

Relativitätstheorie und Unschärfe – Gibt es noch Fakten in der Physik?

Auch der Laie weiß:

- 1. Relativitätstheorie:** Messergebnisse (Längen, Zeiten u.a.)
abhängig vom Betrachter
- 2. Quantentheorie:** Länge und Geschwindigkeit **nicht gleichzeitig messbar** (Heisenberg-Unschärfe-Relation)

Populäre Argumente gegen Physik und Naturwissenschaften

Ein viel zitiertes Beispiel*

„...Jahrhunderte eines geradezu **zwanghaften Strebens** nach immer genauerer **Quantifizierung** der Dinge“

„...Methodologie des Messens wurde ...zur neuen **Religion**“

„...nach 300 Jahren dualistischen Forschens...

Einsicht, dass eine grundsätzliche **Trennung von Subjekt und Objekt sinnlos** ist.“

Die **Quantenphysik** hat „dem Dualismus ... von **Geist und Materie** den Garaus gemacht.“

Fazit: QM Unschärferelation Heisenbergs
beweist, dass Messen unmöglich ist

* Ken Wilber, „Das Spektrum des Bewusstseins“, 1977, Dt. Ausgabe 1991

Aus der „Bibel“ der Physik-Studierenden:

Grundlage: Experiment

Messergebnis: - trägt objektiven Charakter, d.h.
- ist unabhängig von Ort, Zeit, reproduzierbar
- ist unabhängig vom Experimentator,
seiner Meinung/Überzeugung, Reputation

Grund-Anforderung: - ergebnisoffenes Vorgehen
- Angabe/Aufbewahrung aller Rohdaten
+ Fehler + Messbedingungen

Publikation: - wissenschaftliche Fachzeitschrift/Fachkonferenz
- unabhängige (anonyme) Fach-Begutachtung

Die Praxis sieht manchmal anders aus...

- Skepsis gegen neuen Theorien
(z.B. Relativitätstheorie, Quantentheorie, um 1900)
- übertriebener Respekt vor Autoritäten (z.B. Newton)
- Interessenskonflikte (z.B. voreingenommene Gutachter)
- Fälschungen von Daten
(z.B. Jan Hendrik Schön)

Von Physik selbst korrigiert

1. Macht die Relativitäts-Theorie Messungen unmöglich?

Behauptung: Messergebnisse abhängig vom Betrachter

Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie:

Experimente zur Lichtgeschwindigkeit (Michelson u.a.)
 $c=300.000$ km/s, konstant, identisch in allen Systemen

Einsteins Postulate (1905):

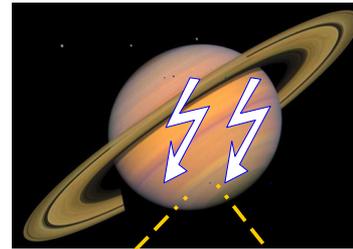
1. alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt
2. in allen Inertialsystemen ist c invariant

Spezielle Relativitätstheorie

Experiment: Geschwindigkeit EM Wellen ist überall* = c



Albert Einstein, 1905



c

c



v_E

$v_E, v_m = const$

unterschiedliche Zeiten
verschiedene Längen

Spezielle Relativitätstheorie

Konsequenz aus Einsteins Postulaten:

Längenkontraktion (es gibt keine absolute Länge) $\sim 1/\gamma$
Zeit-Dilatation (es gibt keine absolute Zeit) $\sim \gamma$

$$\text{Lorentz-Faktor } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

abhängig von der Geschwindigkeit v des Bezugssystems

andere Größen sind absolut (Raum-Zeit Lorentz-invariant)

aber: Messergebnis nicht abhängig vom Betrachter
Ergebnisse reproduzierbar, umrechenbar
objektiver Charakter der Messung in SRT nicht verletzt

SRT: durch Experimente hervorragend bestätigt
(Navigation, GPS etc.)

Spezielle Relativitätstheorie

Energie eines Teilchens der Masse m (Einstein, 1905):

Nichtrelativistisch (p : Impuls):
$$E(p) = \frac{p^2}{2m}$$

relativistisch, *in Ruhe*:

$$E(0) = m c^2$$

in Bewegung:

$$E^2(p) = (m c^2)^2 + (c p)^2$$

Positive und negative Lösung:

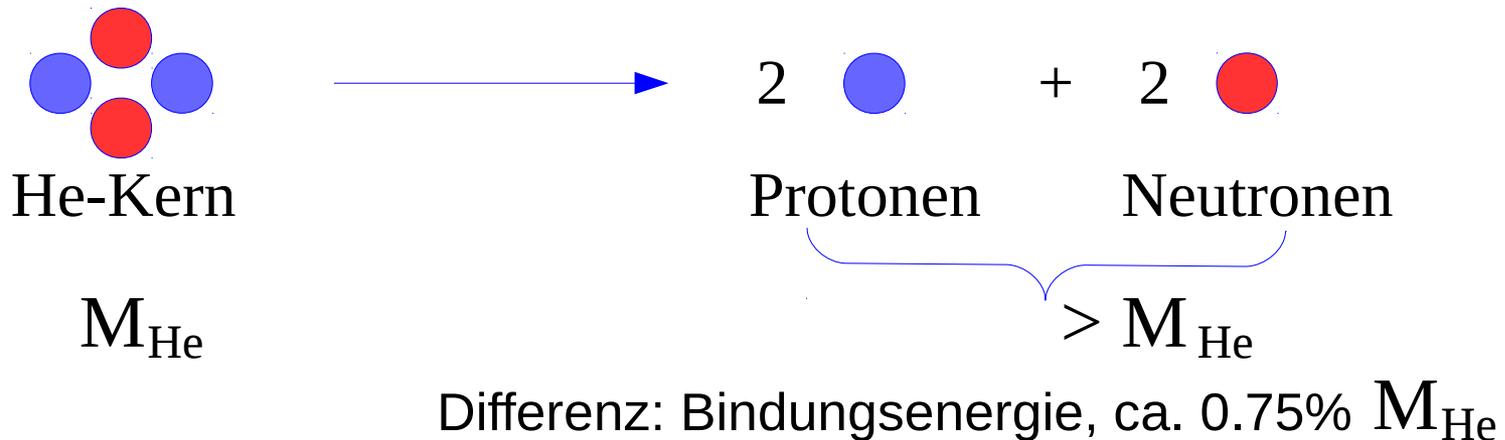
$$E(p) = \pm \sqrt{(m c^2)^2 + (c p)^2}$$

Spezielle Relativitätstheorie

Ruhe-Energie eines Teilchens der Masse m (Einstein, 1905):

$$E = m c^2$$

Beispiel 1: „**Massendefekt**“ in Kernen, Atomen, Molekülen



Spezielle Relativitätstheorie

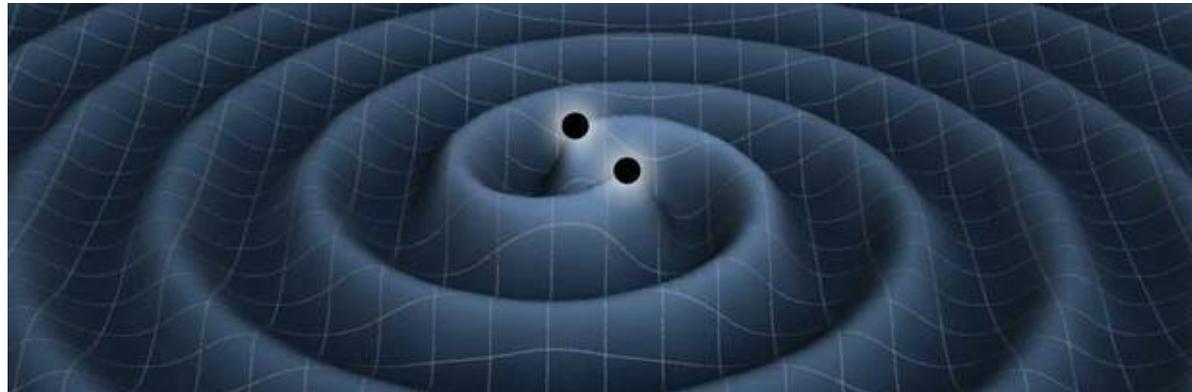
Ruhe-Energie eines Teilchens der Masse m (Einstein, 1905):

$$E = m c^2$$

Beispiel 2: Masseverlust verschmelzender Sterne (26.12. 2015)

Nobelpreis 2017

$8 M_{\text{S}}$



$14 M_{\text{S}}$

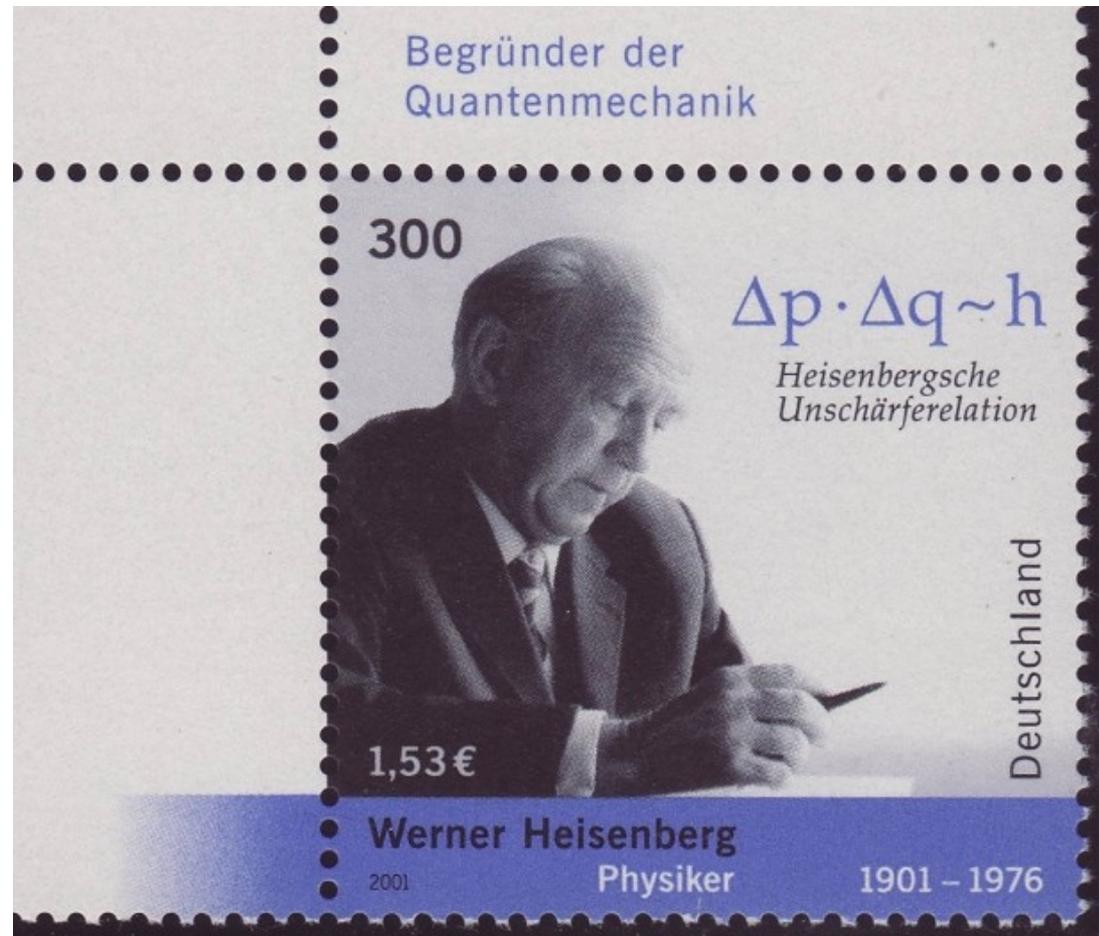
$21 M_{\text{S}}$

Differenz: Gravitationswellen-Energie: ca. $1 M_{\text{S}}$

2. Macht die Unschärfe Messungen unmöglich?

Quantenmechanik
1925-28

Länge und Impuls ($p=mv$)
nicht gleichzeitig messbar

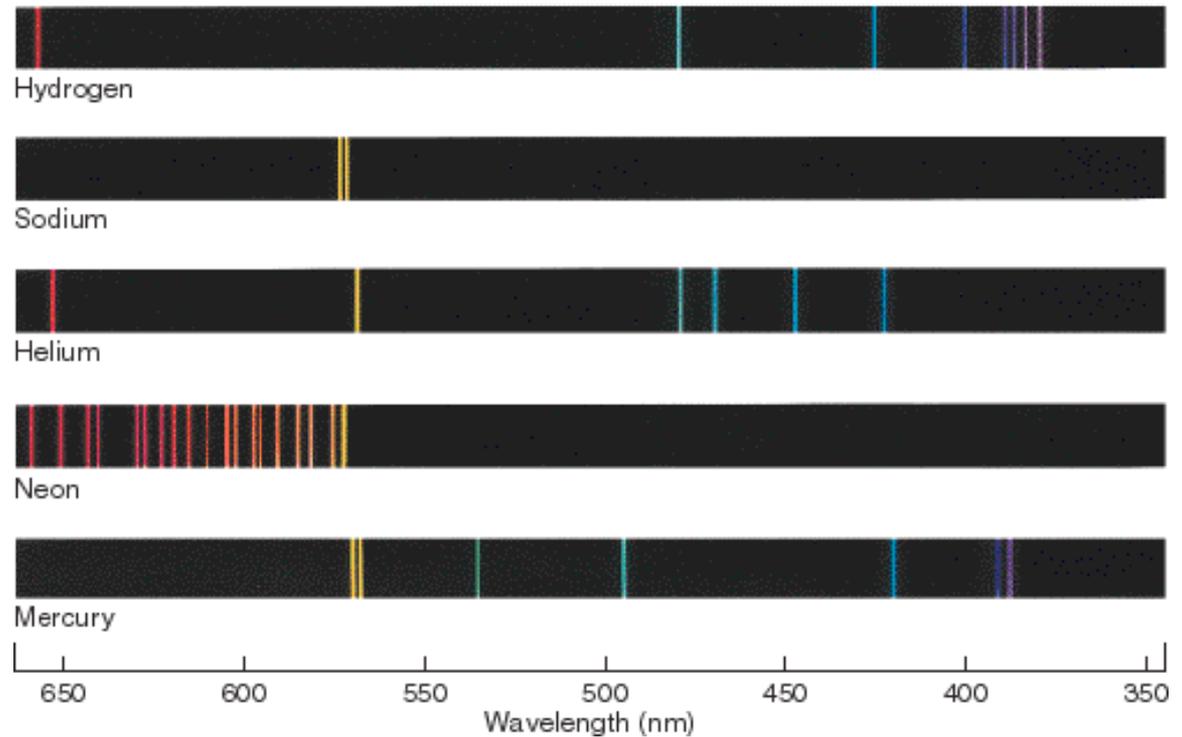


Quantenmechanik

Absorption von Licht durch Atome: Linienspektrum

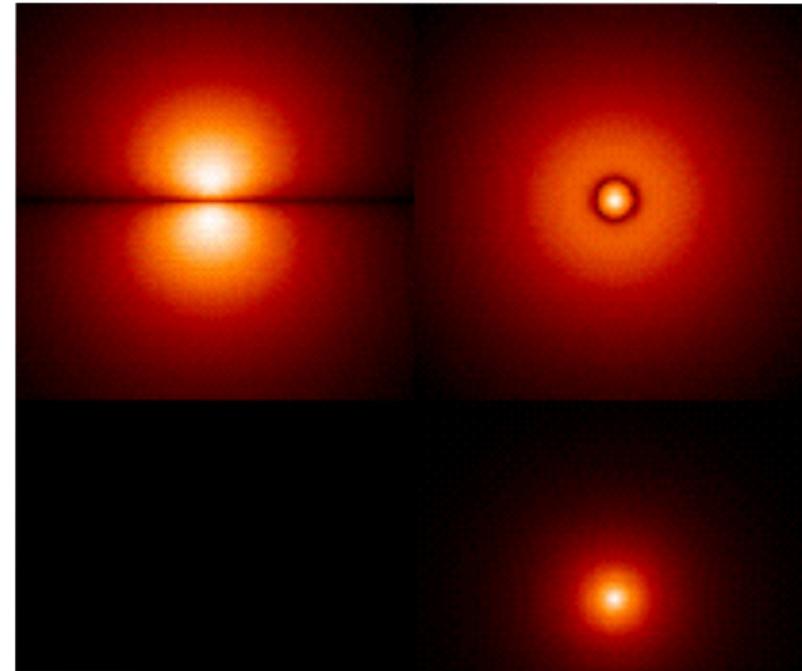
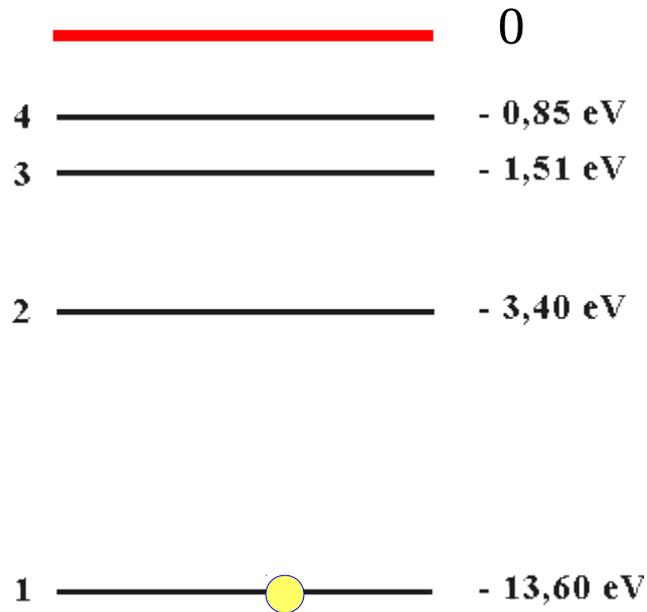
Wasserstoff: Balmer 1885

Atome und Moleküle
eindeutig indentifizierbar
(Spektralanalyse)



Quanten-Natur der Atome (Beispiel: H)

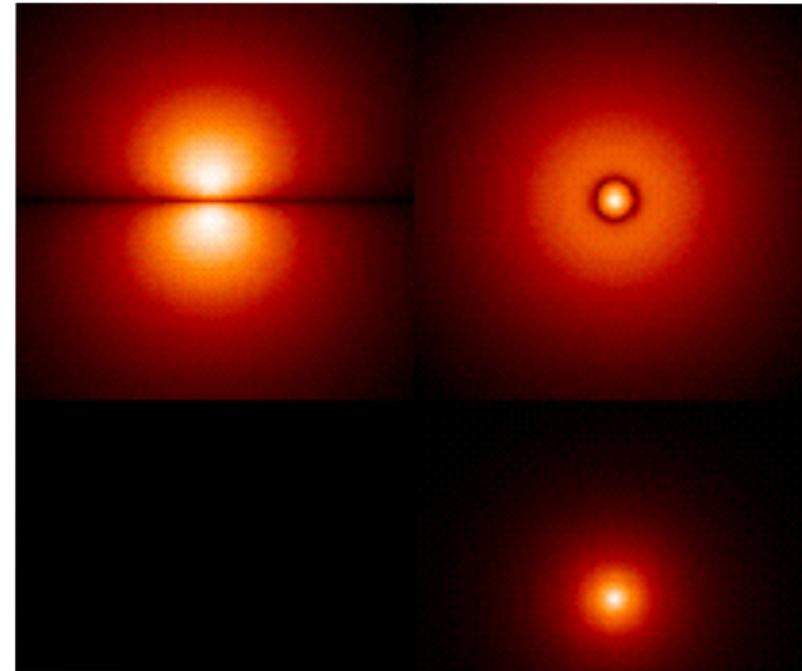
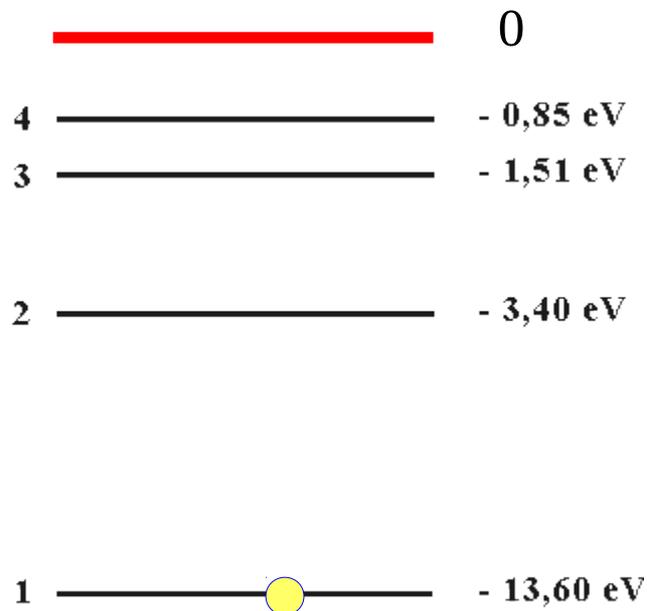
Energie des Elektrons
quantisiert



Elektron *delokalisiert*
im Raum (um Kern)

Quanten-Natur der Atome (Beispiel: H)

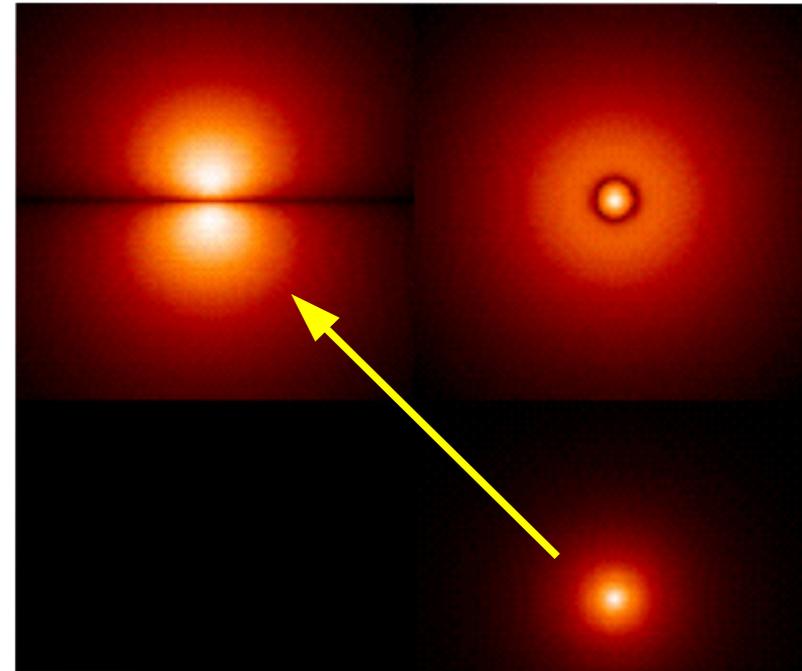
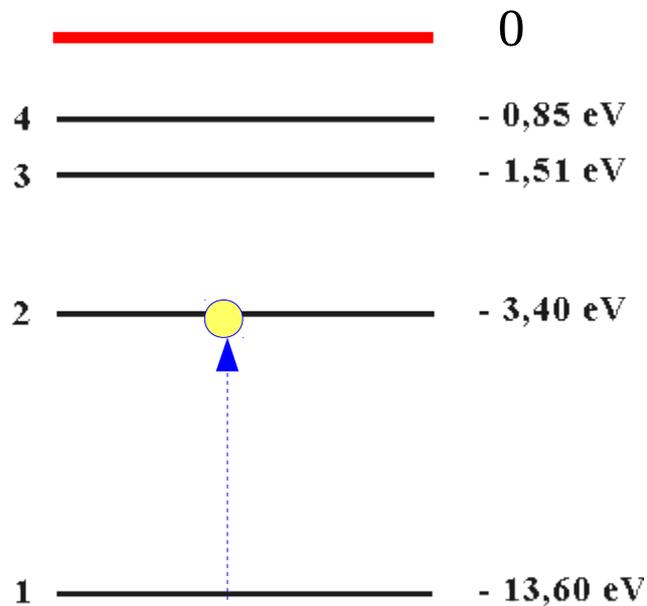
Absorption eines Quants



**Elektron *delokalisiert*
im Raum**

Quanten-Natur der Atome (Beispiel: H)

Übergang auf höheres
Energie-Niveau (E-Erhaltung)



Übergang in neuen Zustand
„ausgewählt“ vom Licht

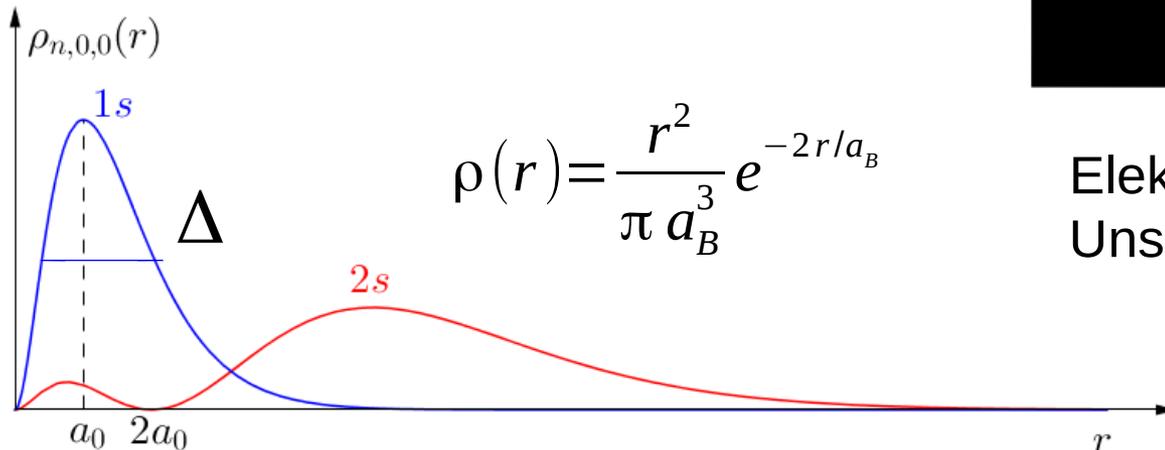
Orts- und Impuls-Unschärfe (Beispiel: H)

In jedem Zustand:

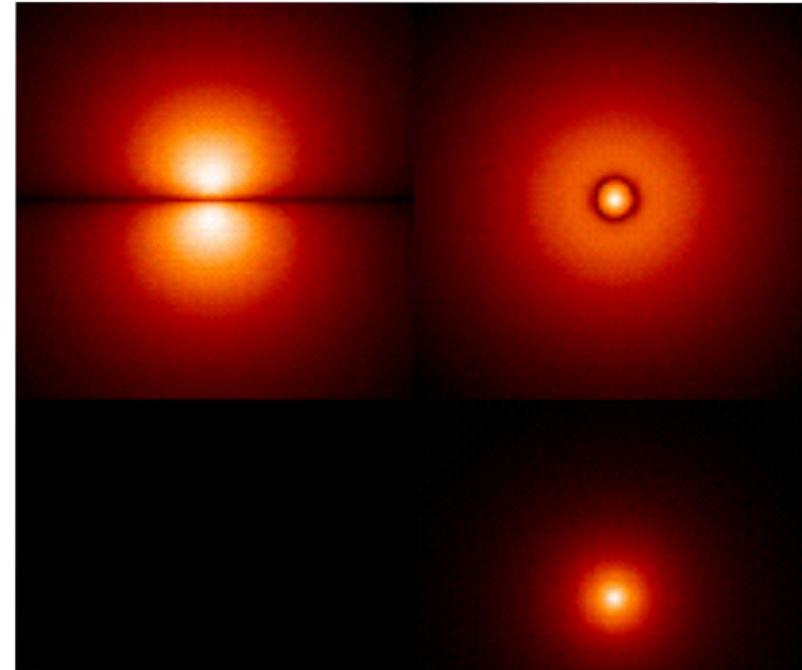
Ort r und Impuls p des Elektrons haben
Verteilung endlicher Breite

Beispiel: Grundzustand (1s)

Impulsverteilung:
$$P(p) = \frac{4}{\pi^3} \left(\frac{\hbar a_B}{\hbar^2 + a_B^2 p^2} \right)^3$$



$$\rho(r) = \frac{r^2}{\pi a_B^3} e^{-2r/a_B}$$



Elektron *delokalisiert* im Raum
Unschärfe \sim Varianz Δ

Wahrscheinlichkeits-
Interpretation

Orts- und Impuls-Unschärfe (Beispiel: H)

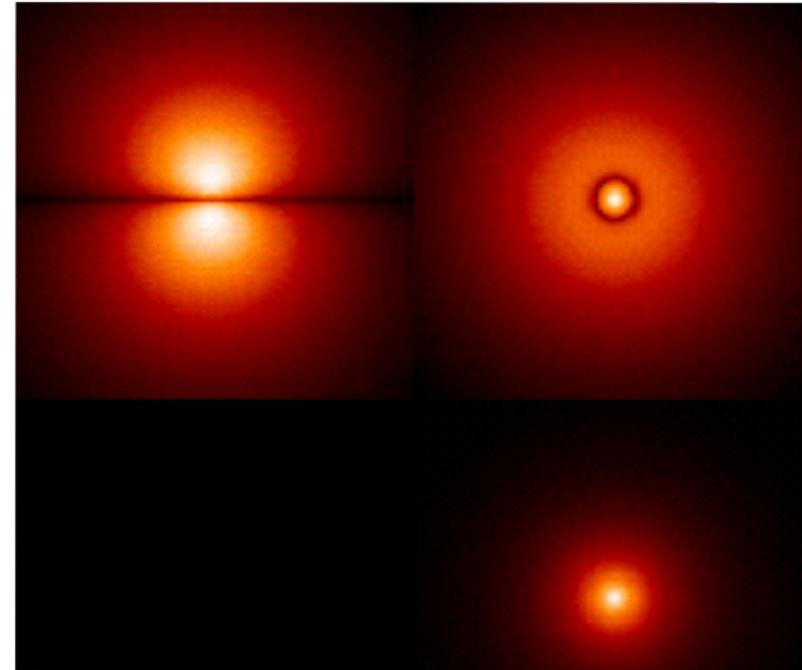
Verteilungen endlicher Breite (Varianz)

$P(p)$ **direkt messbar** (Photoionisation, Photoemission), **reproduzierbar**, Theorie exakt bestätigt

Unschärferelation $\Delta p \Delta q \geq \frac{\hbar}{2}$

Strenges mathematisches Resultat

Eigenschaft des Mikrokosmos
(ob es uns gefällt oder nicht)

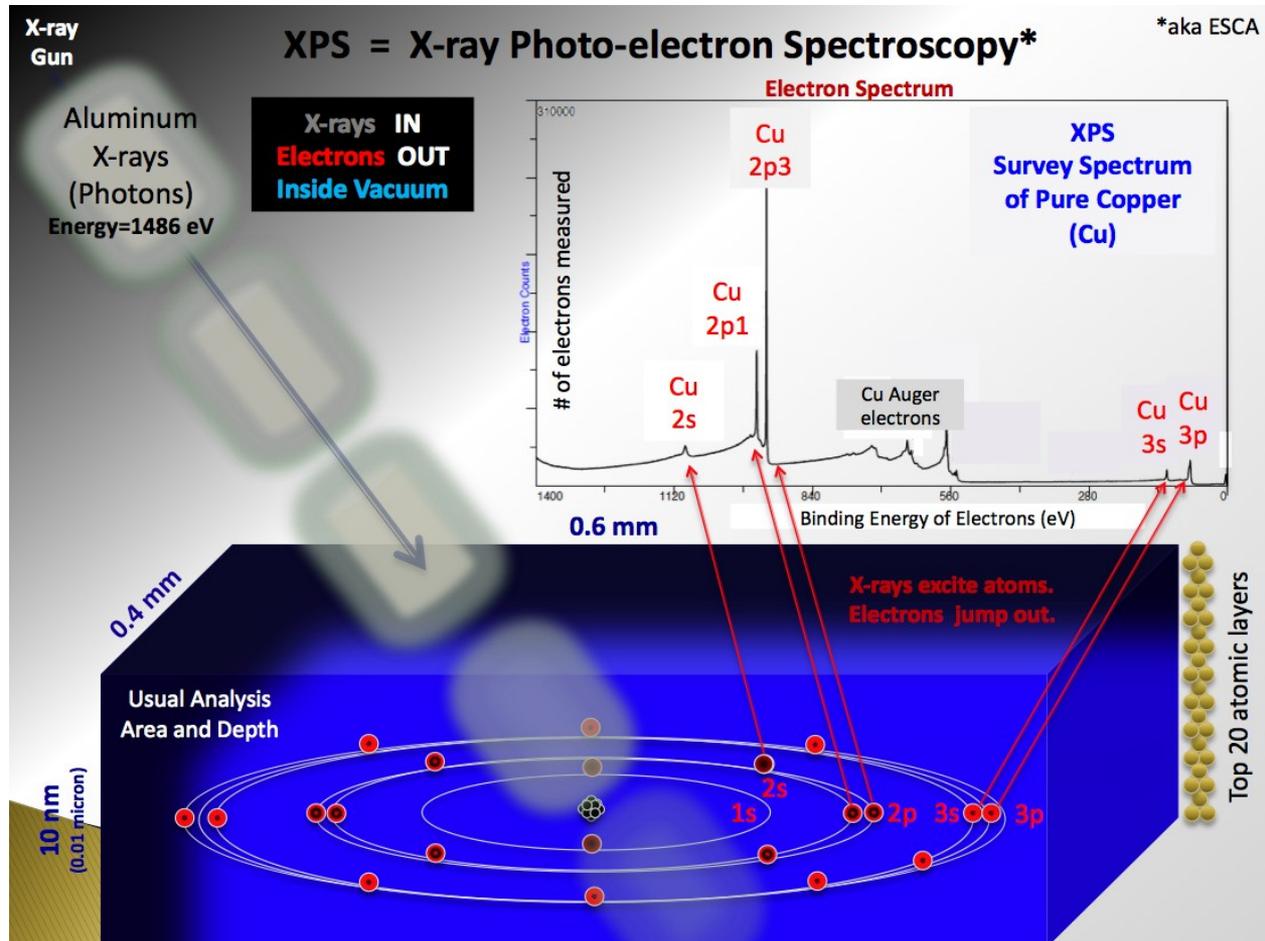


Elektron **delokalisiert** im Raum
Unschärfe \sim Varianz Δ

Für makroskopische Objekte vernachlässigbar $\hbar \sim 10^{-34} \text{Ws}^2$

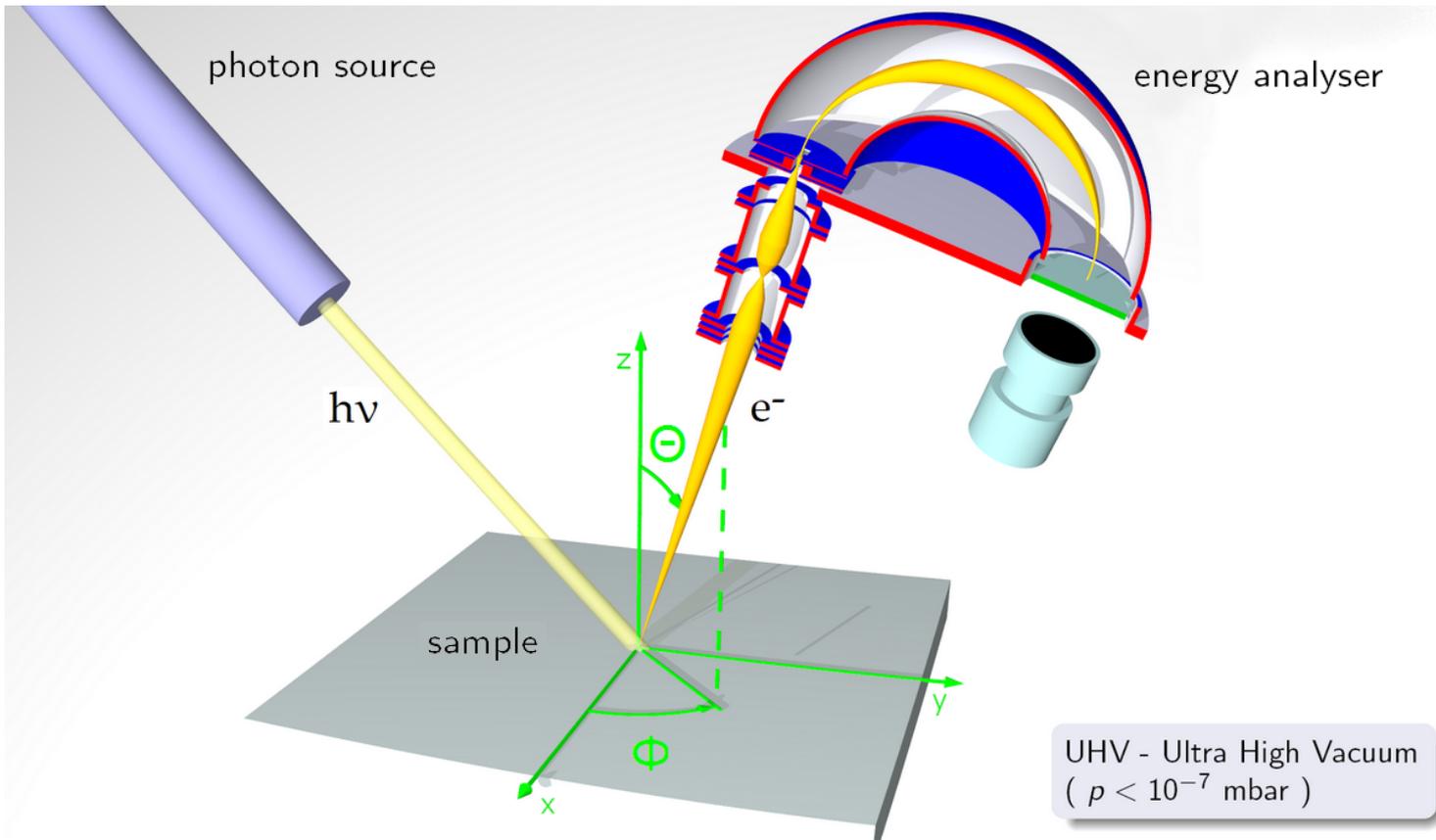
Messung der Impulsverteilung

Atome, Moleküle: Photo-Ionisation, reproduziert Energieniveaus



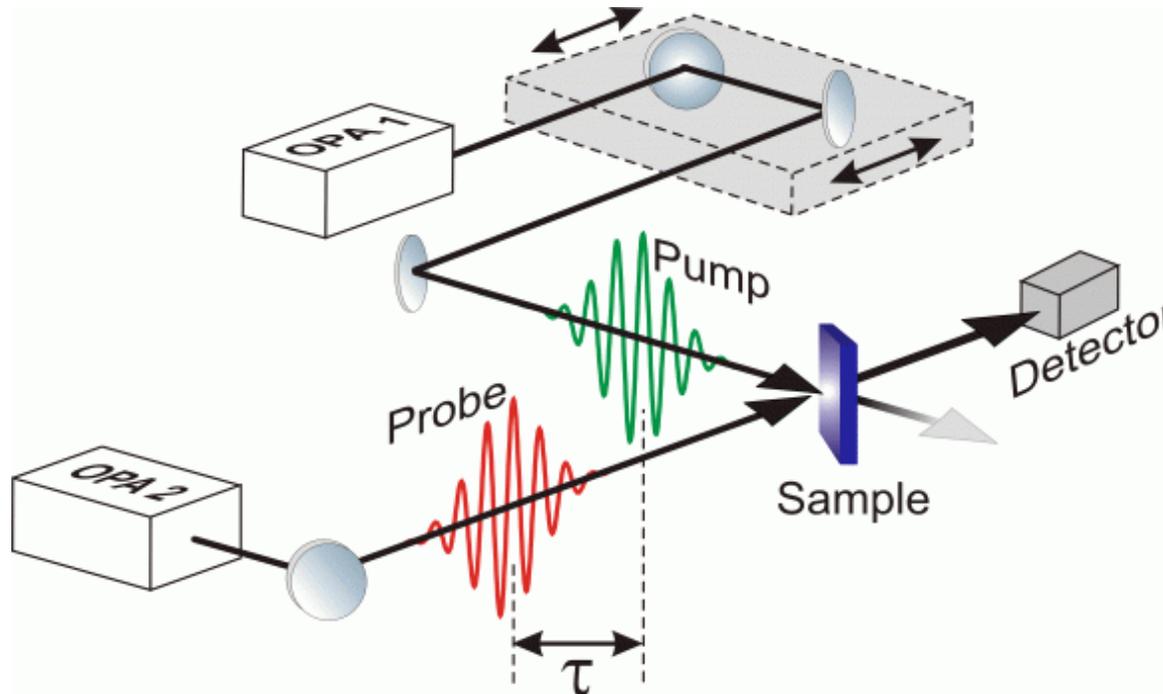
Messung der Impulsverteilung (2)

Festkörper: Photoemissions-Spektroskopie (ARPES) Abbildung der Bandstruktur



Messung der Impulsverteilung (3)

Festkörper Photoemissions-Spektroskopie (tr-ARPES)
o. Atome Zeitauflösung durch pump-probe-Schema



Zeit-Abstand

Genauigkeit der Quantenmechanik

Übereinstimmung mit dem Experiment (Beispiele):

- Wärmestrahlung (Planck-Theorie): exzellente Übereinstimmung
- Struktur der Atome: genauestens beschrieben durch Q-Mechanik
- Quanten-Elektrodynamik: Feinstrukturkonstante (EM Wechselwirkung)
relative Abweichung Experiment vs. Theorie: $10/1.000.000.000$

Genauigkeit der Quantenmechanik

Übereinstimmung mit dem Experiment (Beispiele):

- Wärmestrahlung (Planck-Theorie): exzellente Übereinstimmung
- Struktur der Atome: genauestens beschrieben durch Q-Mechanik
- Quanten-Elektrodynamik: Feinstrukturkonstante (EM Wechselwirkung)
relative Abweichung Experiment vs. Theorie: 10/1.000.000.000

Vorhersage neuer Effekte und Teilchen:

Positron (Antimaterie): theoretische Vorhersage P. Dirac 1928
Entdeckung: C.D. Anderson 1932

Higgs-Boson: Vorhersage Englert, Higgs u. andere (1964)
Entdeckung: LHC (CERN), 2003-2012 (5.9 sigma, 22xZahl)

Fazit

Relativitätstheorie und Unschärfe – Gibt es noch Fakten in der Physik?

1. Relativitätstheorie: Messergebnisse (Längen, Zeiten u.a.)
unabhängig ~~abhängig~~ vom Betrachter

Längen, Zeiten, Energien... reproduzierbar exakt messbar
trivial umrechenbar zwischen verschiedenen bewegten Systemen

2. Quantentheorie: Heisenberg-Unschärfe-Relation macht Messung
nicht unmöglich,
physikalisch relevant sind verbreiterte Verteilungen
(Unschärfe)

Relativitätstheorie und Unschärfe – Gibt es noch Fakten in der Physik?

Relativitätstheorie und Quantentheorie

- durch Experiment hervorragend bestätigt
- objektiver Charakter der Messung bestätigt
- Messergebnisse sind evidenzbasiert → Fakten

Physik

... hat gelernt, wie man Fakten erkennt, prüft und neue gewinnt (Experiment)

... macht auch Fehler

... korrigiert ihre Fehler selbst, ohne Rücksicht auf Autoritäten

Herangehensweise nützlich für andere Fachgebiete und für die gesellschaftliche Diskussion