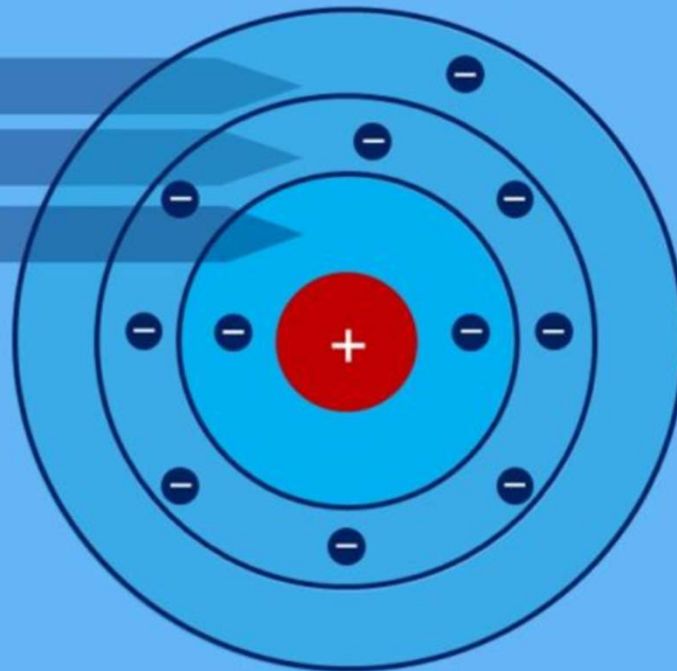
---

## Schalenmodell

M-Schale

L-Schale

K-Schale



Erweiterung des  
bohrschen  
Atommodells

Elektronen bewegen sich  
in Schalen um den Kern

# Entdeckung der Atome - Atommodelle

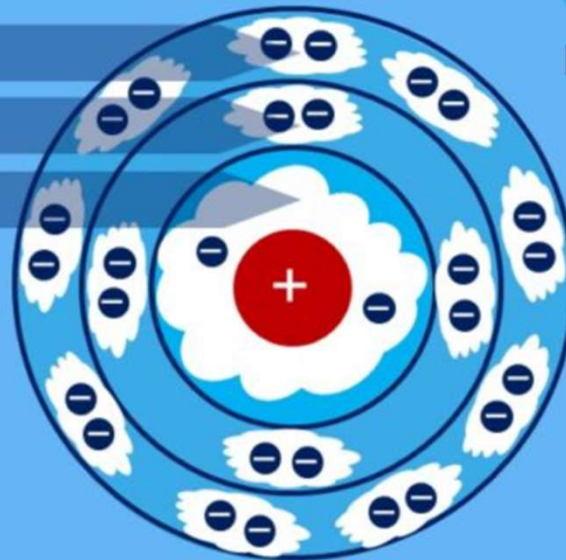
## Kugelwolkenmodell

➔ Erweiterung des Schalenmodells  
in Richtung Orbitalmodell

M-Schale

L-Schale

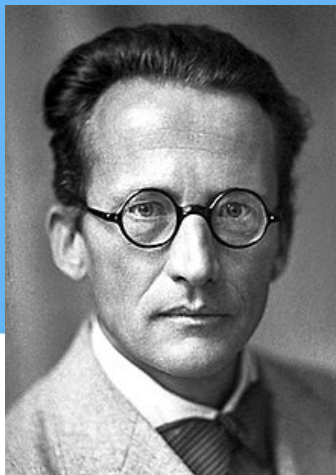
K-Schale



Elektronenschalen sind in  
Kugelwolken unterteilt.

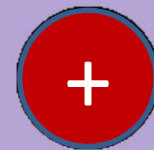
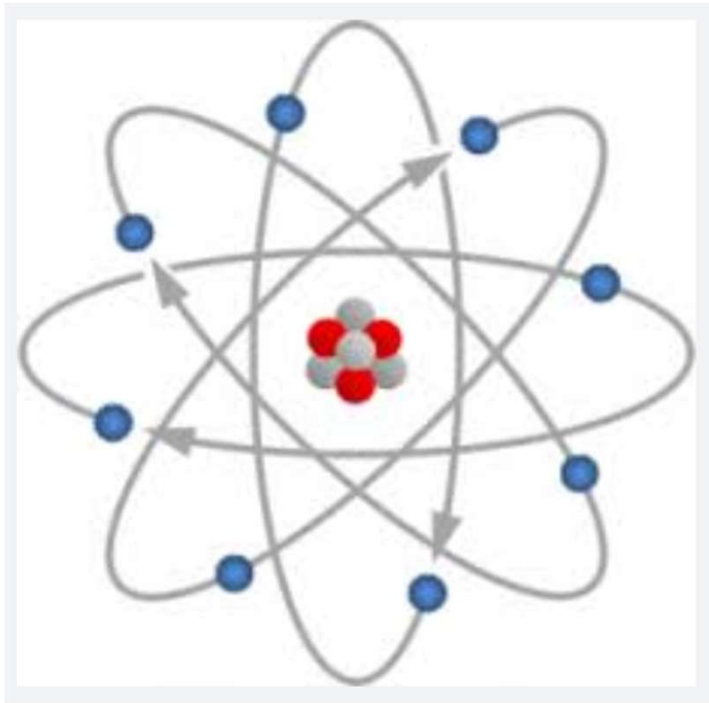
➔ maximal mit 2  
Elektronen gefüllt

Orbitalmodell, entwickelt vom  
Physiker Erwin Schrödinger



Erwin Schrödinger  
(1926)

# Entdeckung der Atome - Atommodelle



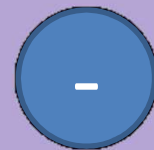
## Protonen

positiv geladen +1  
Masse im Verhältnis 1



## Neutronen

keine Ladung  
Masse im Verhältnis 1



## Elektronen

negativ geladen -1  
Masse im Verhältnis 0,0005

# Entdeckung der Quanten und ihrer Natur

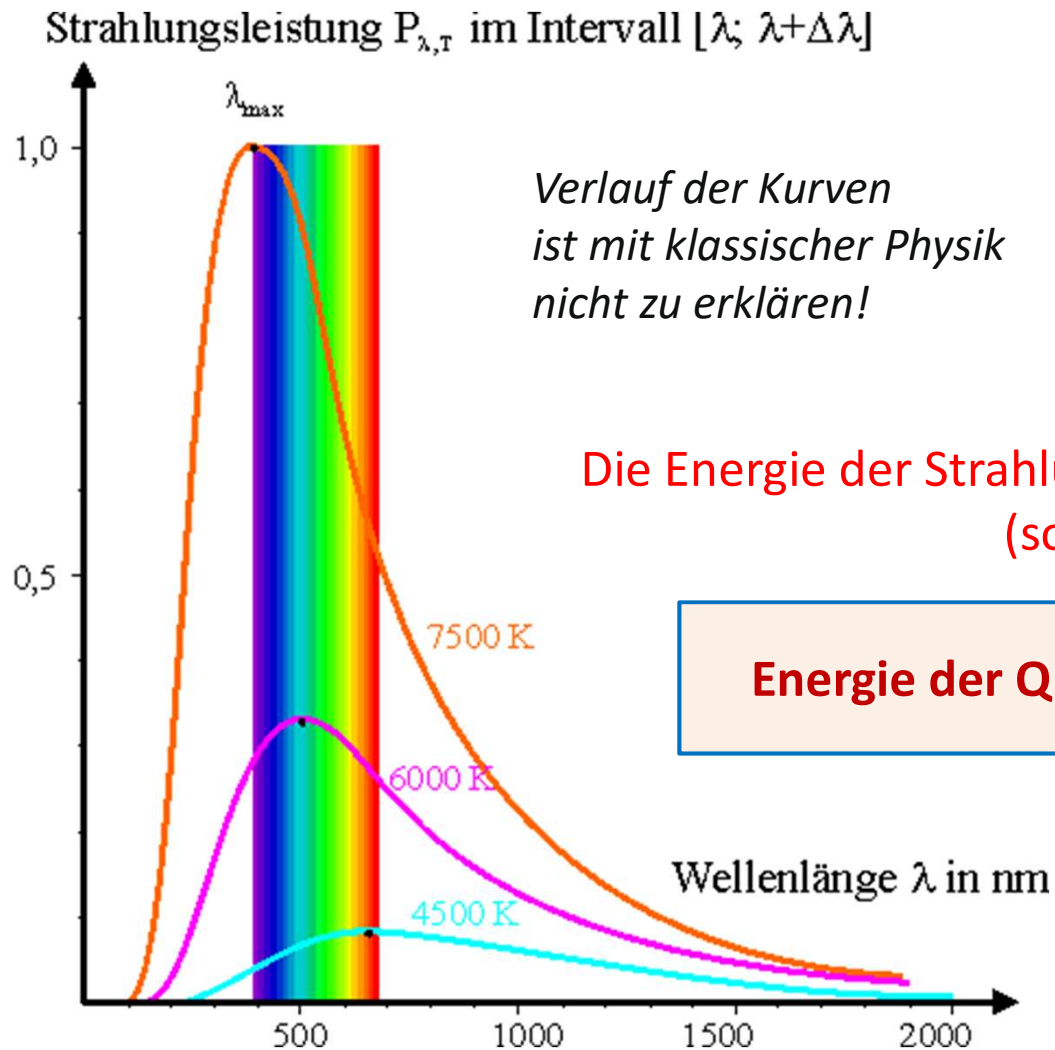
# Strahlung schwarzer Körper

---

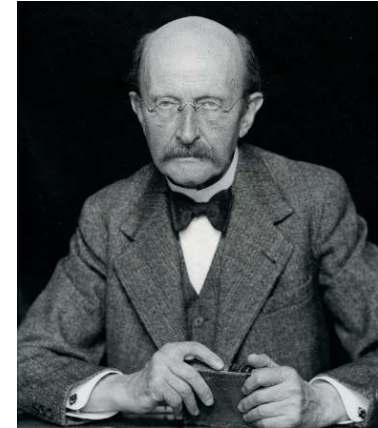


|                     |                  |                                           |
|---------------------|------------------|-------------------------------------------|
| <b>Glutverlauf:</b> | Unter 400 Grad   | - nur warme unsichtbare Infrarotstrahlung |
|                     | 400 Grad         | - sehr dunkle farblose Grauglut           |
|                     | 700 Grad         | - dunkle Rotglut                          |
|                     | 900 Grad         | - helle Rotglut                           |
|                     | 1.100 Grad       | - Gelbglut                                |
|                     | 1.400 Grad       | - Weißglut                                |
|                     | Über 10.000 Grad | - zunehmend UV-Strahlung                  |

# Strahlung schwarzer Körper



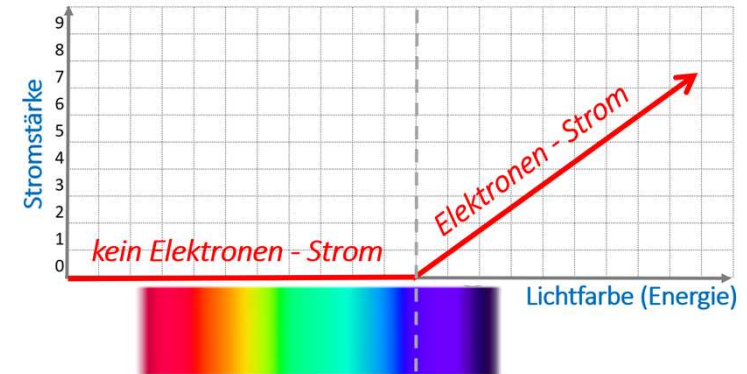
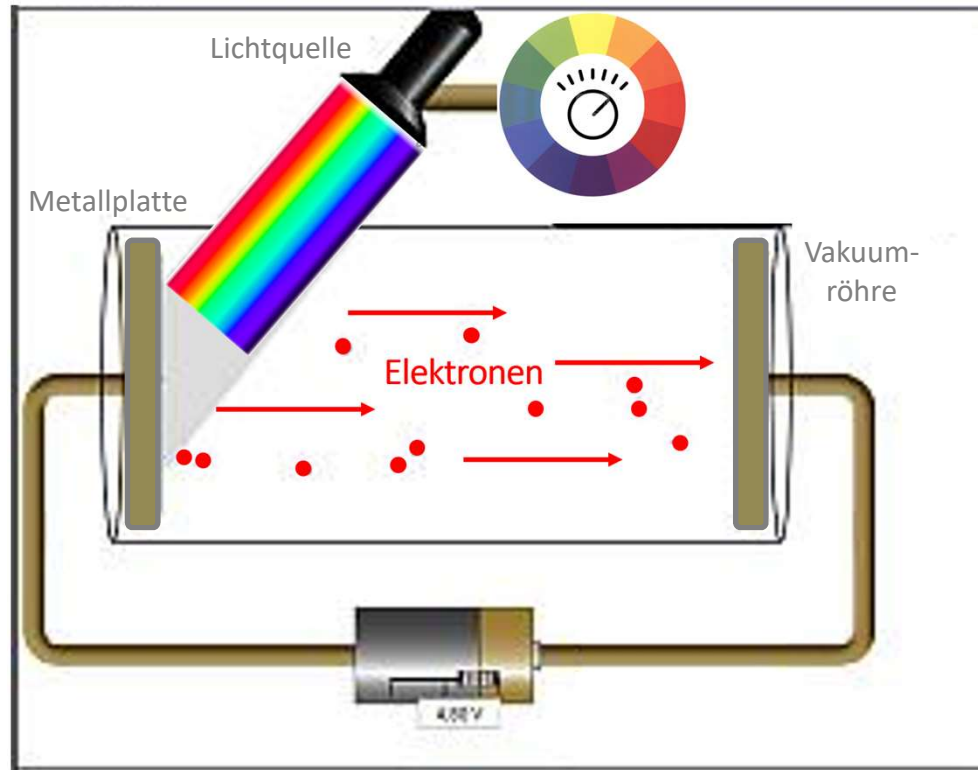
Max  
Planck  
löst das  
Rätsel  
um 1900



Energie der Quanten:  $E = h \cdot \text{Frequenz}$

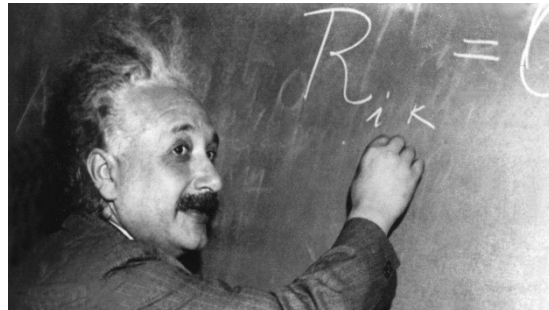
$h = \text{Plancksches Wirkungsquantum}$   
 $6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Joule Sekunde}$

# Photoelektrischer Effekt (Photoeffekt)



Erst oberhalb einer gewissen Frequenz (= Energie) des Lichtes können **Elektronen** aus dem Metall „herausgeschlagen“ werden

Albert Einstein  
(1906)



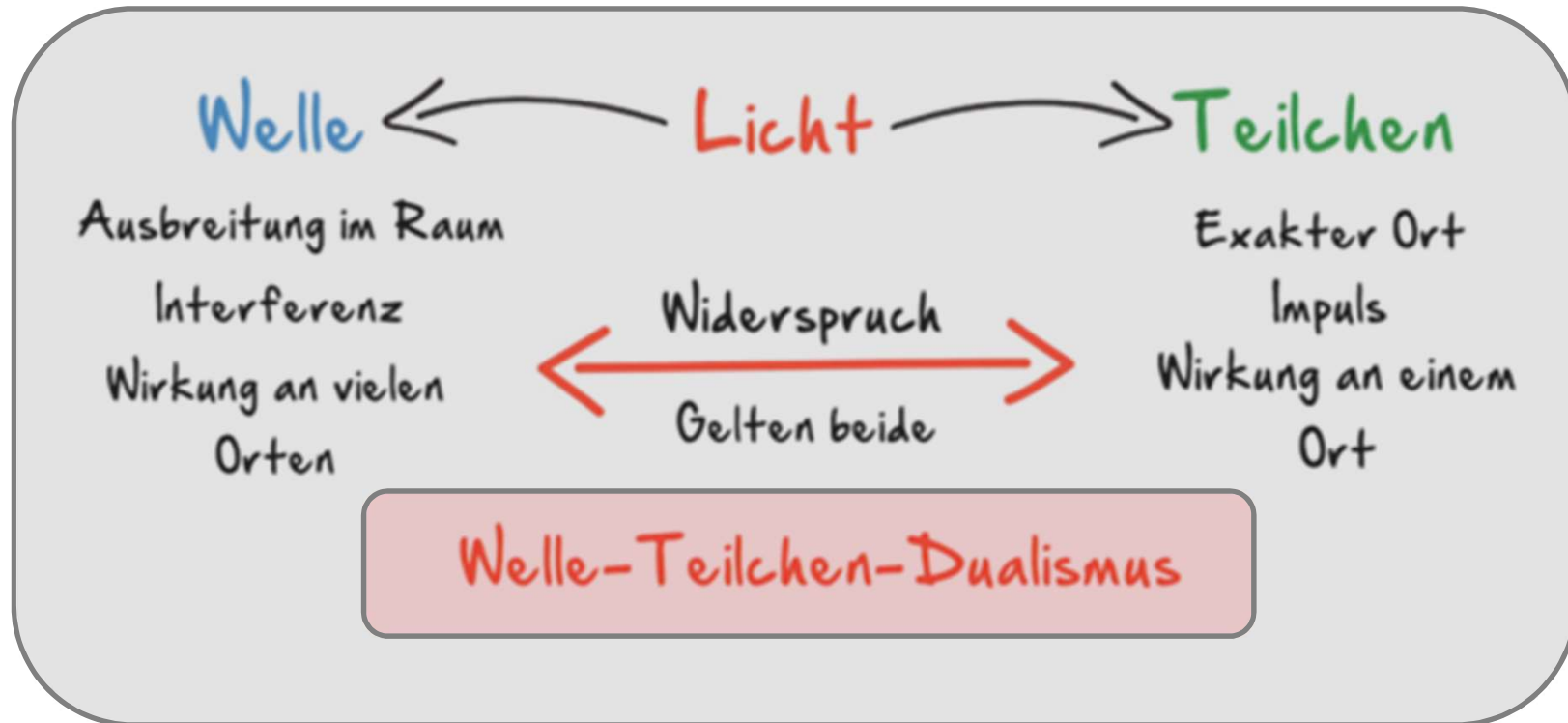
1 Lichtquant („Photon“)  
schlägt  
1 Elektron heraus

# Licht – Welle oder Teilchen?

---



# Licht – Welle oder Teilchen?



# Wellennatur der Materie und Unschärfe in der Quantenwelt

# Quantenobjekte - Teilchen oder Welle

---

Wenn Licht (bekannt als Welle)  
Teilchencharakter hat...

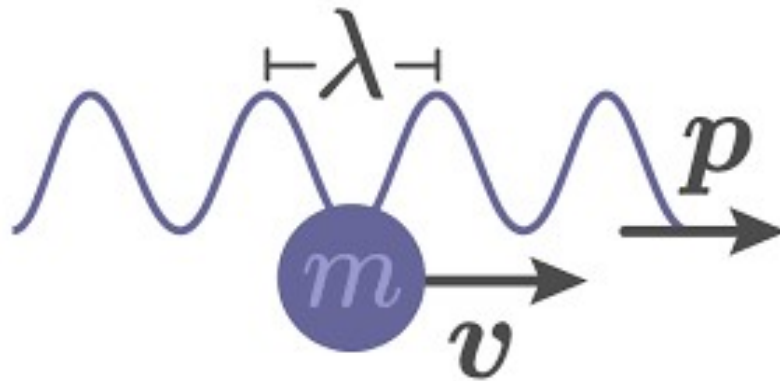
...haben dann auch Teilchen  
einen Wellcharakter

???

# Quantenobjekte - Teilchen oder Welle

Antwort: **JA**

Teilchen haben auch Wellencharakter!

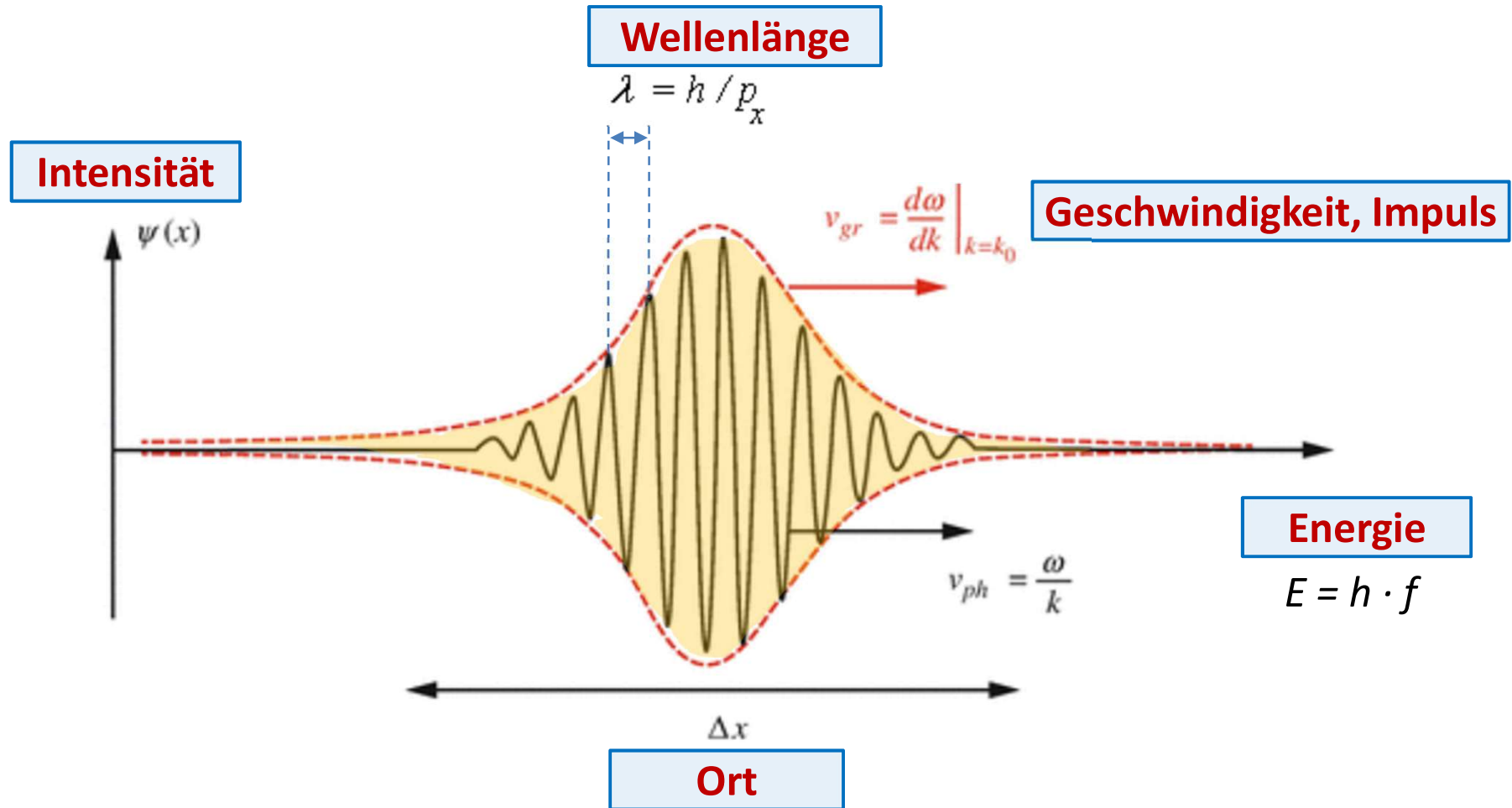


Das kann durch gewisse Experimente  
nachgewiesen werden



Louis de Broglie  
(1927)

# Darstellung eines Quantenobjekts



Darstellung als Wellenpaket  
(Teilchen + Welle)

# Heisenbergsche Unschärferelation

## Heisenbergsche Unschärferelation

Für **Ort** und **Impuls/Geschwindigkeit**

- 1) Eine „Unschärfe“ ist eine unvermeidbare Konsequenz aus der Wellennatur eines Quantenobjekts
- 2) Die Wellennatur eines Quantenobjekts führt zu einer gewissen Unbestimmtheit ihrer Teilcheneigenschaften

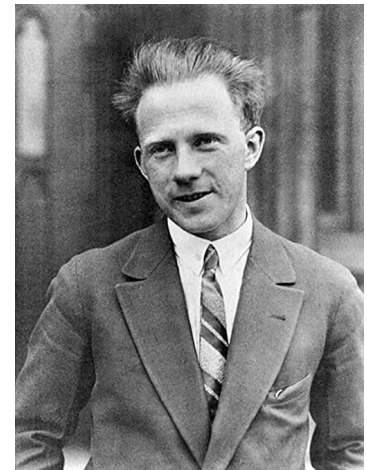
Ungenauigkeit  
des Ortes  $x$

Ungenauigkeit  
des Impulses  $p$

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Planck'sche  
Wirkungs-  
quantum

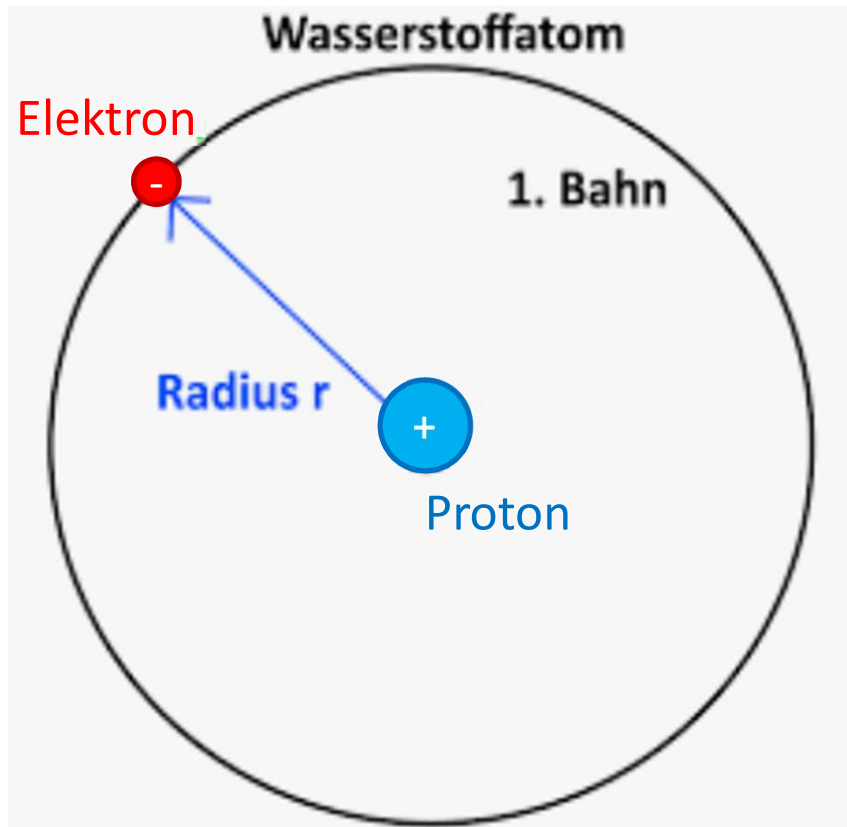
Werner  
Heisenberg  
(1927)



Emission  
Absorption  
Quantensprünge  
Atomspektren

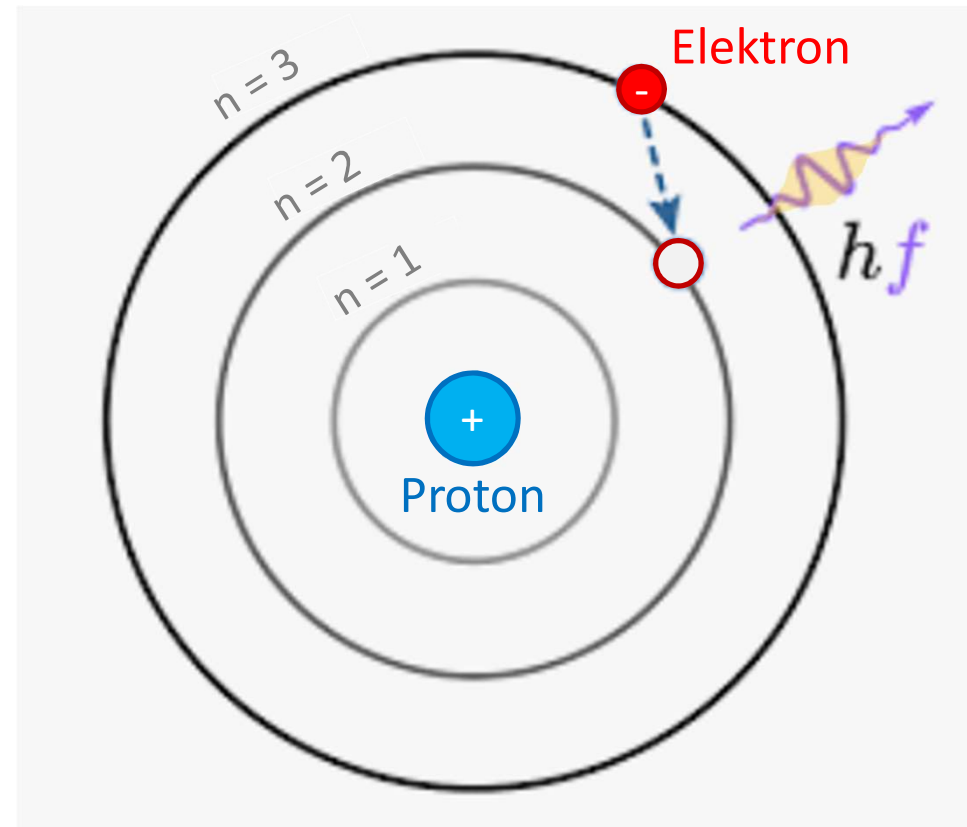
# Wasserstoffatom

## Klassische Vorstellung



Eine feste Elektronenkreisbahn

## Bohr Atommodell

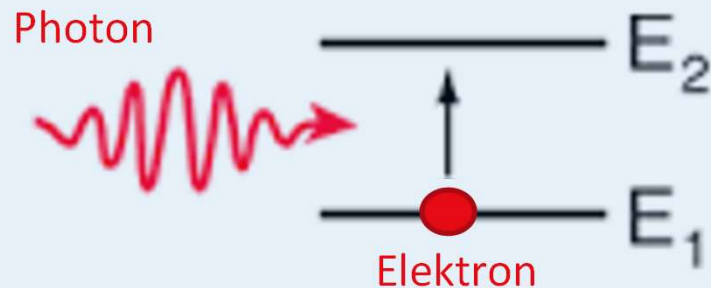


Verschiedene Elektronenkreisbahnen  
mit jeweils festen Energieniveaus  
(Treppenstufen)

# Absorption und Emission von Licht

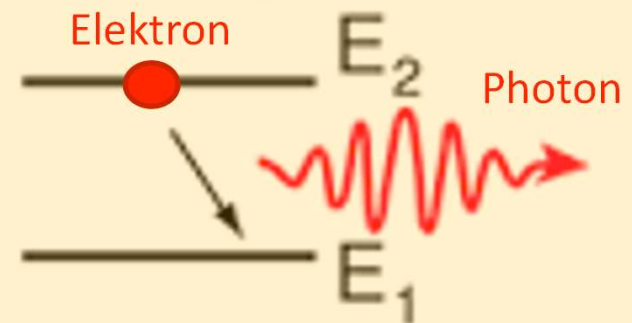
## Absorption eines Licht-Photons

Elektron wird durch „passendes“ Photon angeregt und in den höheren Energiezustand  $E_2$  gehoben



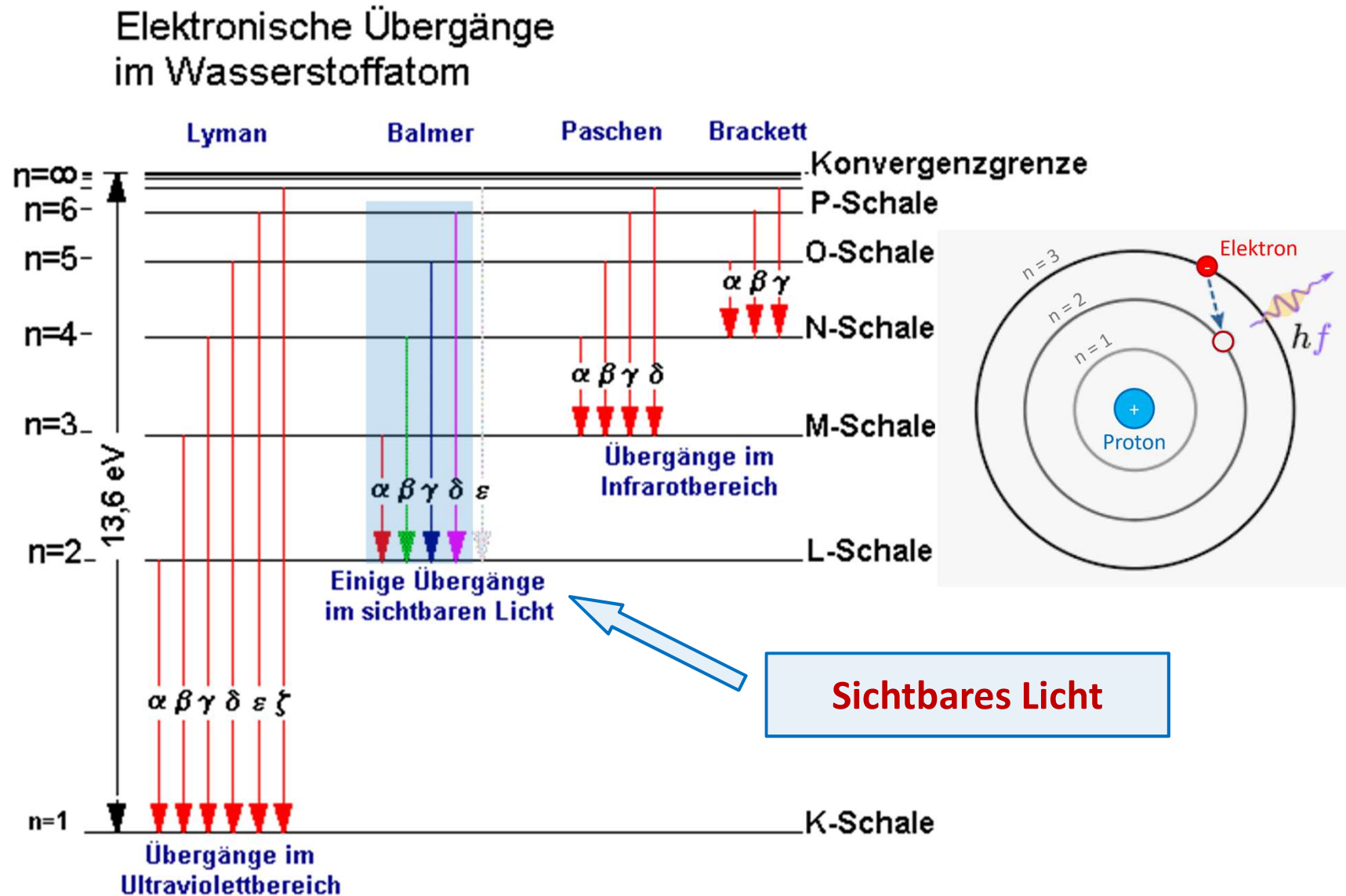
## Emission eines Licht-Photons

Elektron fällt in den Energiezustand  $E_1$  zurück und gibt dabei ein „passendes“ Photon ab

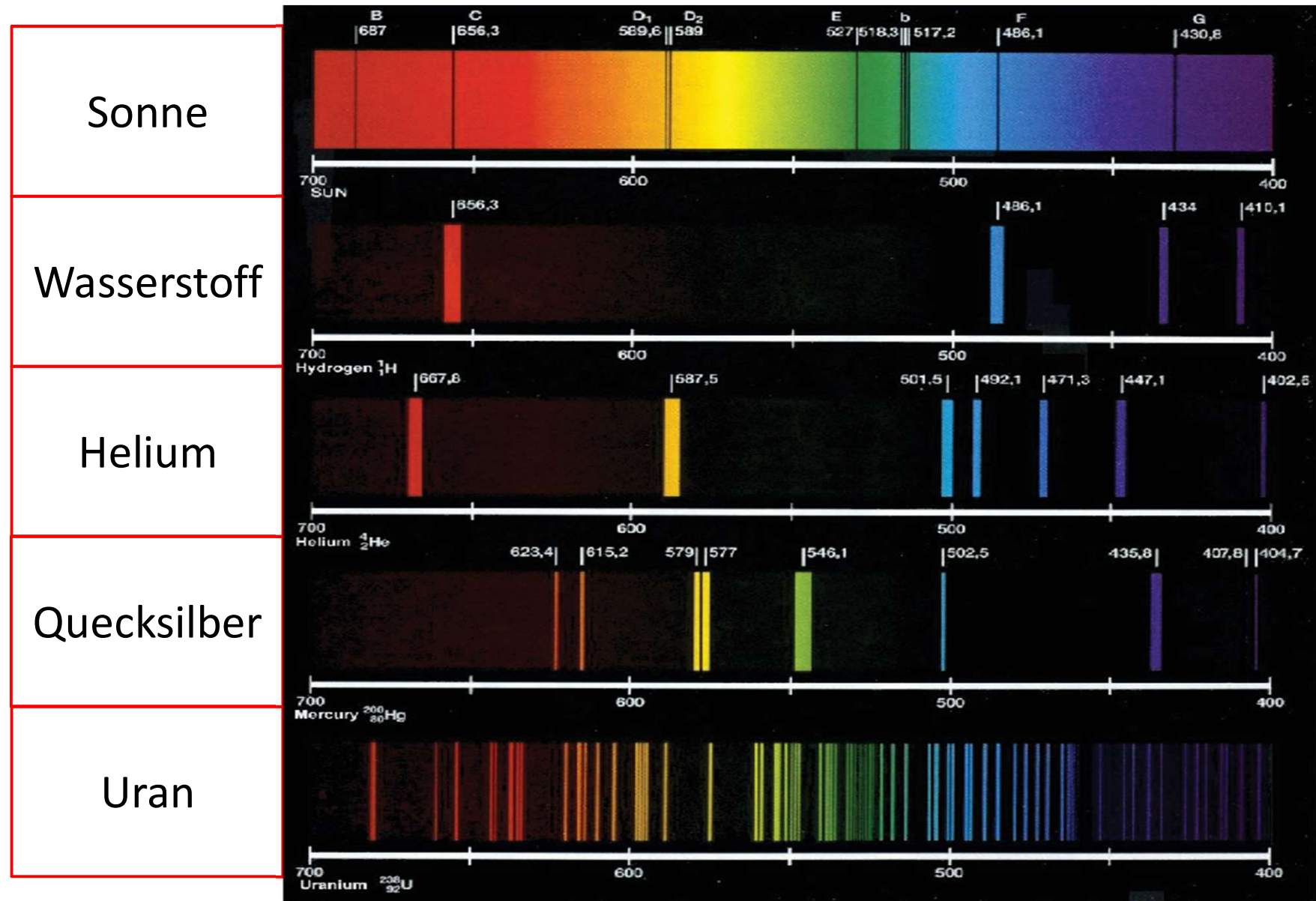


Quantensprung

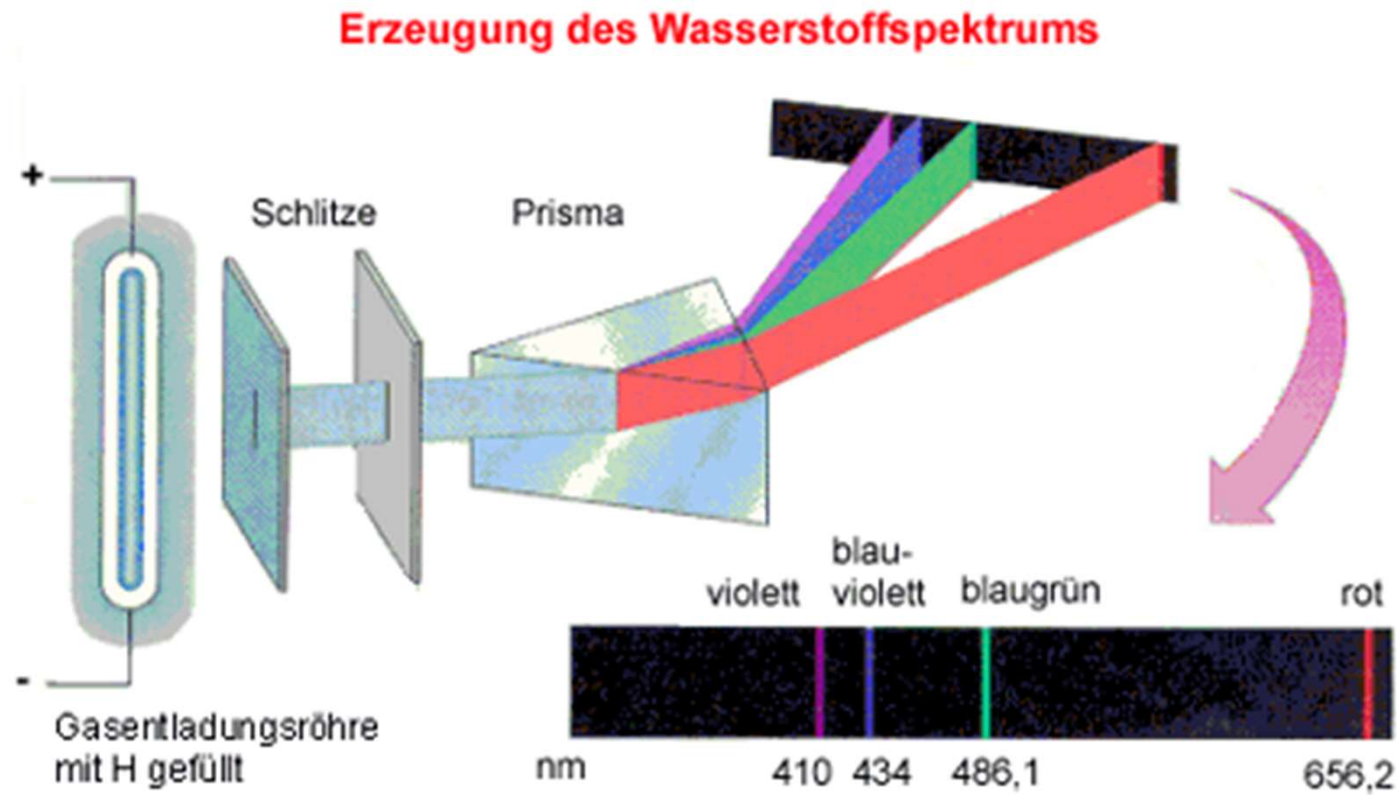
# Spektren des Wasserstoffatoms



# Linienpektren / Emissionsspektren der Atome



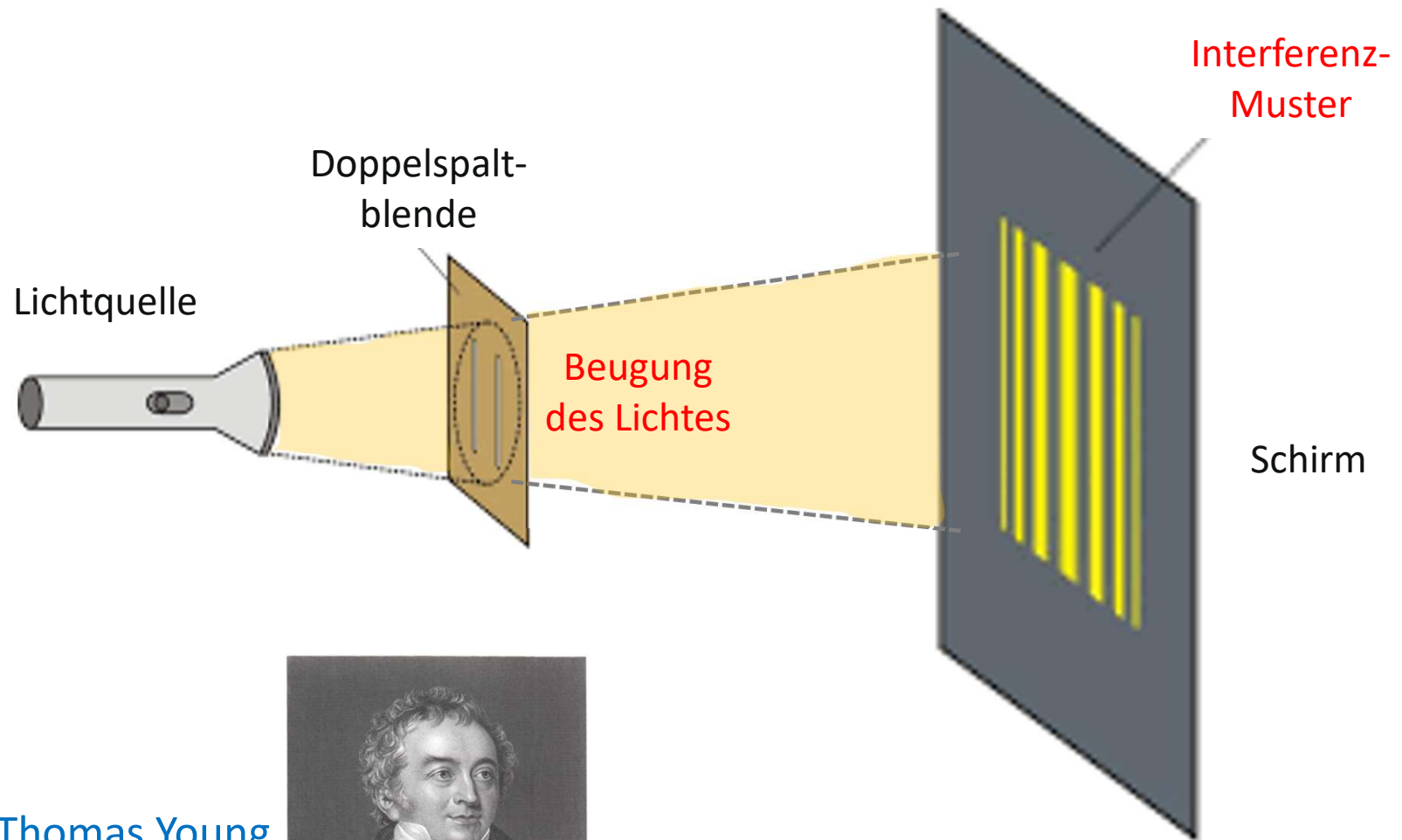
# Wie kann man ein Atomspektrum erzeugen?



4 sichtbare Linien des Wasserstoffspektrums

# Wellennatur der Materie, Doppelspalt- versuche

# Doppelspaltexperiment – mit Licht



Thomas Young  
(1802)

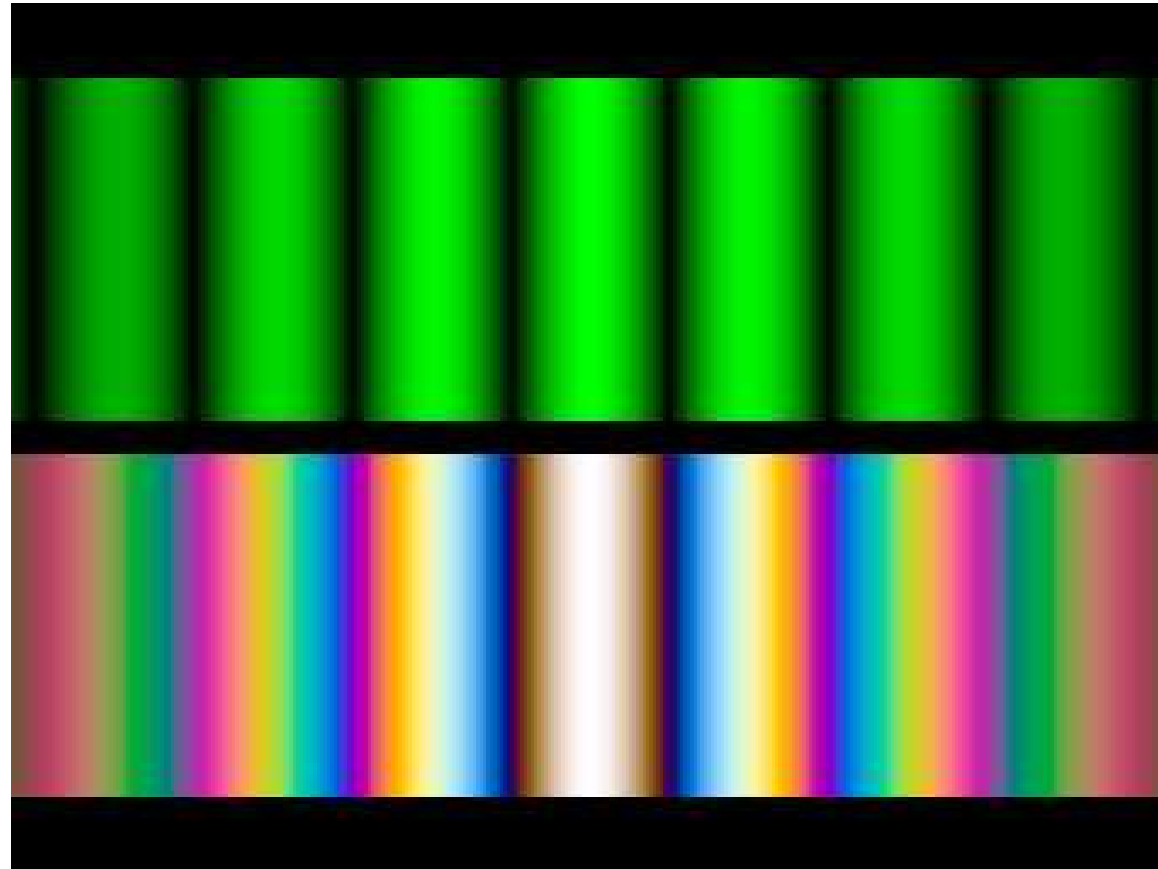


Experiment zur allgemeinen Anerkennung  
der **Wellentheorie** des **Lichts**

# Doppelspaltexperiment – mit Licht

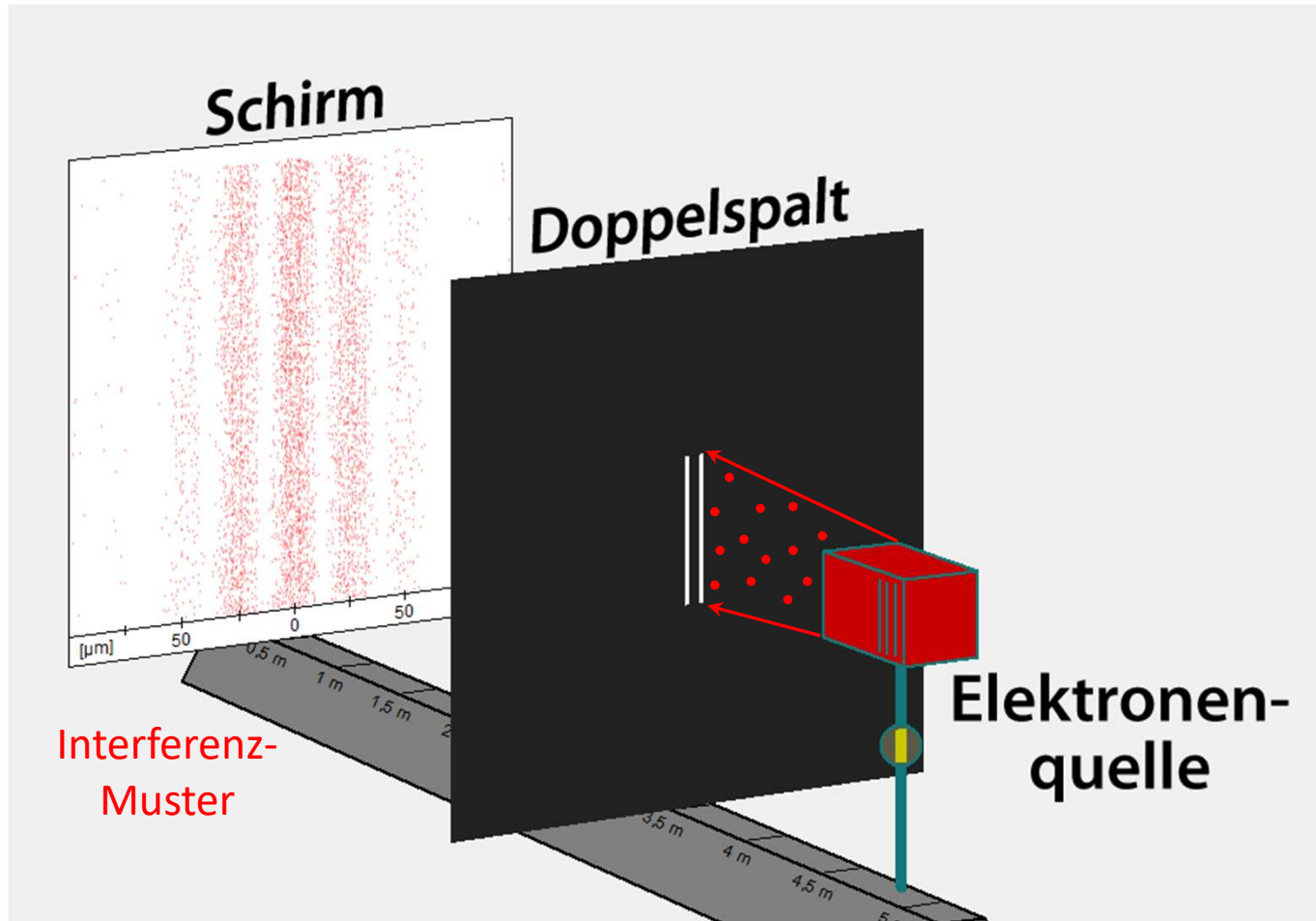
---

Einfarbiges  
Licht



Weißes  
Licht

# Doppelspaltexperiment – mit Elektronen



Erster experimenteller Nachweis der  
**Welleneigenschaften** von **Elektronen**



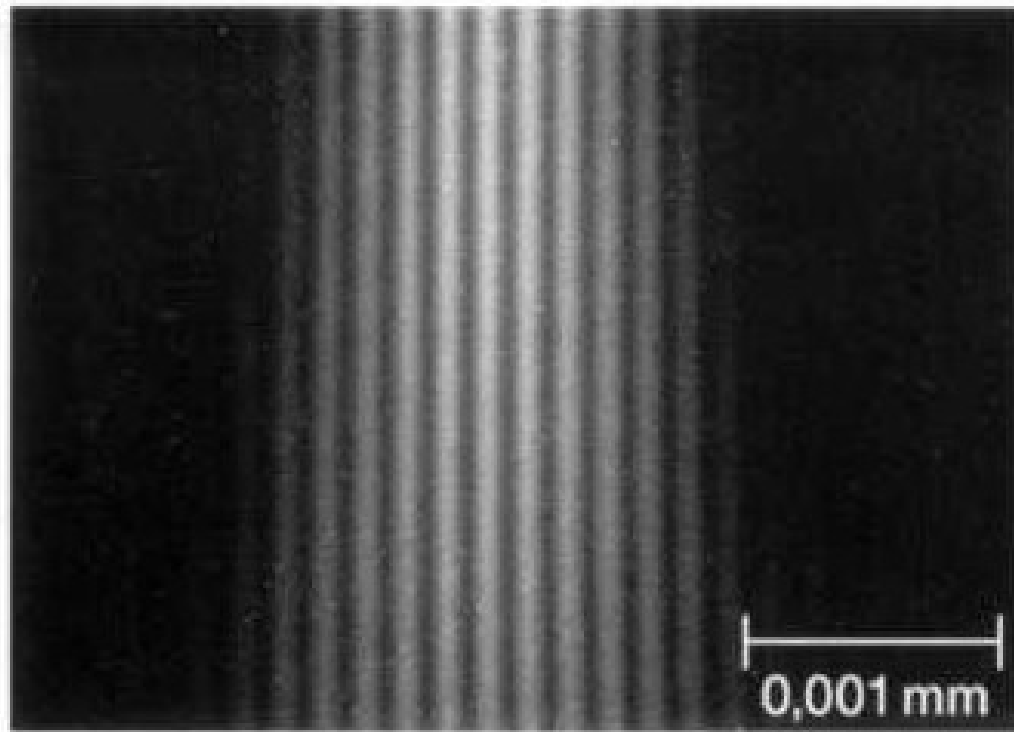
Louis de Broglie  
(1927)



Claus Jönsson  
(1960)

# Doppelspaltexperiment – mit Elektronen

Originalbild



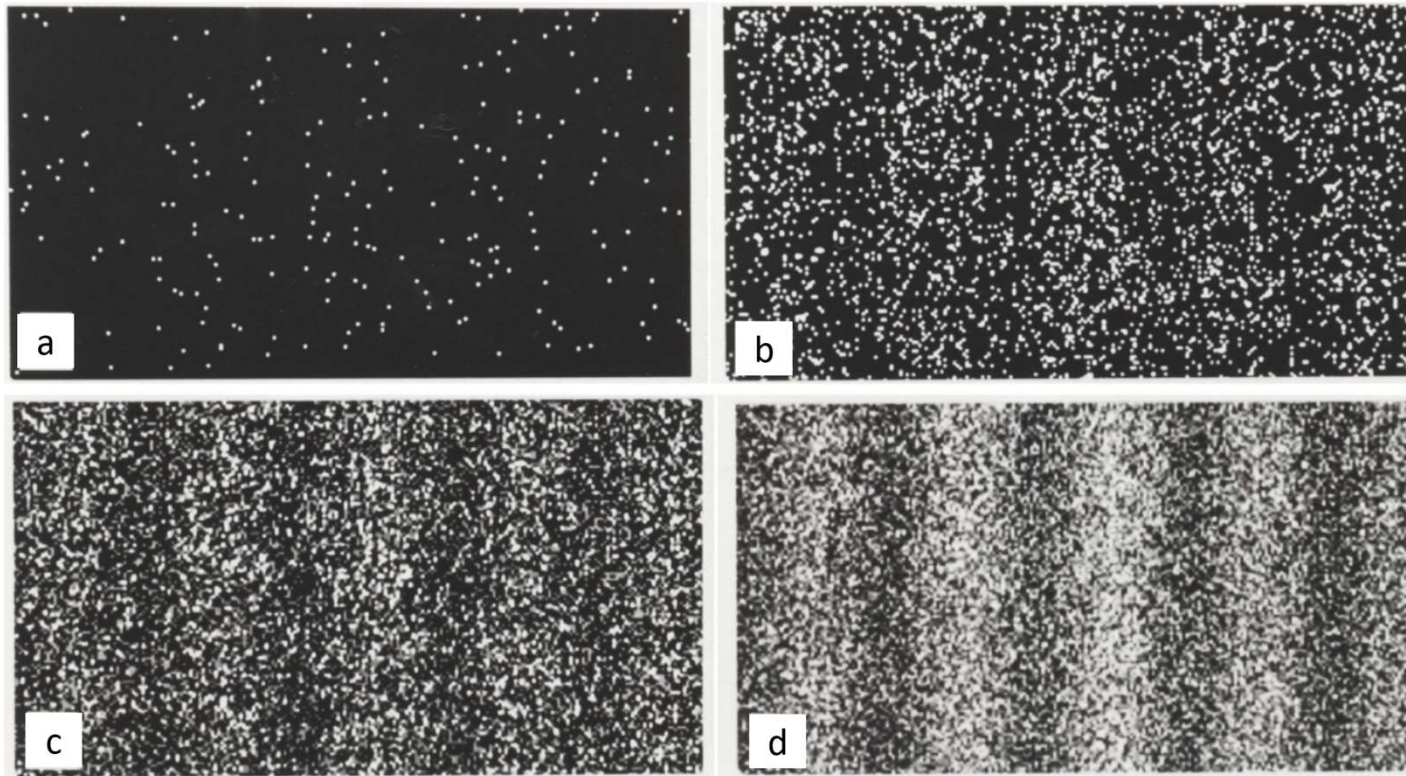
Claus Jönsson  
(1960)



# Doppelspaltexperiment – mit Elektronen

---

Beschuss mit einzelnen Elektronen - Langzeitaufnahmen



Fazit:

Jedes einzelne Elektron (= Quant) interferiert quasi mit sich selbst,  
als wenn es gleichzeitig durch beide Spalte fliegt

# Skifahrer als Quantenobjekt

---

So paradox verhalten sich Quanten...



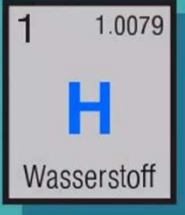
# Energieniveaus in Quantensystemen

# Quantenzahlen in der Atom-/Quantenphysik

Quantenzahlen

- Hauptquantenzahl  $n$
- Nebenquantenzahl  $l$
- Magnetische Quantenzahl  $m_l$
- Spinquantenzahl  $s$

zur Beschreibung des Quantenzustands  
(= **diskreter Energiezustand**) eines Atoms



|                    |     |   |                                                        |
|--------------------|-----|---|--------------------------------------------------------|
| Quanten-<br>zahlen | $n$ | = | Energieniveau                                          |
|                    | $l$ | = | Aufenthaltsraum des Elektrons ( <b>Orbitalform</b> )   |
|                    | $m$ | = | Ausrichtung des <b>Drehimpulses</b> der Elektronenbahn |
|                    | $s$ | = | Ausrichtung des <b>Eigendrehimpuls</b> des Elektrons   |

# Die Schrödinger Gleichung

---

- Fundamentale **Energiegleichung** in der Quantenphysik

$$E\psi = \hat{H}\psi$$
$$\frac{h^2}{8\pi^2m} \psi''(x) + (E - E_{pot})\psi(x) = 0$$

- Die **Wellenfunktion (Psi)**  $\psi$  beschreibt den physikalischen Zustand eines Quantensystems
- $h$  ist das „Planck’sche Wirkungsquantum“

Erwin Schrödinger (1960)

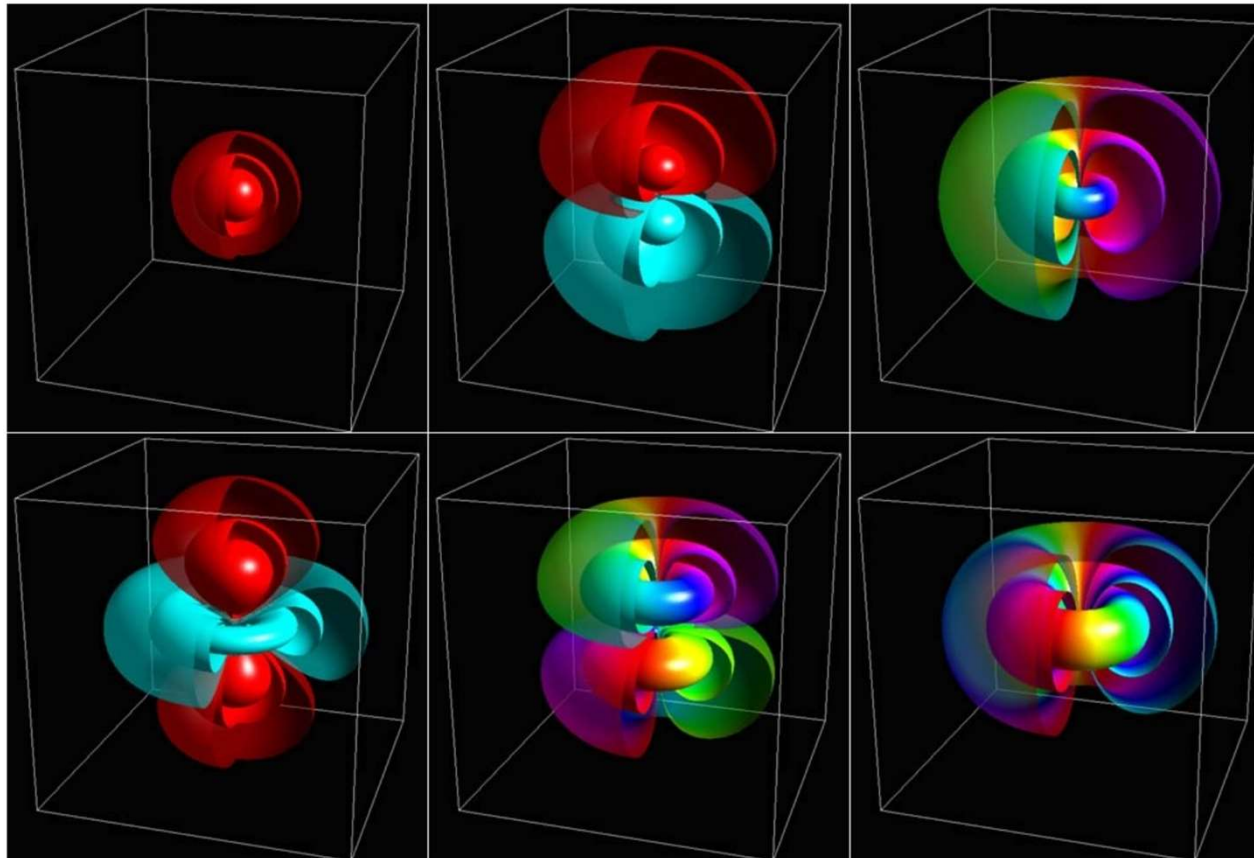


# Wasserstoffatom - Quantenmechanisch

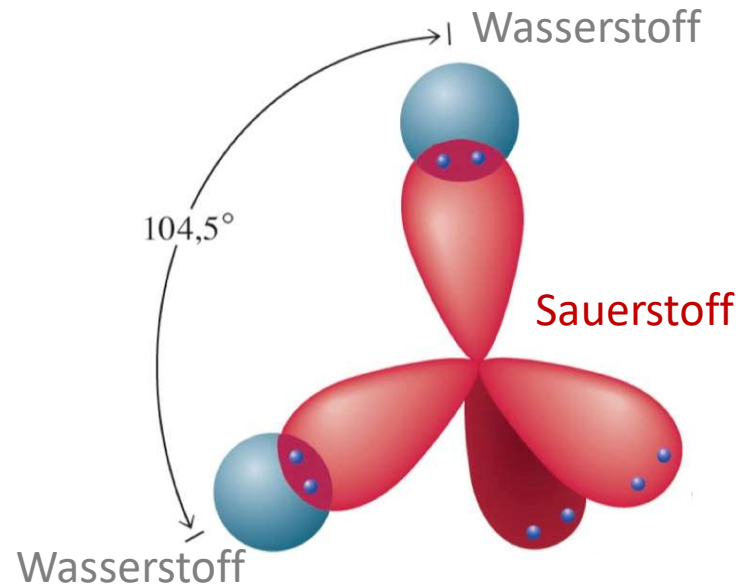
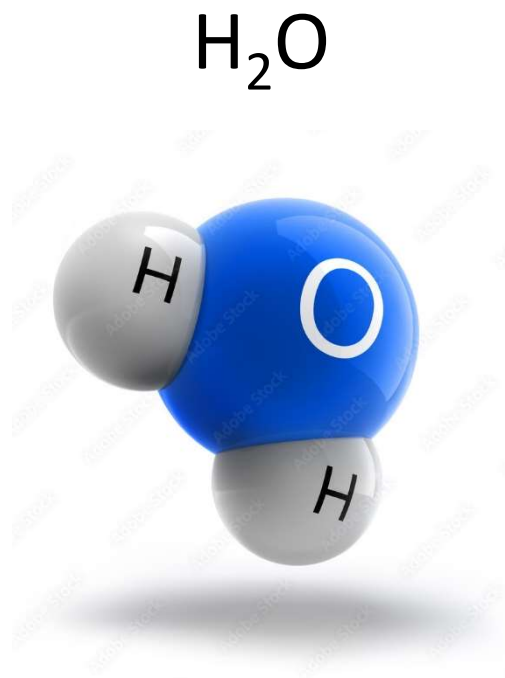
---

Darstellung der Orbitale zu verschiedener Quantenzahlen  
(= verschiedene diskrete energetische Anregungszustände des Elektrons)

*Lösungen der fundamentalen Energiegleichung (Schrödinger Gleichung)  
(Aufenthaltswahrscheinlichkeiten des Elektrons)*



# Wassermolekül



**Abbildung 2.1: Struktur des Wassermoleküls.**

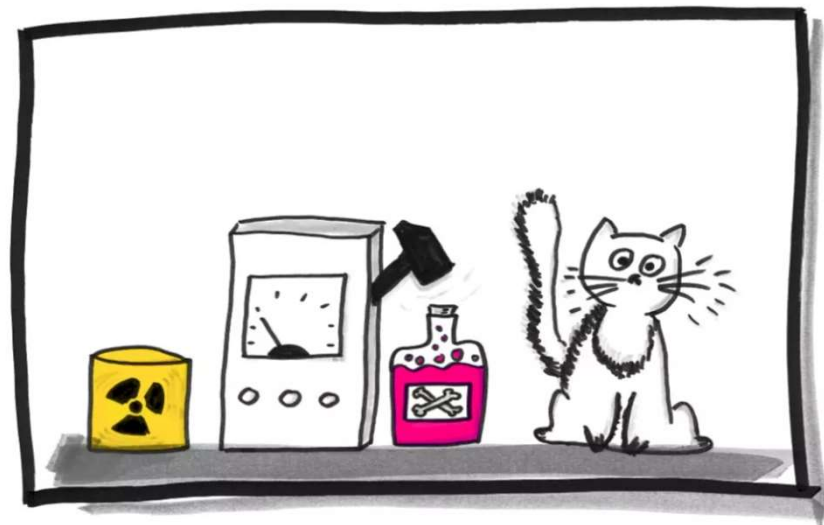
(a) Kalottenmodell (Kugelmodell) eines Wassermoleküls. (b) Winkel zwischen den kovalenten Bindungen eines Wassermoleküls. Zwei der  $sp^3$ -Hybridorbitale des Sauerstoffatoms sind an kovalenten Bindungen zu Wasserstoffatomen beteiligt, die durch die Überlappung mit dem  $1s$ -Orbital des jeweiligen Wasserstoffatoms gebildet werden. Die anderen beiden  $sp^3$ -Hybridorbitale werden durch freie Elektronenpaare besetzt.

# Schrödingers Katze

# Schrödingers Katze

Kann man Quanteneffekte einfach auf die makroskopische Welt übertragen?

Gedankenexperiment von Erwin Schrödinger (1935):



Frage: Ist die Katze tot oder lebendig?

- Nicht eindeutiger Überlagerungszustand aus „lebendig“ und „tot“
- Erst die Messung (Kiste aufmachen, nachschauen) bringt einen eindeutigen Zustand
- quantenmechanische Gesetze funktionieren anders als unsere Alltagserfahrung, Ereignisse sind nicht vorhersagbar

# Verhaltensregeln der Quanten zusammengefasst

# Klassisches Teilchen $\leftrightarrow$ Quantenobjekt

---

## Klassisches Teilchen:

- Die Masse ist eindeutig
- Ort und Bewegung sind klar
- Energie beliebig
- Erscheinung klar bestimmbar
- Eindeutig messbar

## Beispiel:

- Fussball
- Stein
- ...

## Quantenobjekt:

- Gleichzeitig Welleneigenschaften und Teilcheneigenschaften
- Ort und Bewegung unklar
- Energieniveaus / Quantensprünge
- Messbarkeit schwierig, „unscharf“, nicht eindeutig
- Berechnungen/Vorhersagen im Einzelnen zum Teil unmöglich

## Beispiel:

- Lichtquant
- Elementarteilchen wie Elektronen, Protonen, Neutronen usw.

# Klassisches Teilchen $\leftrightarrow$ Quantenobjekt

---

## 3 besondere Phänomene in der Quantenwelt:

### Superpositionsprinzip:

- Das Gegenteil von Eindeutigkeit:  
zwei oder mehrere Zustände können gleichwahrscheinlich auftreten
- Der momentane Zustand ist daher nicht eindeutig bestimmbar

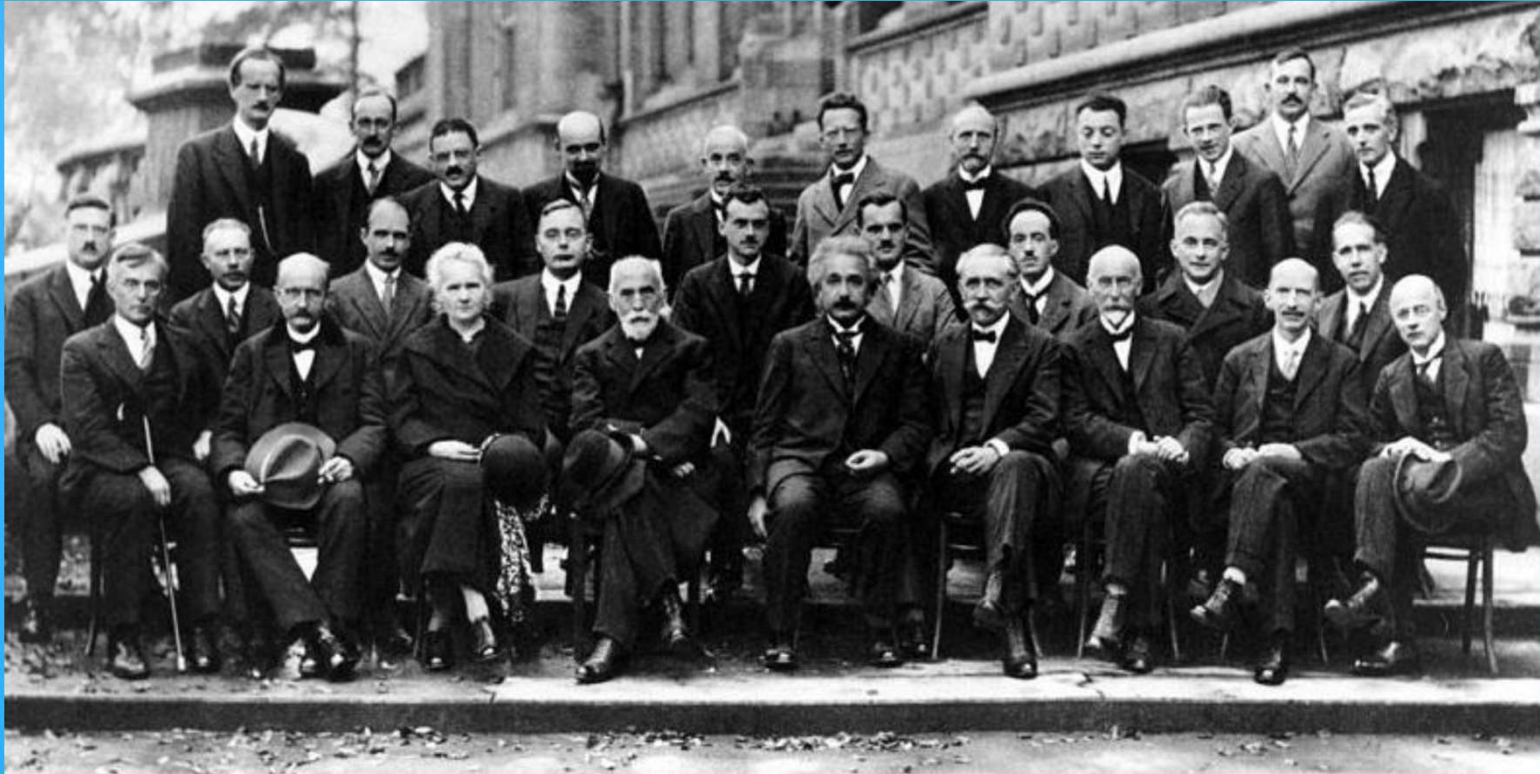
### Beobachtereffekt:

- Erst bei Beobachtung nimmt das Quantenobjekt einen eindeutigen Zustand an
- Der Zustand ist vorher unbestimmt

### Verschränkung von zwei Quantenobjekten:

- Veränderung des Zustands eines Objekts wirkt unmittelbar auf ein weiteres Objekt ein, wenn dieses mit dem ersten Objekt „verschränkt“ ist
- Albert Einstein: „Spukhafte Fernwirkung“

# Physiker unter sich



Solvay-Konferenz 1927 in Leiden (Thema: Neu entwickelte Quanten-Theorie)

Unsere Physiker-"Garde". Von hinten nach vorne und von links nach rechts:

**Hintere Reihe:** Auguste Piccard, Emile Henriot, Paul Ehrenfest, Edouard Herzen, Theophile de Donder, **Erwin Schrödinger**, Jules-Emile Verschaffelt, **Wolfgang Pauli**, **Werner Heisenberg**, Ralph Howard Fowler, Leon Brillouin.

**Mittlere Reihe:** Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, **Paul Dirac**, Arthur Compton, **Louis de Broglie**, Max Born, Niels Bohr.

**Vordere Reihe:** Irvin Langmuir, **Max Planck**, **Marie Skłodowska Curie**, Hendrik Lorentz, **Albert Einstein**, Paul Langevin, Charles -Eugene Guye, Charls Thonson Rees Wilson, Owen Willans Richardson.

# Quanten- phänomene im Alltag

# Quantenphysik in unserem Alltag

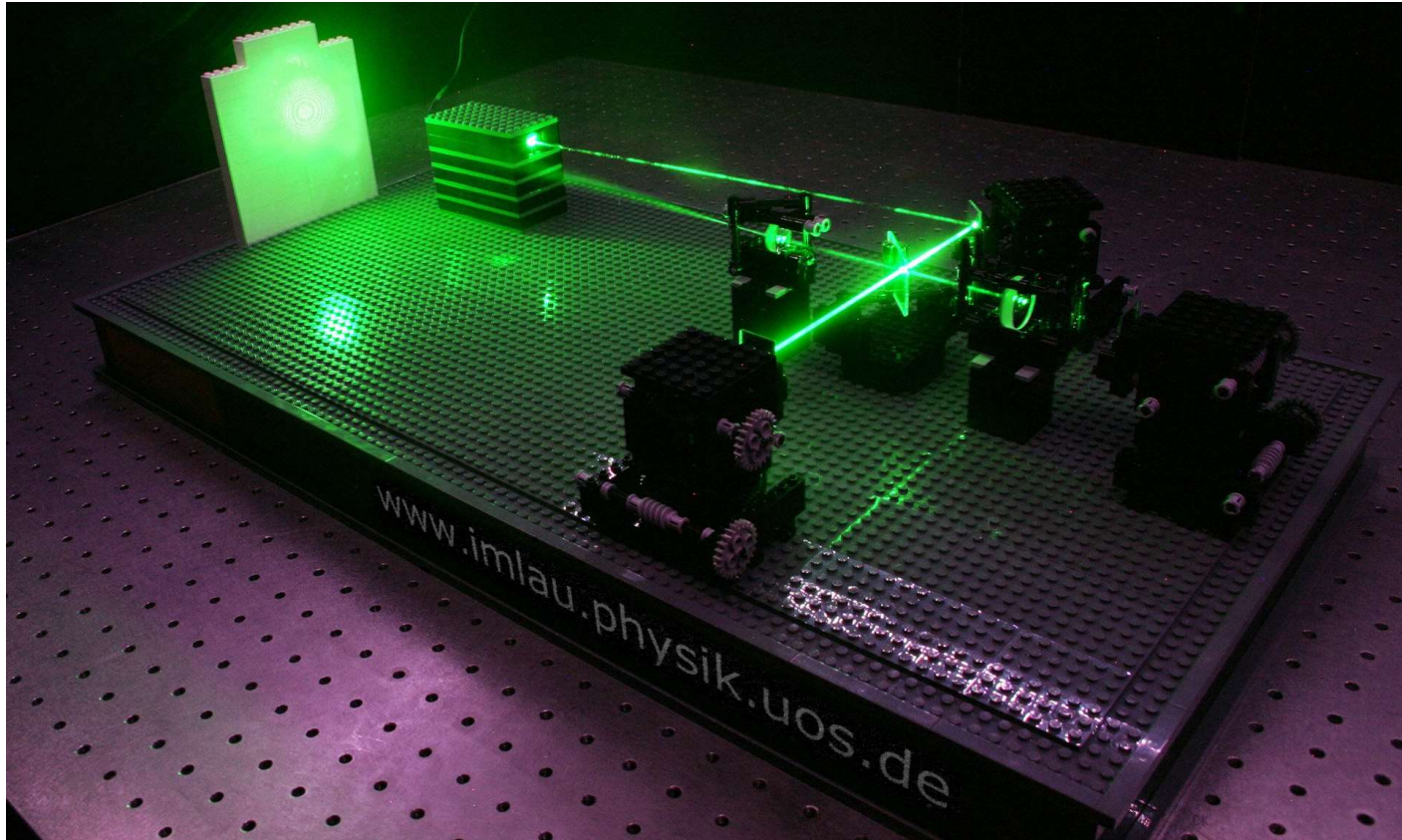
---



Halbleiterphysik:     Transistoren (1948, Bell Laboratories)  
                             Mikrochip (1950)  
                             Mikroprozessor (1970, Texas Instruments)

# Quantenphysik in unserem Alltag

---



Laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*,

*Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung*)

Rubin-Laser und Helium-Neon-Laser (1960, Theodore Maiman)

Holografie mit Lasern (1963)

# Quantenphysik in unserem Alltag

---



Halbleiterphysik:

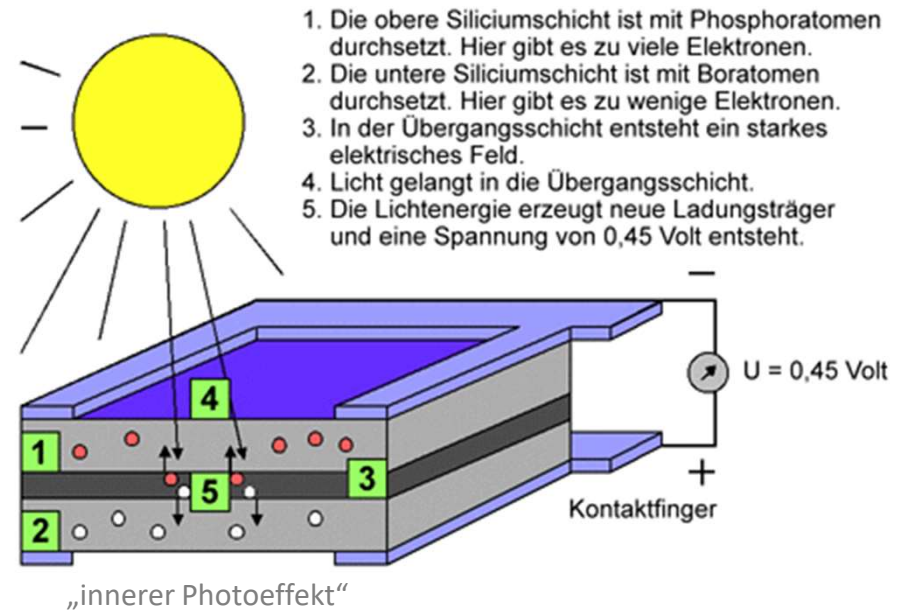
Leuchtdioden (1962)

*(LED als Umkehrung des Photoeffekts, entdeckt durch Alber Einstein 1905)*

# Quantenphysik in unserem Alltag



## Funktionsweise einer Solarzelle



Halbleiterphysik:

Solarzelle (1954, Bell Laboratories)

# Quantenphysik in unserem Alltag

---



Magnetresonanztomographie MRT (Kernspintomographie)

Erste einsatzfähige medizinische Geräte 1980

# Quantenphysik in unserem Alltag

---



CCD Photosensoren (1970, Bell Laboratories)

# Quantenphysik in unserem Alltag



# Fazit

---

Die Quantenphysik ist die fundamentalste physikalische Theorie, die wir haben. Sie dringt tief in die Welt der Atome und ihre Bestandteile ein und stellte sich als Grundlage der Natur heraus. Die Gesetze der klassischen Physik lassen sich auf die Mikrowelt nicht einfach übertragen (und umgekehrt).

Doch sie hat zwei Seiten. Einerseits liefert sie äußerst präzise Vorhersagen zu den experimentellen Resultaten. Andererseits steckt sie voller Rätsel, sie ist regelrecht mysteriös. Es ist genau dieser Konflikt, der die Quantenphysik so faszinierend macht.

Das größte Rätsel überhaupt ist die Verschränkung. Zwei verschränkte Objekte können sich augenblicklich beeinflussen, auch wenn sie viele Lichtjahre voneinander entfernt sind. Eine Erklärung konnte bislang noch nicht gefunden werden.

Was zweifellos bedeutet, dass unser naturwissenschaftliches Weltbild immer noch unvollständig ist.

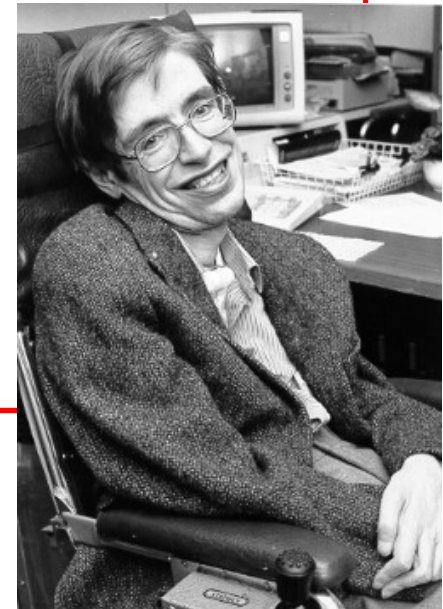
# Offene Fragen

---

- Ist die Schwerkraft (**Gravitation**, Anziehung zwischen Massen) auch „**gequantelt**“?
- Zusammenfassung der Relativitätstheorie und Quantenphysik zu einer „**Quantengravitation**“ ist bisher noch nicht möglich!

*Stephen Hawking:*

- *Suche nach der „Weltformel“*
- *Stringtheorie*
- *M-Theorie*



# Albert Einstein

---



Man muss diese Welt nicht verstehen. Man muss  
sich nur darin zurechtfinden.

(Albert Einstein)

# Quantenphysik

*Was ist los im Mikrokosmos?*

*Eine phantastische Reise  
durch die Welt der kleinsten Dinge!*

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