



Quantum2025



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

Physik für Großeltern und andere Wissbegierige

Universität Bonn, Wintersemester 2024/25

Dieter Meschede



Themenblock 3: Quantenwelten

(100 Jahre sind erst der Anfang)

1. 16.01. Materiewellen und Diskretheit
2. 23.01. Überlagerungen in der Quantenwelt
3. 30.01. Verschränkung, Quantencomputing und mehr

Vorlesung am 16.01.2025

Materiewellen und Diskretheit

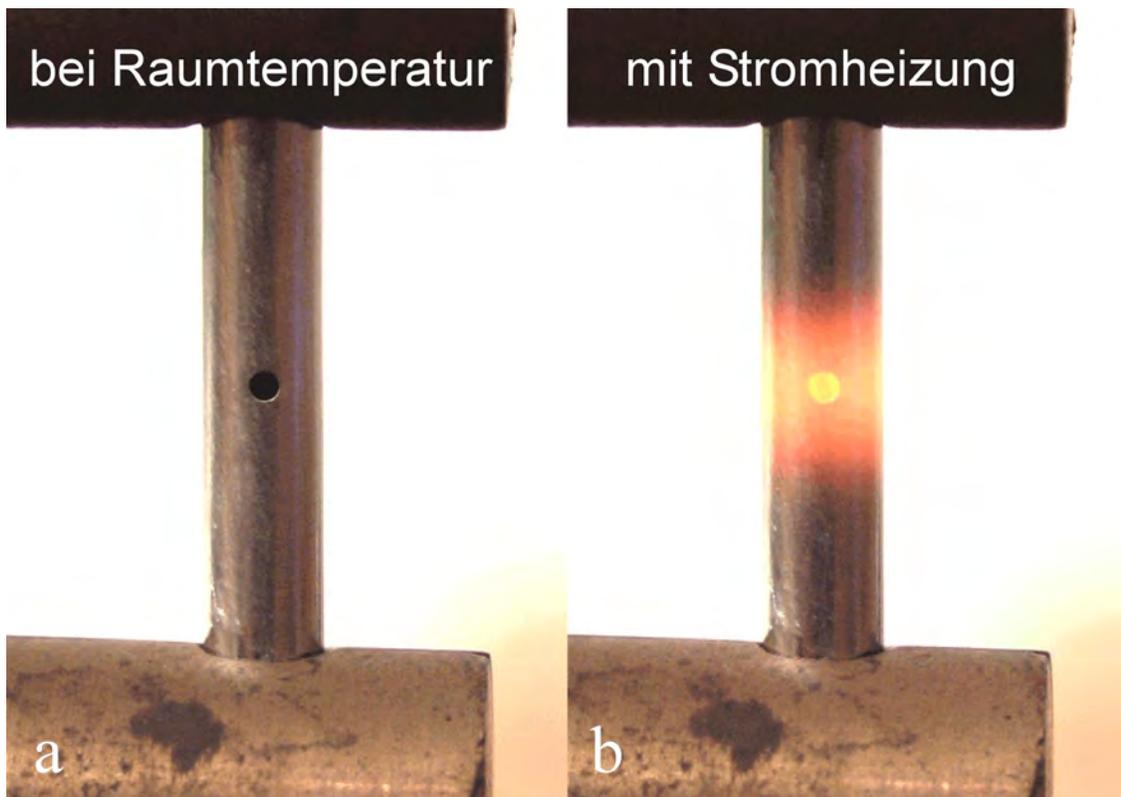


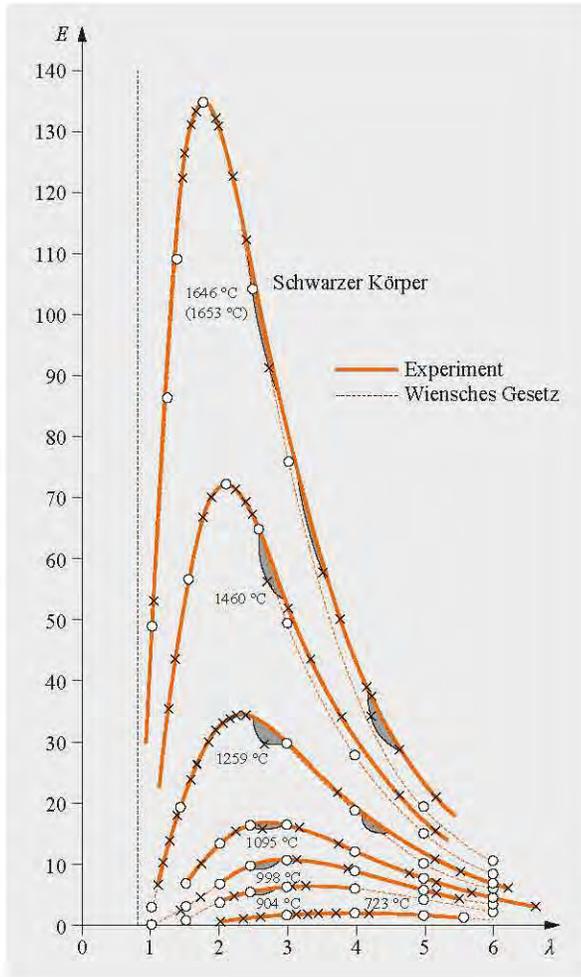
INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

- Woher kommt die Planck-Konstante h ?
- Lichtquanten
- Quantenlichtquellen
- Teilchenwellen
- Was passierte 1925?
- Wie hilft das Wellenbild, Atome zu verstehen?

Schwarze Körper sind perfekte Temperaturstrahler

... deren Geschwister finden wir aber auch in unserer Umgebung ...



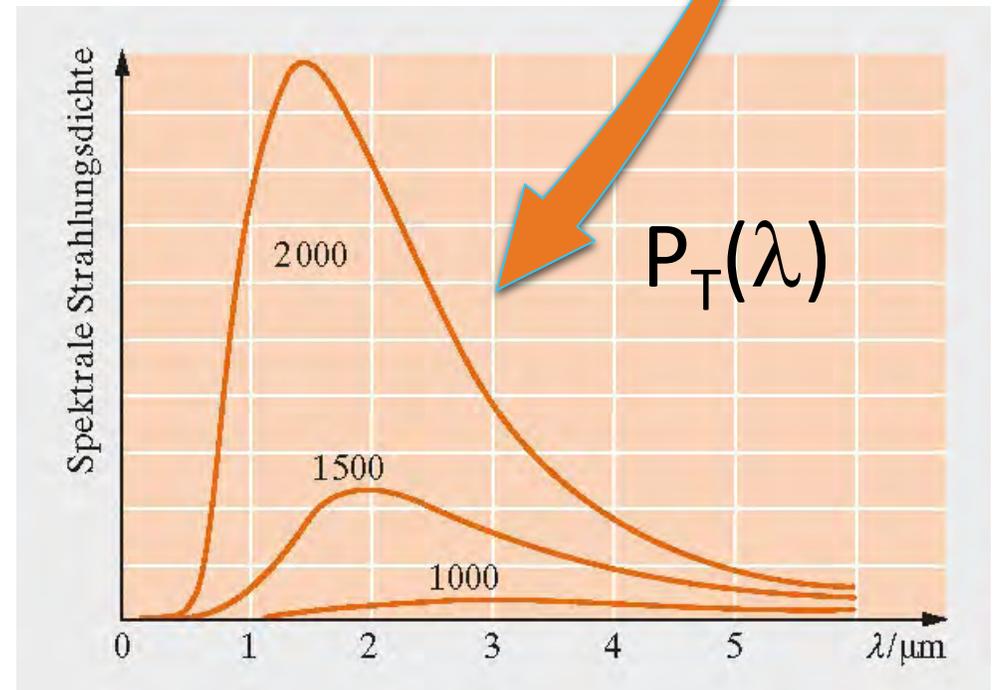


Die berühmten Messungen von Lummer u. Pringsheim 1899

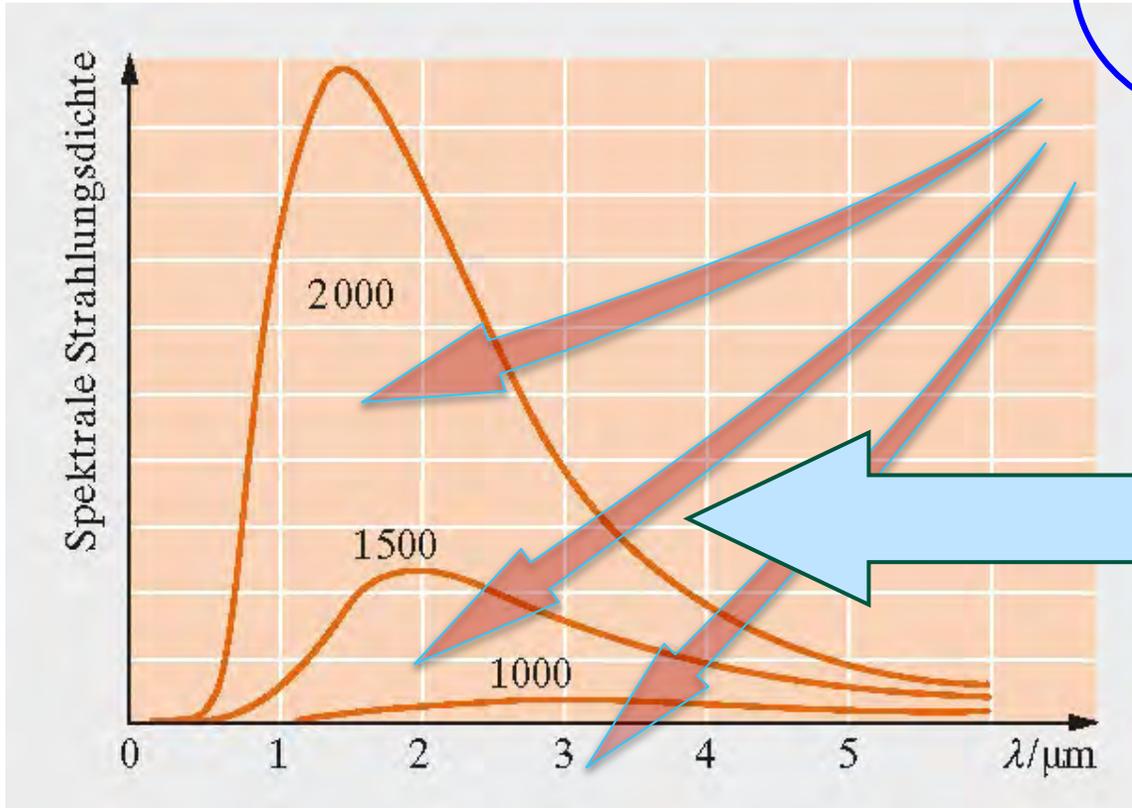
Messungen widersprachen lange der Theorie

Am 14. Dezember 1900 in der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin:

Max Planck „erfindet“ die „Planck-Kurve“ $P_T(\lambda)$



Plancks Formel:



$$P_T(\lambda)$$

Die Kurvenform ist immer dieselbe!!
Es gibt nur einen einzigen Parameter: die **Temperatur T**

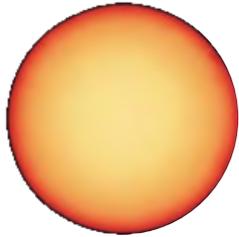
Für Experten:

$$P_T(x) = \frac{\sigma T^4}{\pi^4 / 15} \cdot \frac{x^3}{e^x - 1}$$

$$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

$$x = \frac{hc}{\lambda kT} = \frac{h\nu}{kT}$$

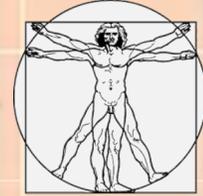
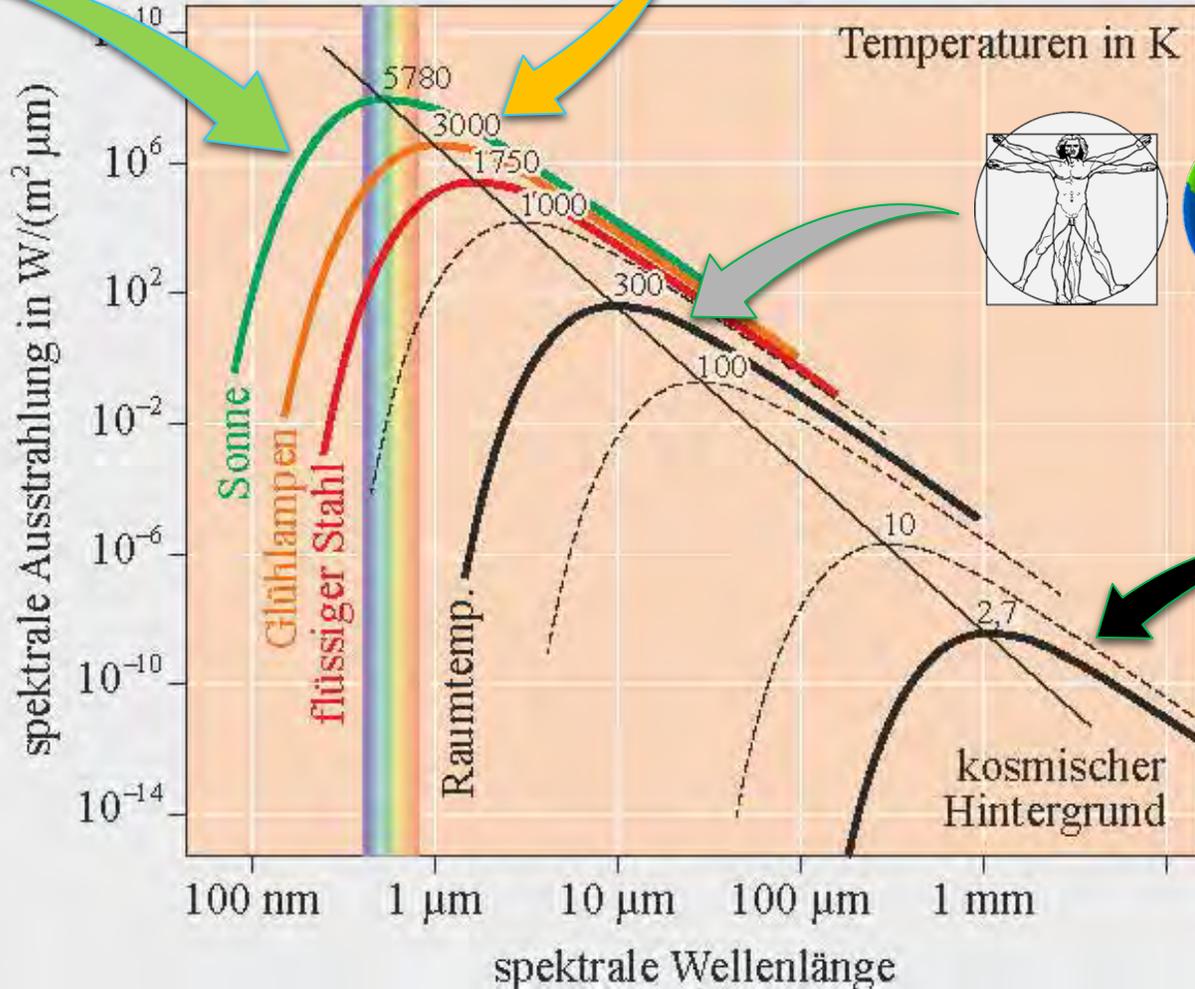
Diese Auftragung („doppeltlogarithmisch“) zeigt die Übereinstimmung der Kurvenformen!



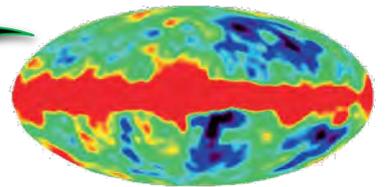
Sonne



Glühlampe



Mensch



Kosmos

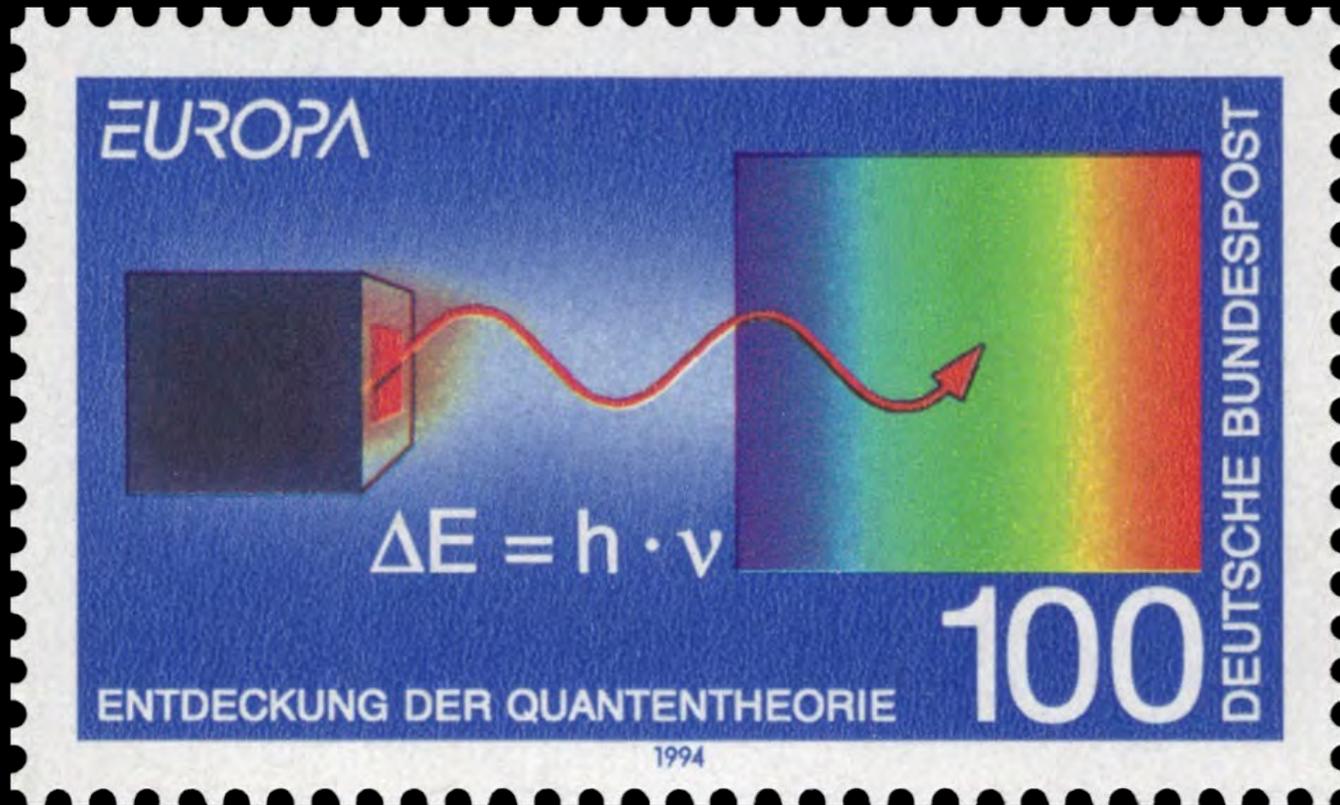


Quantum2025

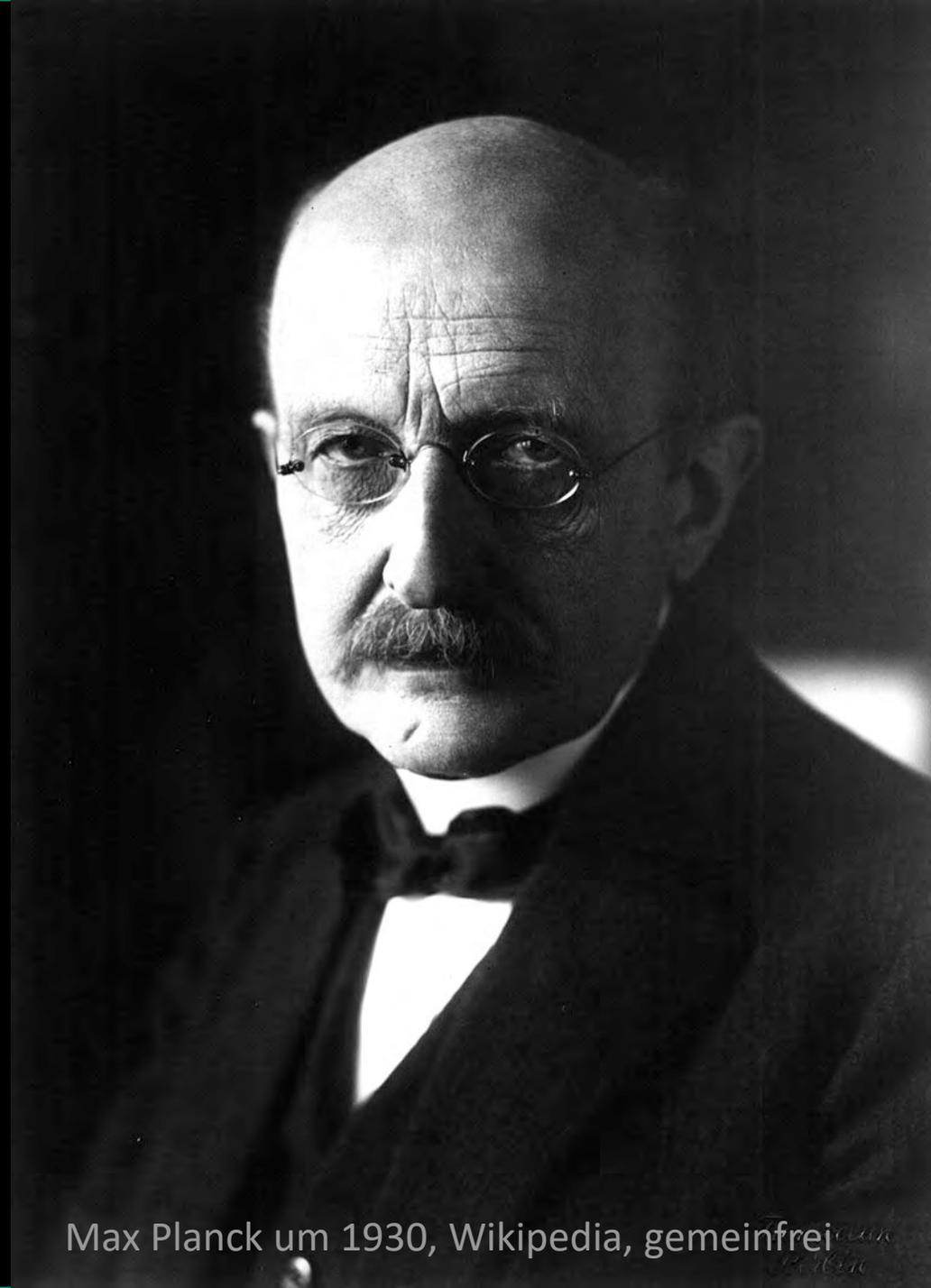


INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

h



$$h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ Js}$$



Max Planck um 1930, Wikipedia, gemeinfrei



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

Max Planck
1858-1947

Nobelpreis 1918

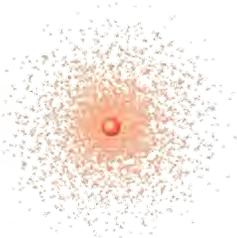


Max Planck - Selbstdarstellung im Filmportrait (1942)

→ the macroscopic world



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

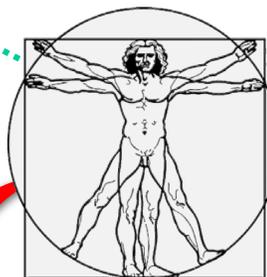


M. Planck, 1858-1947

$$E = h\nu$$

(1900)

very small



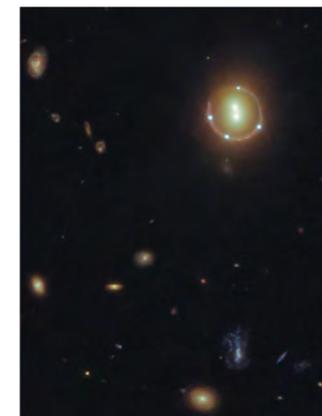
very large

$$E = mc^2$$

(1905)



A. Einstein, 1879-1955



← the microscopic world

Vorlesung am 16.01.2025

Materiewellen und Diskretheit



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

- Woher kommt die Planck-Konstante h ?
- Lichtquanten
- Quantenlichtquellen
- Teilchenwellen
- Was passierte 1925?
- Wie hilft das Wellenbild, Atome zu verstehen?

Wie war das noch mit **Welle** und **Teilchen**?

Licht hat (auch) Teilchencharakter ...



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

... wir können einzelne **Photonen zählen** ...

Der photoelektrische Effekt

(Hallwachs-Effekt)

*V. Ueber den Einfluss des Lichtes auf electrosta-
tisch geladene Körper;
von Wilhelm Hallwachs.*

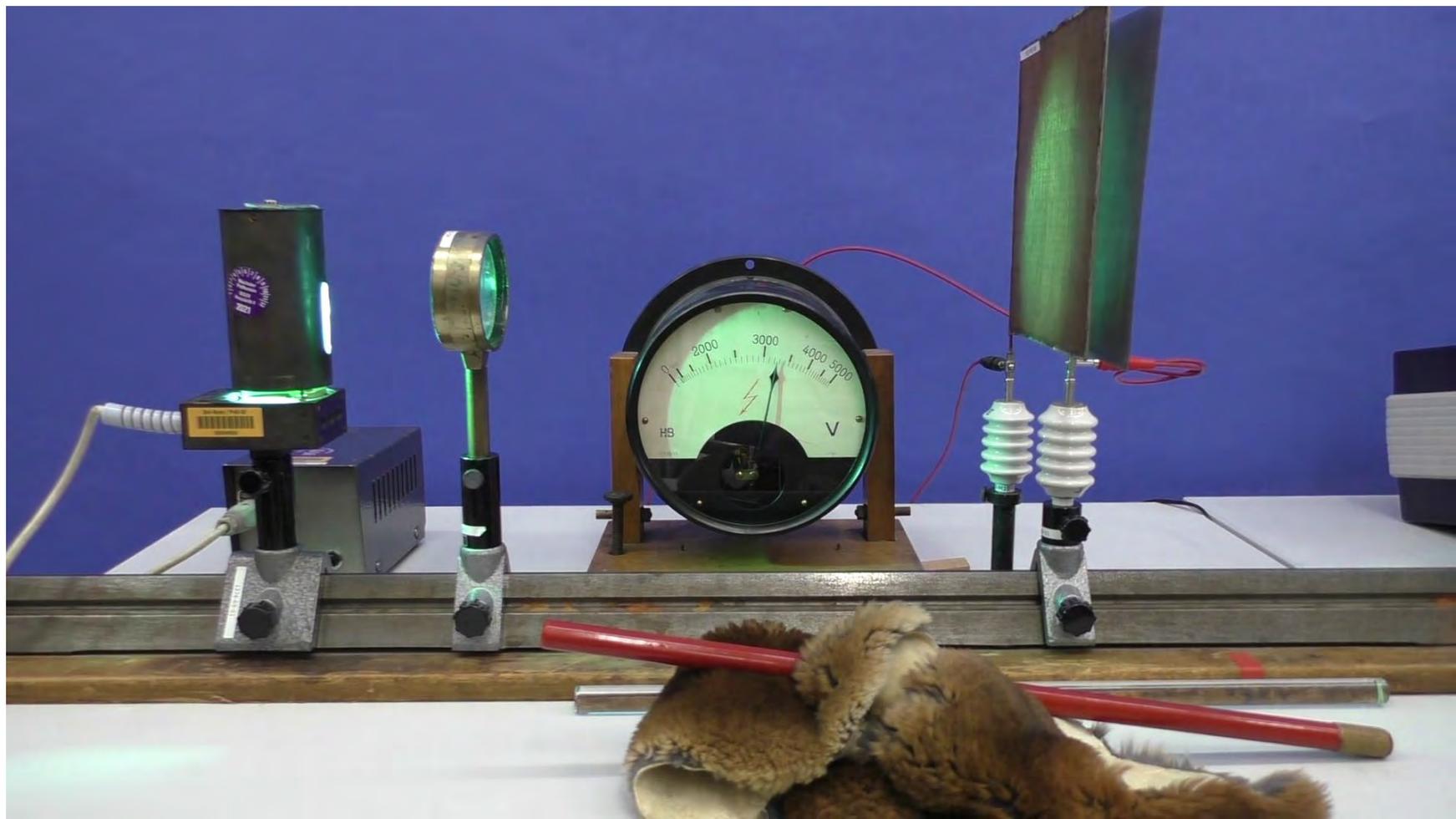
Annalen der Physik und Chemie. Band 269, Nr. 2, 1888, S. 301–312



Wilhelm Hallwachs
1859 - 1922

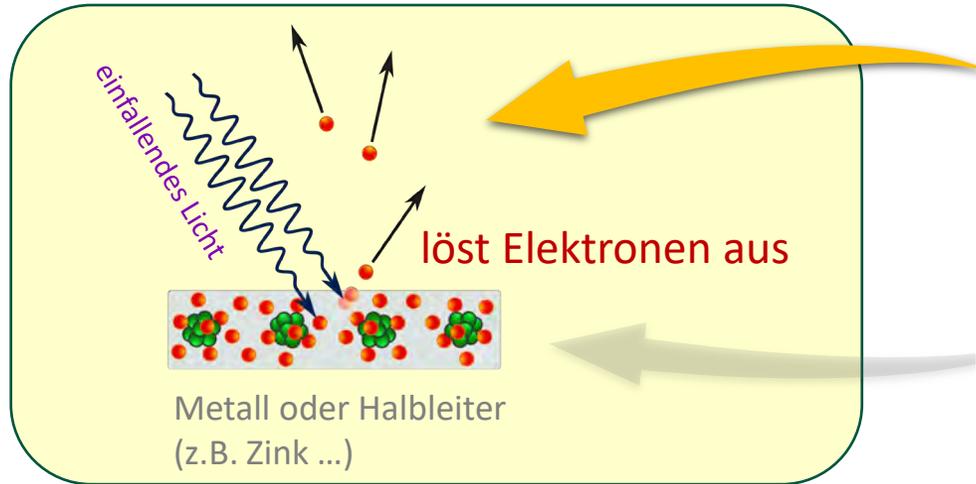


INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology



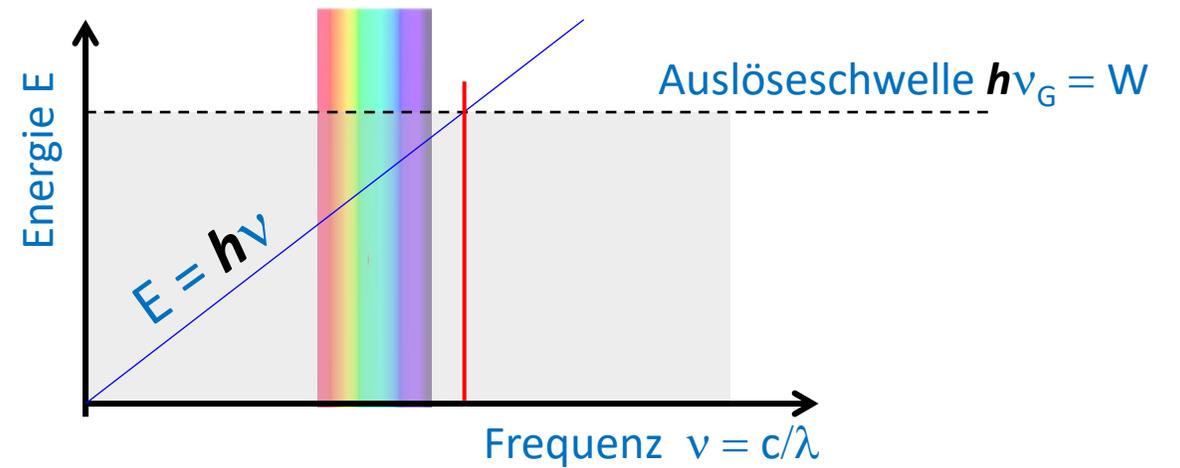


Der photoelektrische Effekt

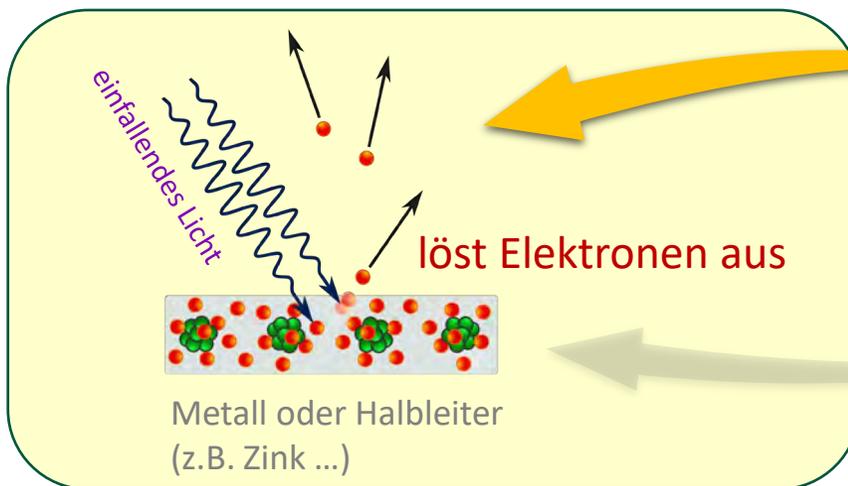


Einige wichtige Eigenschaften:

- **1 Photon \rightarrow 1 Elektron**
(Erst dieser Prozess definiert, was ein Photon ist)



Der photoelektrische Effekt

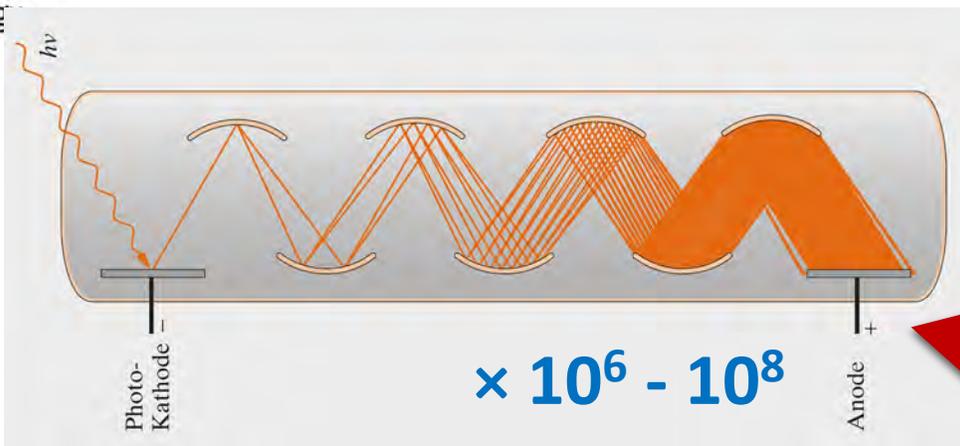


Einige wichtige Eigenschaften:

- **1 Photon \rightarrow 1 Elektron**
(Erst dieser Prozess definiert, was ein Photon ist)
- Die Energie des Photons $h\nu$ muss größer als eine Schwelle sein.
(die Bindung der Elektronen ans Metall)
- Wir bestimmen aus dem Schwellverhalten das Plancksche Wirkungsquantum h .



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology



„Sekundärelektronenvervielfacher“ (SEV)



2009



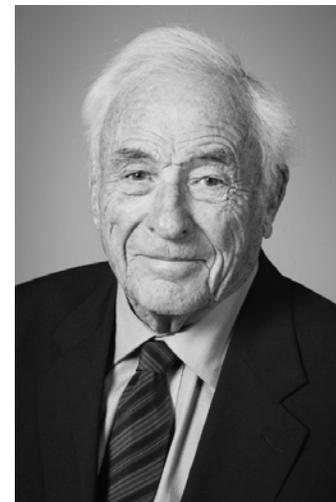
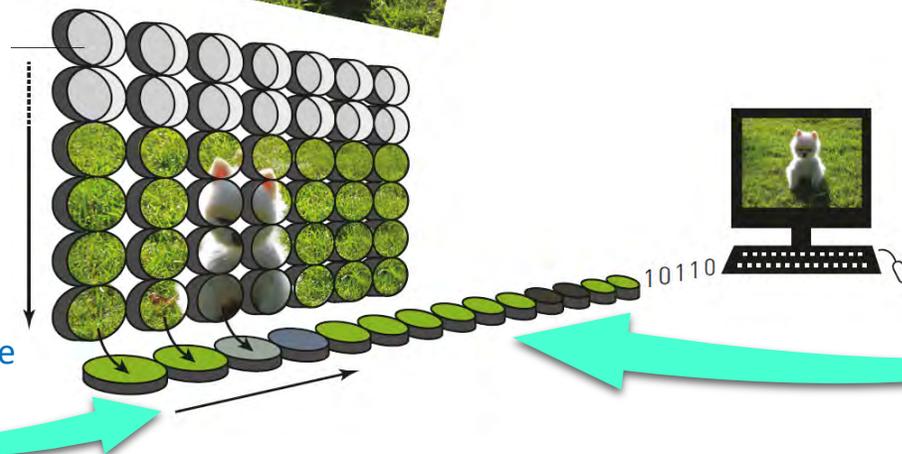
CCD = Charge Coupled Device

(„ladungsgespeichertes Bauelement“)

INTE
Qu
ar

Photonen legen Elektronen
In den Nanophotozellen ab.
Mehr Licht erzeugt mehr
Elektronen

Das CCD-Feld wird Zeile
für Zeile ausgelesen



Willard S. Boyle



George E. Smith

Der Kniff: das Licht legt die Elektronen in „Nanoeimern“ (Photozellen) ab. Das „**Eimerkettenverfahren**“ bringt diese Ladungen verlustfrei und rauscharm zum Digitalwandler und Bildspeicher. Sichtbares vs. Wärmebild: **Verschiedene Sensorempfindlichkeit**

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2009/press-release/>



Quantum 2025

Photonenzähler



UNIVERSITÄT BONN



Fachgruppe Physik/Astronomie
Department of Physics and Astronomy



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

Photonen hören

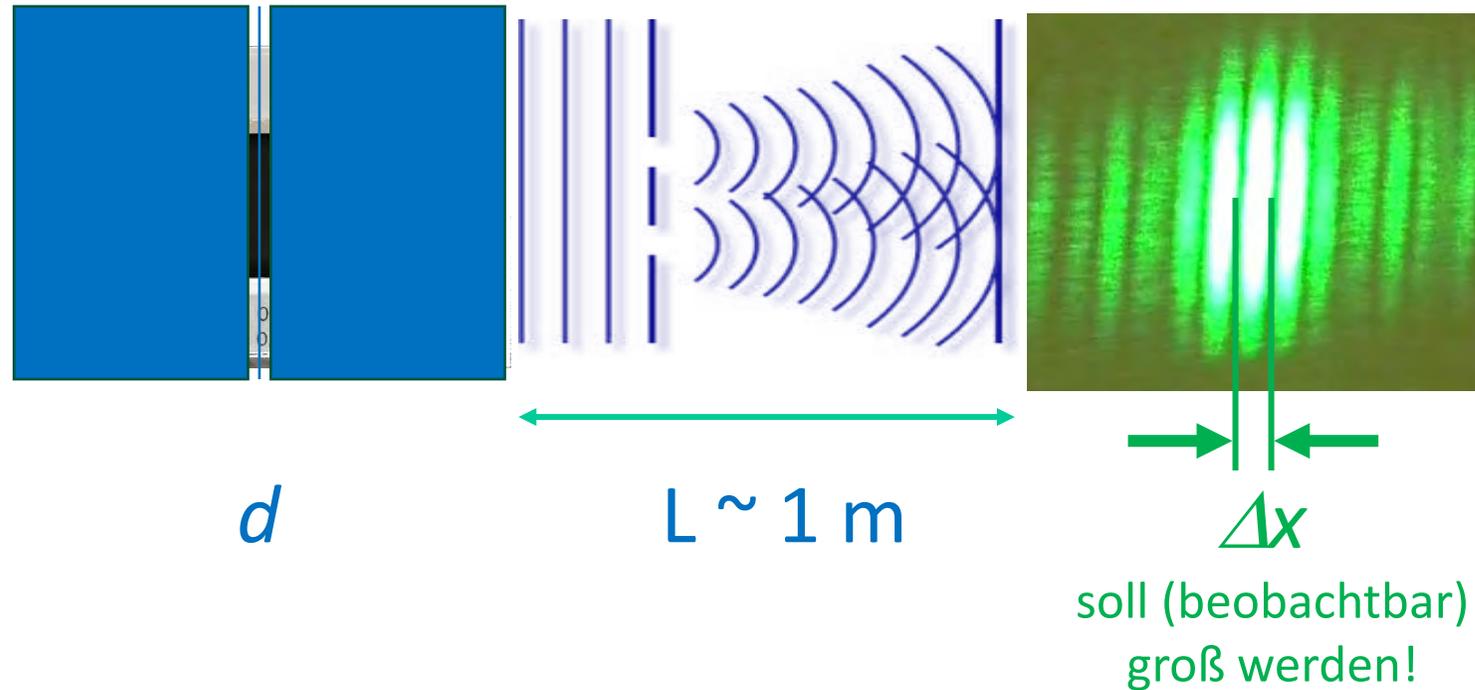
physik311 WS 2020/21

Kamera: M. Kortmann

Kommentar: Dieter Meschede

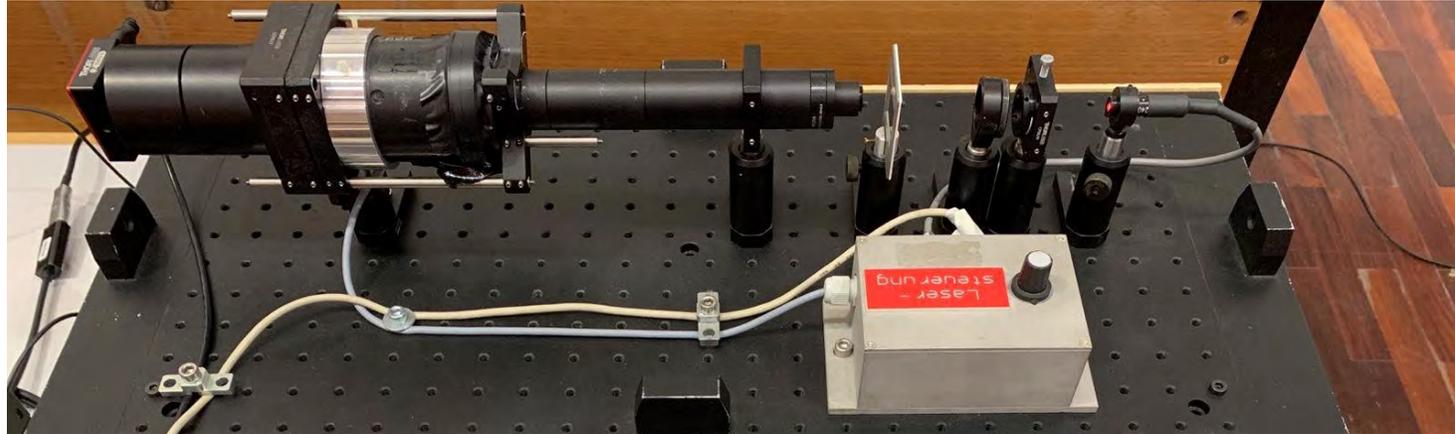
Wellenbewegung: bekannt vom Licht

Was macht die Beobachtung von (Doppelspalt-)Interferenzen schwierig?



$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot L}{d}$$

Photonenzählende Kamera



Die photonenzählende Kamera illustriert die
Vereinbarkeit von Wellen- und Teilchenbild:



- Wir können nicht vorhersagen, wo und wann ein Photon im Interferenzmuster registriert wird (**Zufälligkeit**).
- Die **Wellenfunktion Ψ** (genauer: deren Betragsquadrat $|\Psi|^2$) gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Photon an welchem Ort registriert wird.
- Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist vollständig deterministisch.

Vorlesung am 16.01.2025

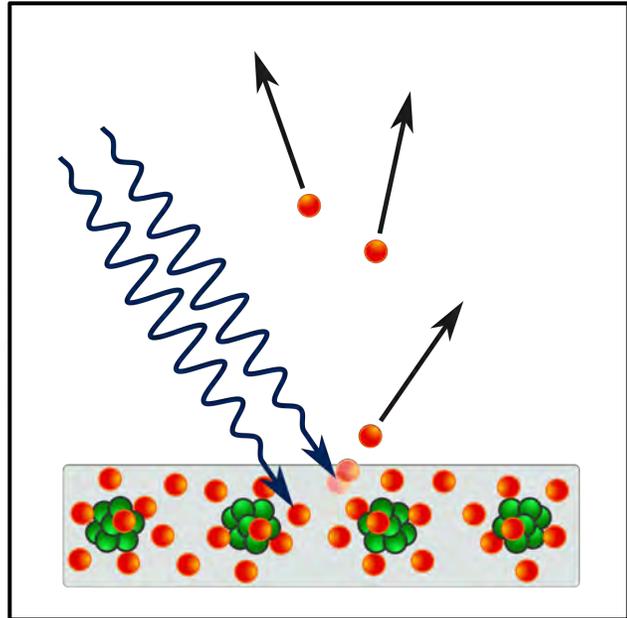
Materiewellen und Diskretheit



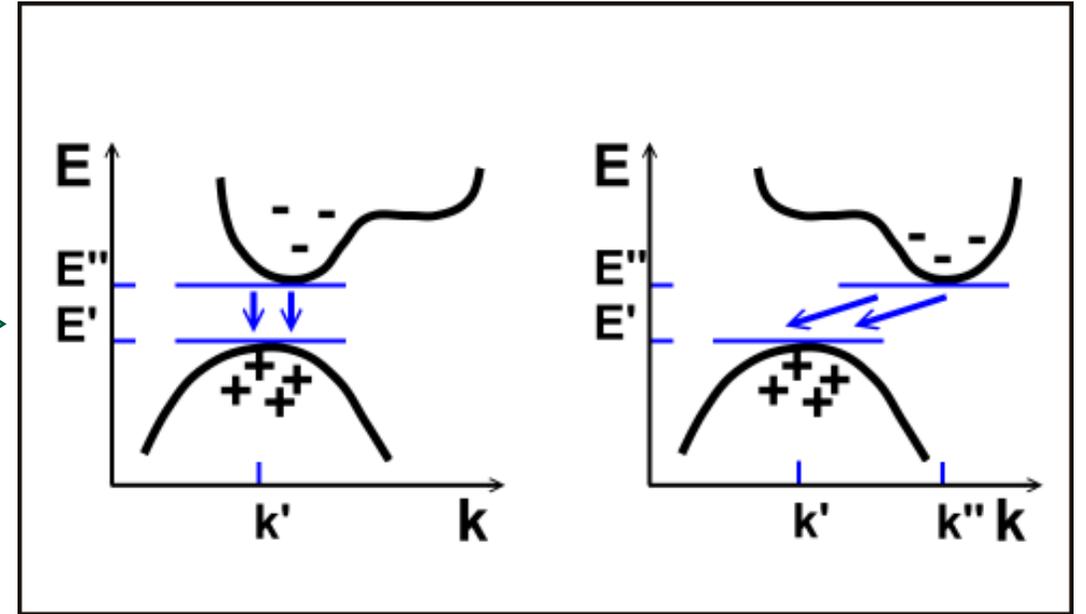
INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

- Woher kommt die Planck-Konstante h ?
- Lichtquanten
- **Quantenlichtquellen**
- Teilchenwellen
- Was passierte 1925?
- Wie hilft das Wellenbild, Atome zu verstehen?

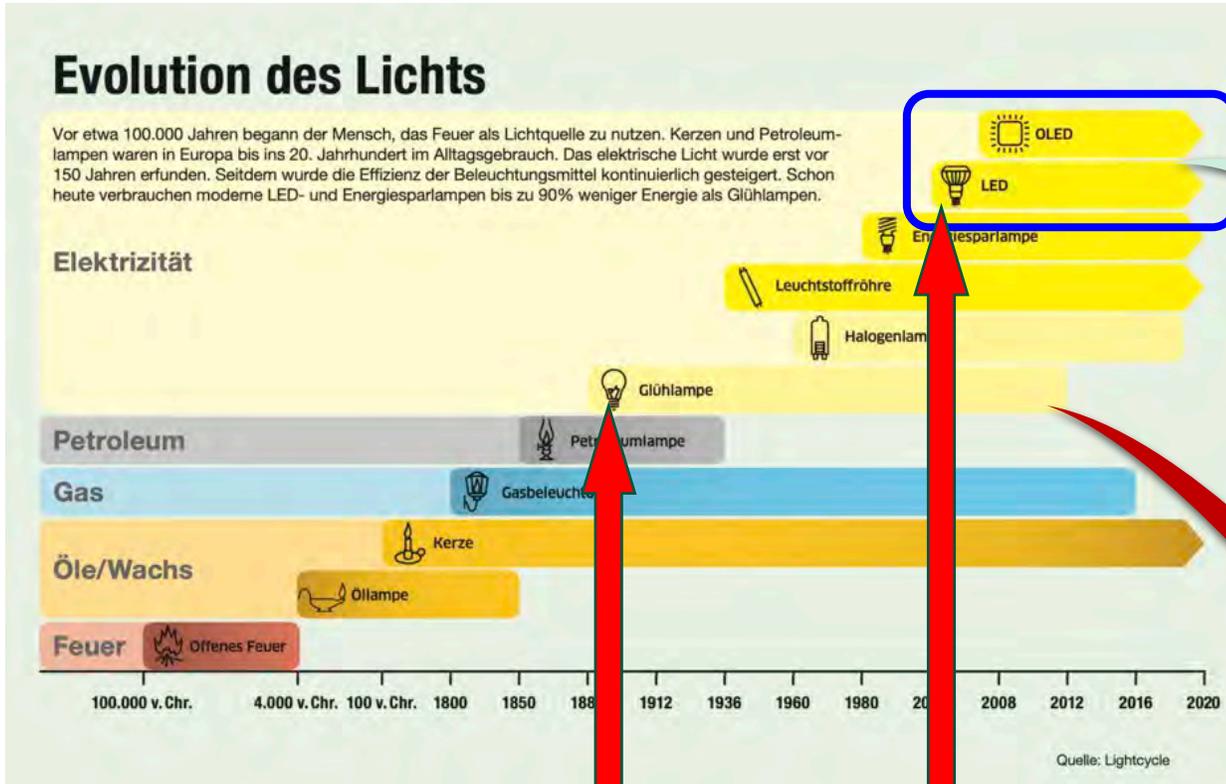
Die Umkehrung des Photoeffekts: LEDs, Diodenlaser und Beleuchtungstechnik



Licht → Elektronen/Strom



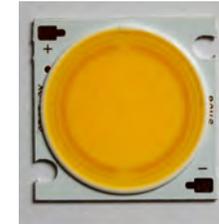
Elektronen/Strom → Licht



<https://www.elektro.net/118109/die-entwicklung-des-lichts-von-der-gluehlampe-bis-zur-led/>

Die (Quanten-)Beleuchtungstechnik hat wissenschaftlich-technische Revolutionen verursacht!

Lichtstrom in *lumen*



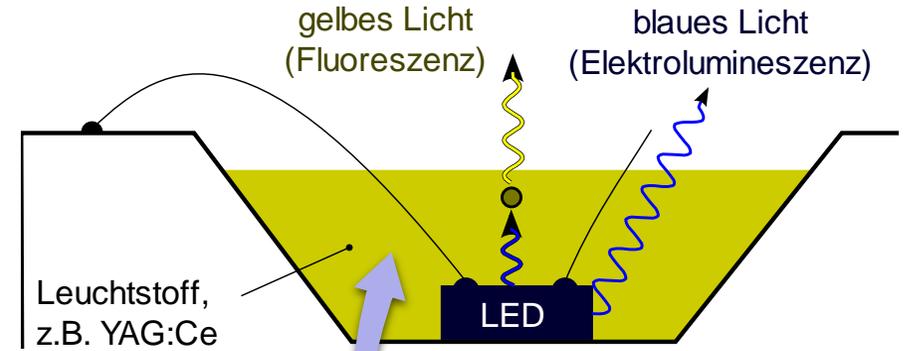
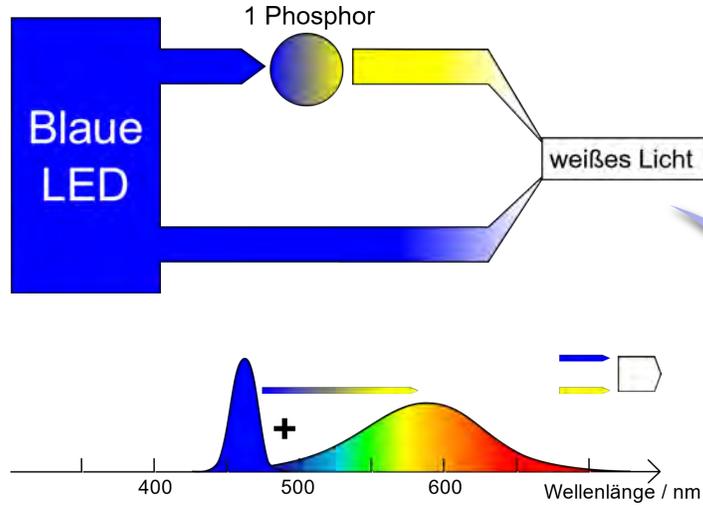
$$\sim 100 \frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$$

Energieeffizienz ca. 80%

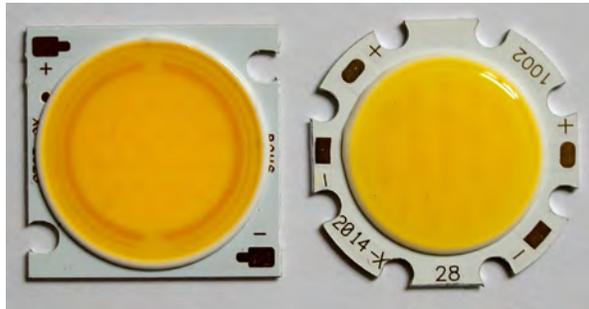


$$\sim 10 \frac{\text{lumen}}{\text{Watt}}$$

Energieeffizienz wenige %



Die Wahl des **Phosphors** bestimmt den Charakter des Lichtes



Das blaue Wunder

Urheber eines wissenschaftl.
Märchens (~ 1990)



Shuji Nakamura,
UC Santa Barbara
vorher Nichia Chemicals, Japan

Nobelpreis 2014



Times Square 1998

Rote und gelbe LEDs
bestehen aus (InAl)GaAs

GaN leuchtet blau!

Interessant:
Grüne LEDs gibt es
erst seit wenigen Jahren!

Achtung!



Wellen

sind **ausgedehnte** („delokalisierte“) Phänomene.

Teilchen

haben **lokalen** (punktförmigen) Charakter.

Vorlesung am 16.01.2025

Materiewellen und Diskretheit



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

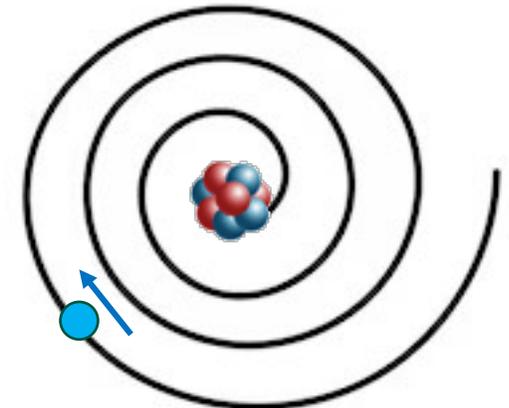
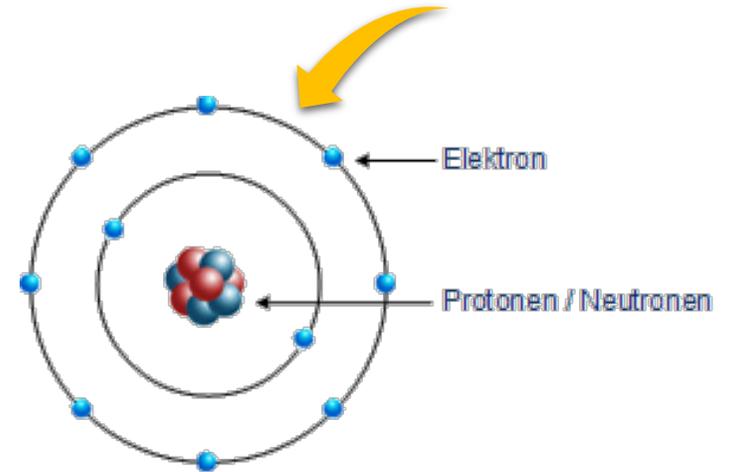
- Woher kommt die Planck-Konstante h ?
- Lichtquanten
- Quantenlichtquellen
- Teilchenwellen
- Was passierte 1925?
- Wie hilft das Wellenbild, Atome zu verstehen?

Wieso sind Atome, wieso ist die Materie stabil?

Gegenfrage: Wieso sollten Atome denn überhaupt **instabil** sein? ... eigentlich alles leer ...

E. Rutherford, N. Bohr, A. Sommerfeld haben 1910-1920 die Vorstellung von Atomen geprägt und durch Experimente untermauert:

Im Bohrschen Bahnmodell laufen leichte Elektronen wie winzige Planetensysteme um schwere Kerne:
(Vergleich: Sonne, Erde, Mond, ...)



Das Problem: Die geladenen Elektronen machen das Atom zur **Sendeantenne**, verlieren Energie und stürzen in den Kern!



Sendeanlage Venusberg
Wikipedia

Das Wellenbild hilft mit de Broglies Teilchenwellen (1924):

"Recherches sur la théorie des quanta"
Louis de Broglie, Doktorarbeit, Sorbonne 1924



Louis de Broglie, 1929



$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \text{de Broglie Wellenlänge}$$

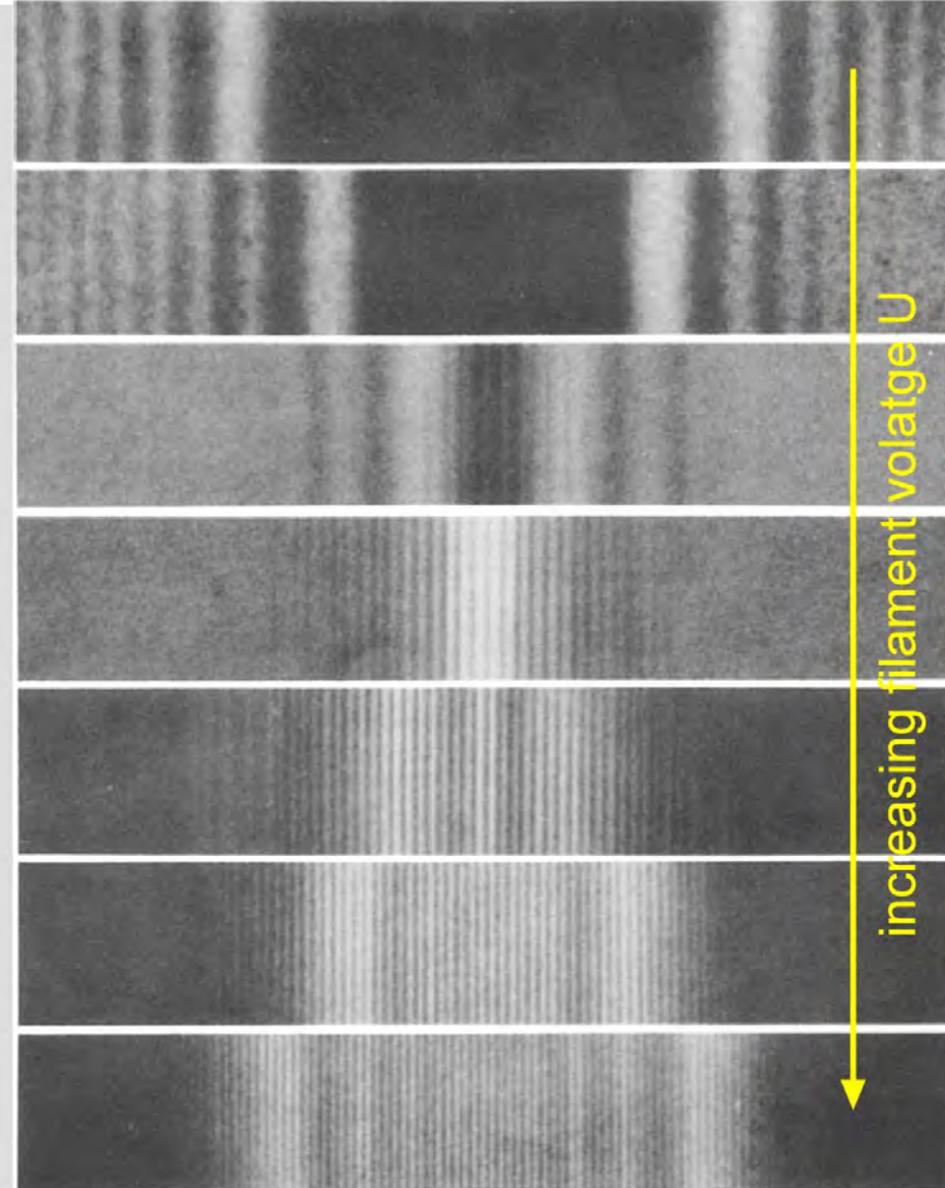
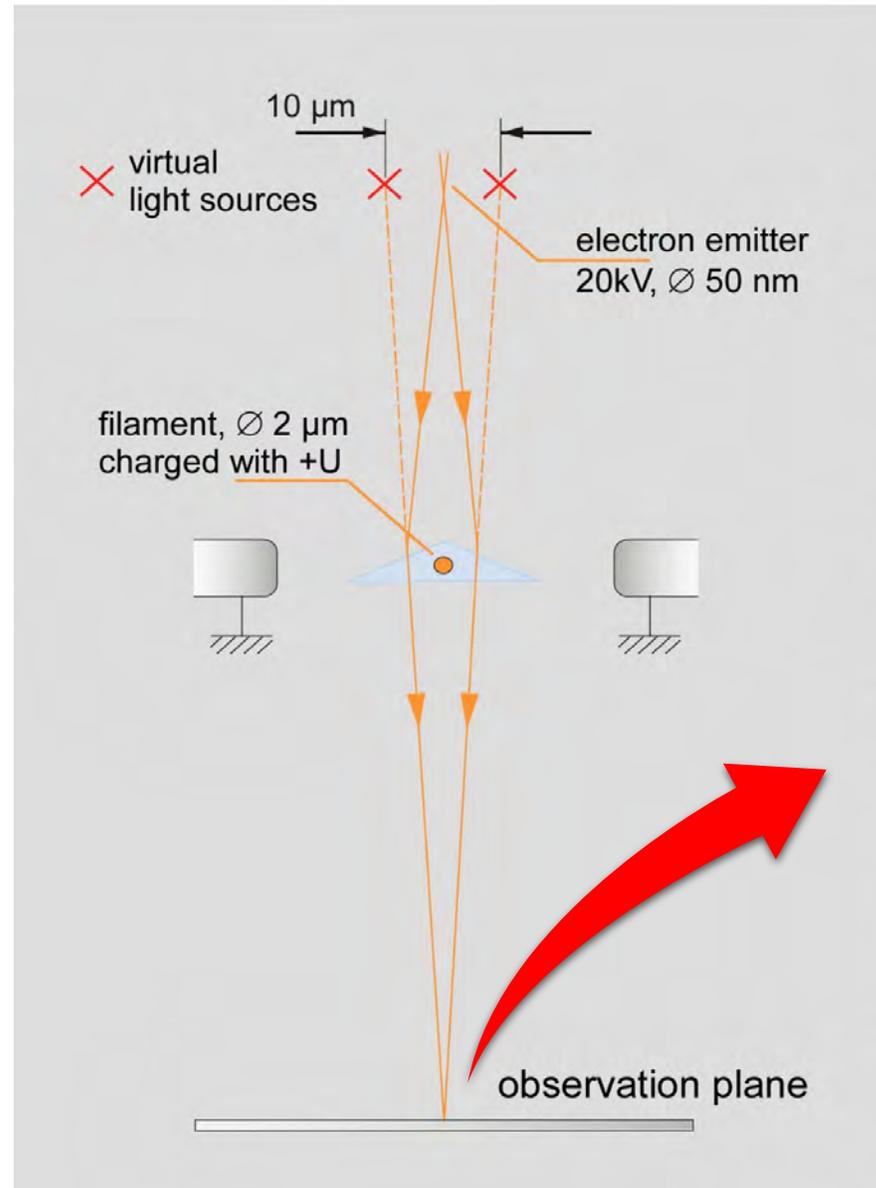
Anleitung für Experimente:
(wir brauchen große λ s!)

- mache **m** klein
- mache **v** klein

nimm Elektronen!

Der „Doppelspalt“ mit Elektronenwellen

(lange Zeit „schönstes Quantenexperiment der Welt“)



Möllenstedt
and Düker 1956
Jönsson 1961
Uni Tübingen

Vorlesung am 16.01.2025

Materiewellen und Diskretheit

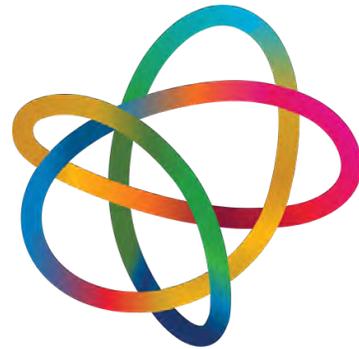


INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

- Woher kommt die Planck-Konstante h ?
- Lichtquanten
- Quantenlichtquellen
- Teilchenwellen
- Was passierte 1925?
- Wie hilft das Wellenbild, Atome zu verstehen?



Quantum2025



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology



Quantum2025

Welcher Umbruch ist denn 1925 passiert?

Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von **W. Heisenberg** in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

werden kann. Bei dieser Sachlage scheint es geratener, jene Hoffnung auf eine Beobachtung der bisher unbeobachtbaren Größen (wie Lage, Umlaufzeit des Elektrons) ganz aufzugeben, gleichzeitig also einzuräumen, daß die teilweise Übereinstimmung der genannten Quantenregeln mit der Erfahrung mehr oder weniger zufällig sei, und zu versuchen, eine der klassischen Mechanik analoge quantentheoretische Mechanik auszubilden, in welcher nur Beziehungen zwischen beobachtbaren Größen vorkommen.

Zur Quantenmechanik.

Von **M. Born** und **P. Jordan** in Göttingen.

(Eingegangen am 27. September 1925.)

Frühestes Auftauchen
des Begriffes?

Zur Quantenmechanik. II.

Von **M. Born**, **W. Heisenberg** und **P. Jordan** in Göttingen.

(Eingegangen am 16. November 1925.)



(ein Mythos)

nach einer Heuschnupfenkur
auf Helgoland?



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

Was ist ein Atom?



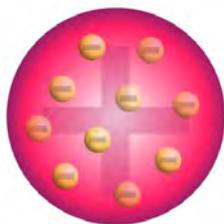
INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

Materie besteht aus
identischen Atomen



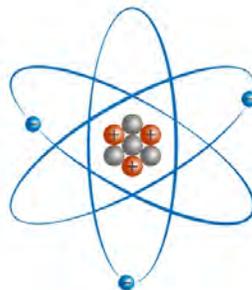
J. Dalton ~ 1820

Atome enthalten **negativ**
geladene **Elektronen**



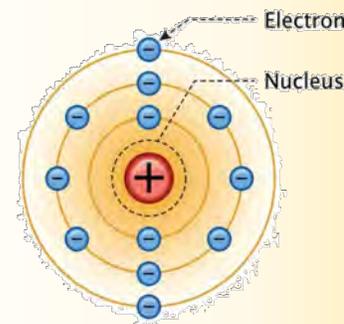
J. J. Thomson 1897

Die **positive Ladung** ist
im **Kern** konzentriert



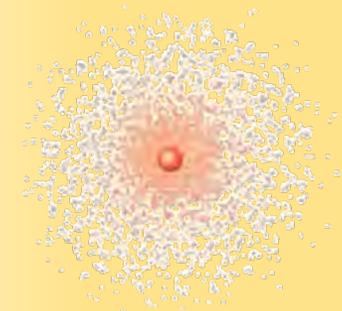
E. Rutherford 1910

Die Elektronen bewegen sich
wie **Planeten um den Kern**



N. Bohr 1913

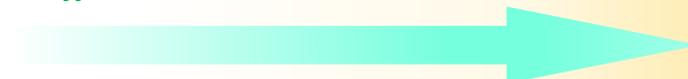
Das „**Bahnmodell**“ ist
ungeeignet für Atome
(→ Quantenmechanik)



W. Heisenberg, W. Pauli,
M. Born, P. Jordan,
P. Dirac, E. Schrödinger
1925+

1925

„**Planetenmodell**“



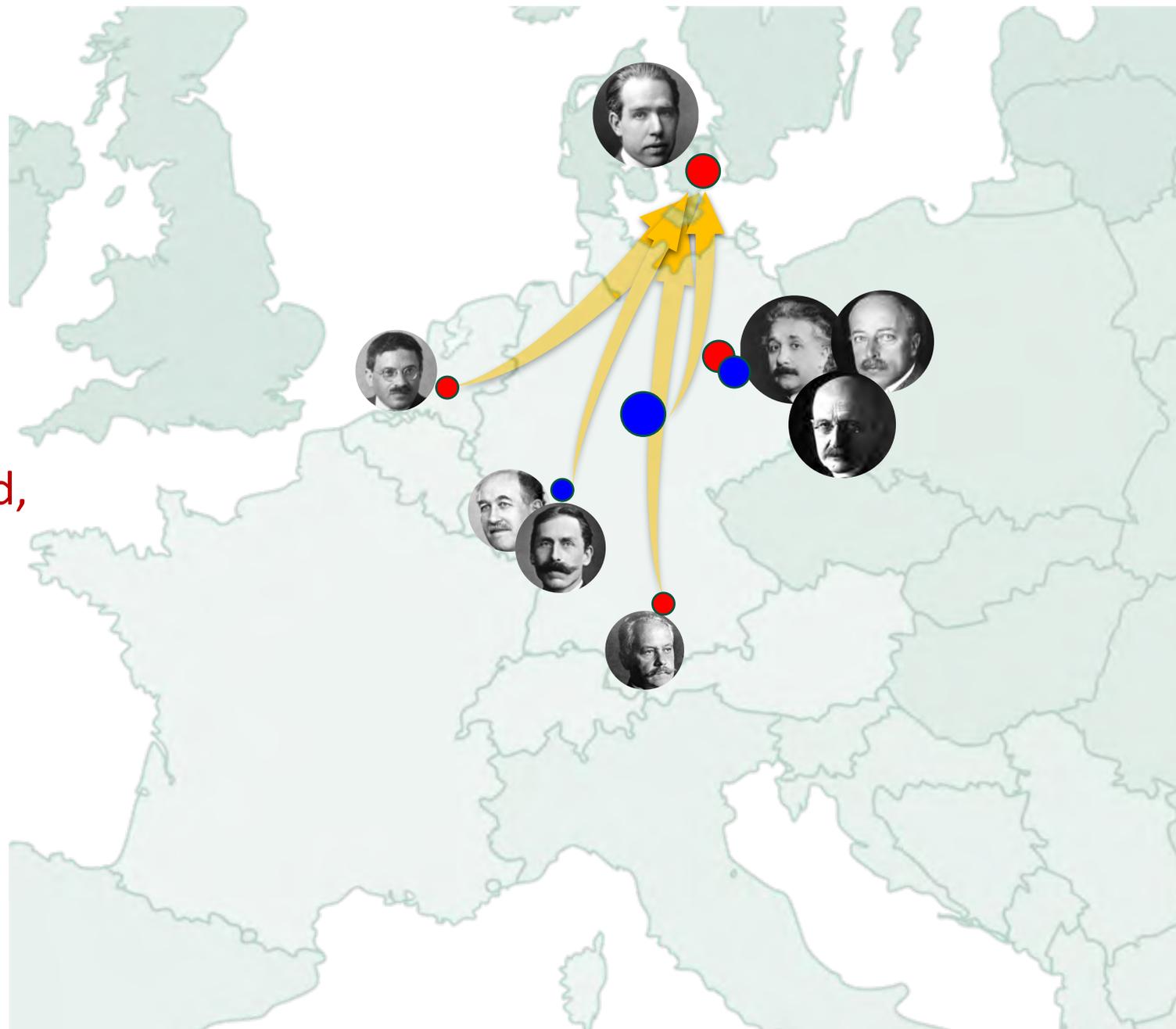
Quantenmechanik

Quanten-Hotspots 1920er-Jahre

Die „alte“
Quantenphysik
(Bohr; Sommerfeld,
Planck, Ehrenfest,
Einstein)



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology



Quanten-Hotspots 1920er-Jahre

Die „neue“
Quantenphysik
(Heisenberg, Pauli
Born, Jordan, Hund
von Neumann, Dirac,
Fermi, ...)

1925



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

