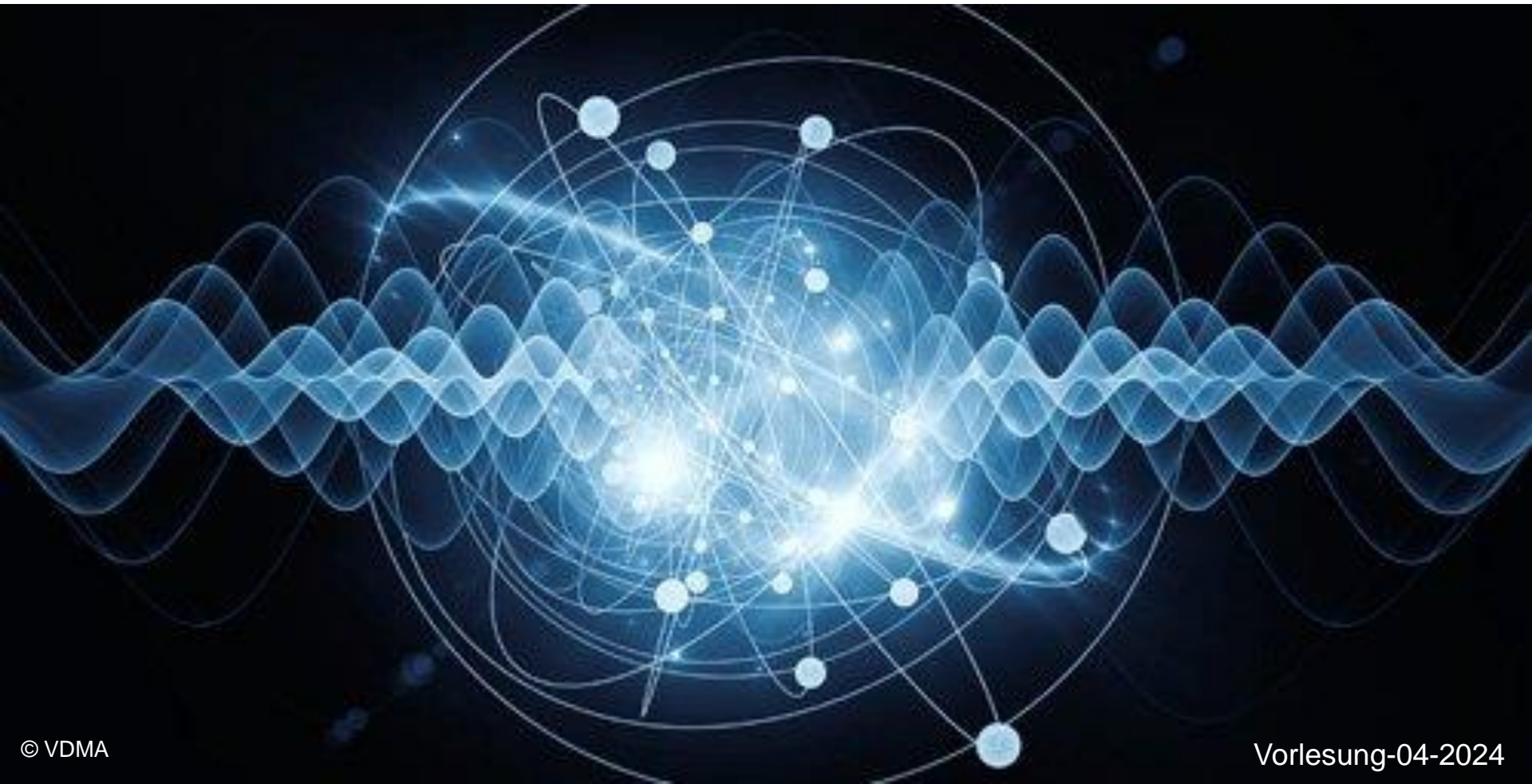


Einführung - Quantenmechanik

Joachim Ankerhold, Dominik Maile
Institut für Komplexe Quantensysteme
Universität Ulm & IQST





~400 v.Chr.: Abdera/Thrakien

© BayWa



© Wikipedia



Demokrit Ist Materie beliebig oft teilbar?

...Die kleinsten Bausteine sind Atome unterschiedlicher Form.

ἄτομος = unteilbar

...mehr als 2000 Jahre später, München 1874



Studienberatung bei Prof. Philipp v. Jolly:
*Physik wollen Sie studieren? Davon rate ich ab.
In dieser Wissenschaft ist schon alles erforscht, es gilt
nur noch einige unbedeutende Lücken zu schließen.*

Die Welt der Physik 1874

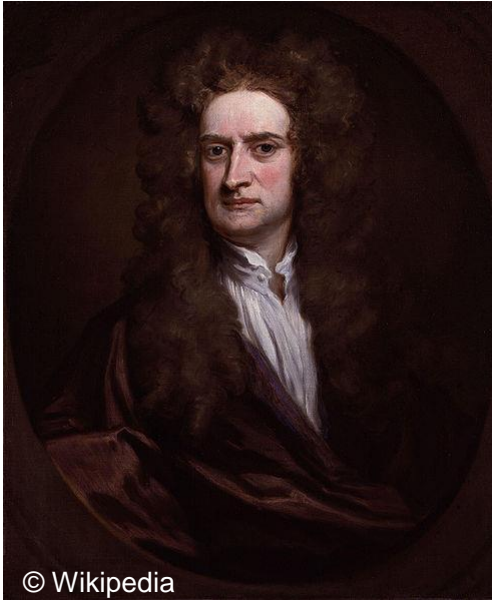


Wellen

Teilchen



Die Welt der Teilchen – die mechanistische Welt



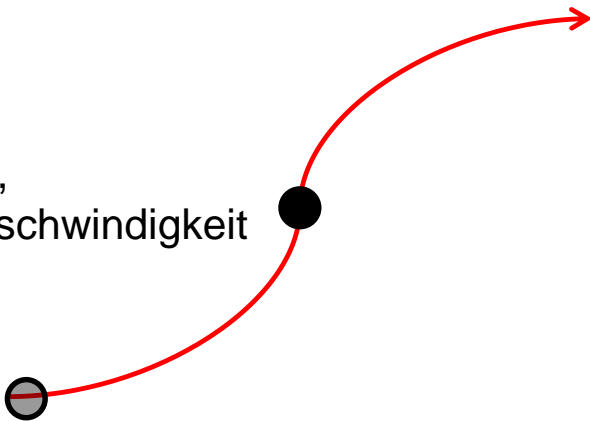
Isaac Newton, Principia Mathematica. 1687:
Bewegungsgesetze materieller Körper

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

Materielle Körper bewegen sich unter dem Einfluss von Kräften auf Bahnen, z.B.

- Steine, Bälle,...
- Maschinen
- Kreisel
- Thermodynamik (Statistische Mechanik)

Ort,
Geschwindigkeit



Die Welt der Wellen – die Welt des Lichts



James C. Maxwell

Elektrodynamik, 1864

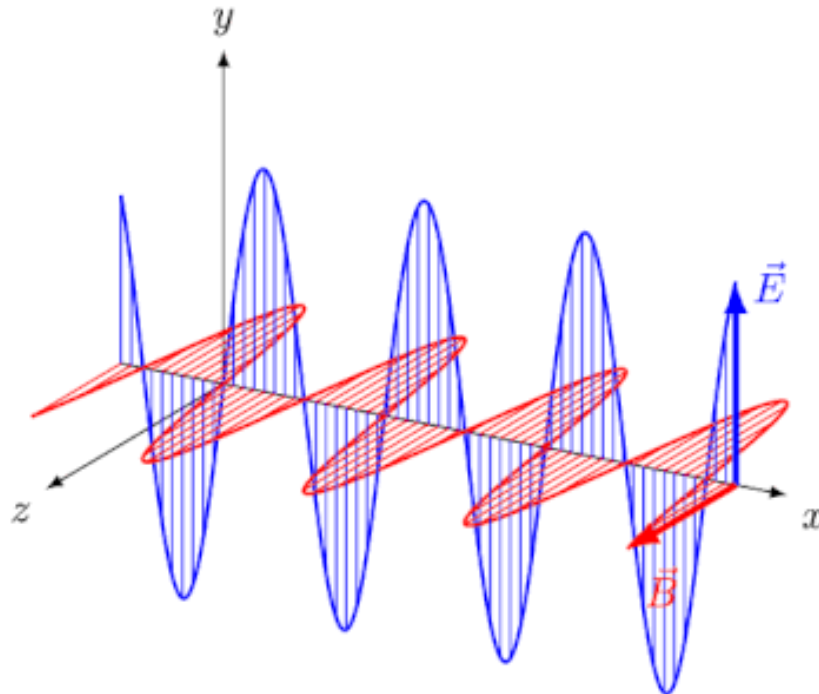
$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

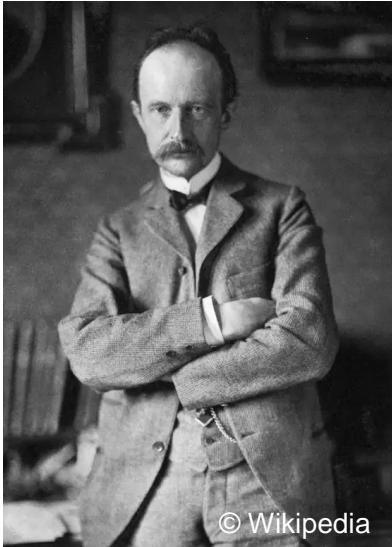
$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$c = \lambda \cdot \nu$$



© Wikipedia

Das Licht des Schwarzen Körpers



Max Planck, 1900

Lichtemission eines glühenden Körpers

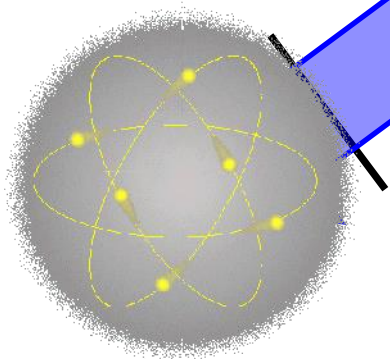


**Materie gibt Licht ab
in Paketen der Energie**

$$h \cdot \nu$$

Wirkungsquantum

$$h = 6,64 \dots 10^{-34} \text{ Js}$$



1 mm

$1\mu\text{m}$

1 nm

20. Jahrhundert –
der Weg in die Materie

Materielle Objekte = Wellen und Teilchen



© Wikipedia

Louis De Broglie 1923

$$m \cdot v = \frac{h}{\lambda}$$

Geschwindigkeit

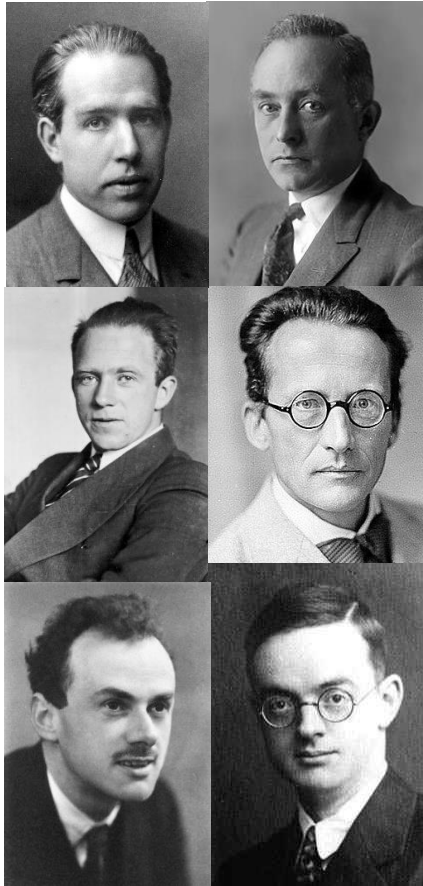
Wellenlänge

Tennisball $\lambda \approx 2 \cdot 10^{-34} \text{ m}$

Virus $\lambda \approx 10^{-16} \text{ m}$

Atom $\lambda \approx 10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ nm}$

... Wellenmechanik



Bohr
Heisenberg
Dirac

Born
Schrödinger
Jordan

Wellenamplitude eines materiellen Objekts

$$\psi(\vec{x}, t)$$

Wellengleichung (Schrödinger-Gleichung, 1926)

$$\hat{H} \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

$$\hbar = h/2\pi$$

Energie zeitliche Änderung

In a nutshell...Quantenmechanik

1. Quanten-Objekte sind Wellen–Teilchen
2. Nur Aussagen über Wahrscheinlichkeiten sind möglich
3. Quantenobjekte können Interferenzen zeigen
(„Superposition klassischer Möglichkeiten“)
4. Die Art der Messung entscheidet über das Ergebnis

In a nutshell...Quantenmechanik

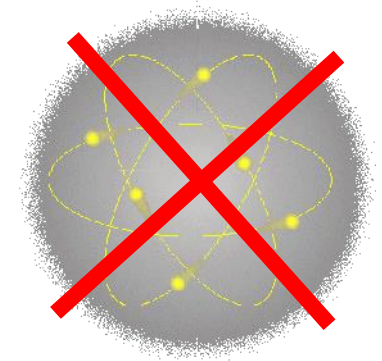
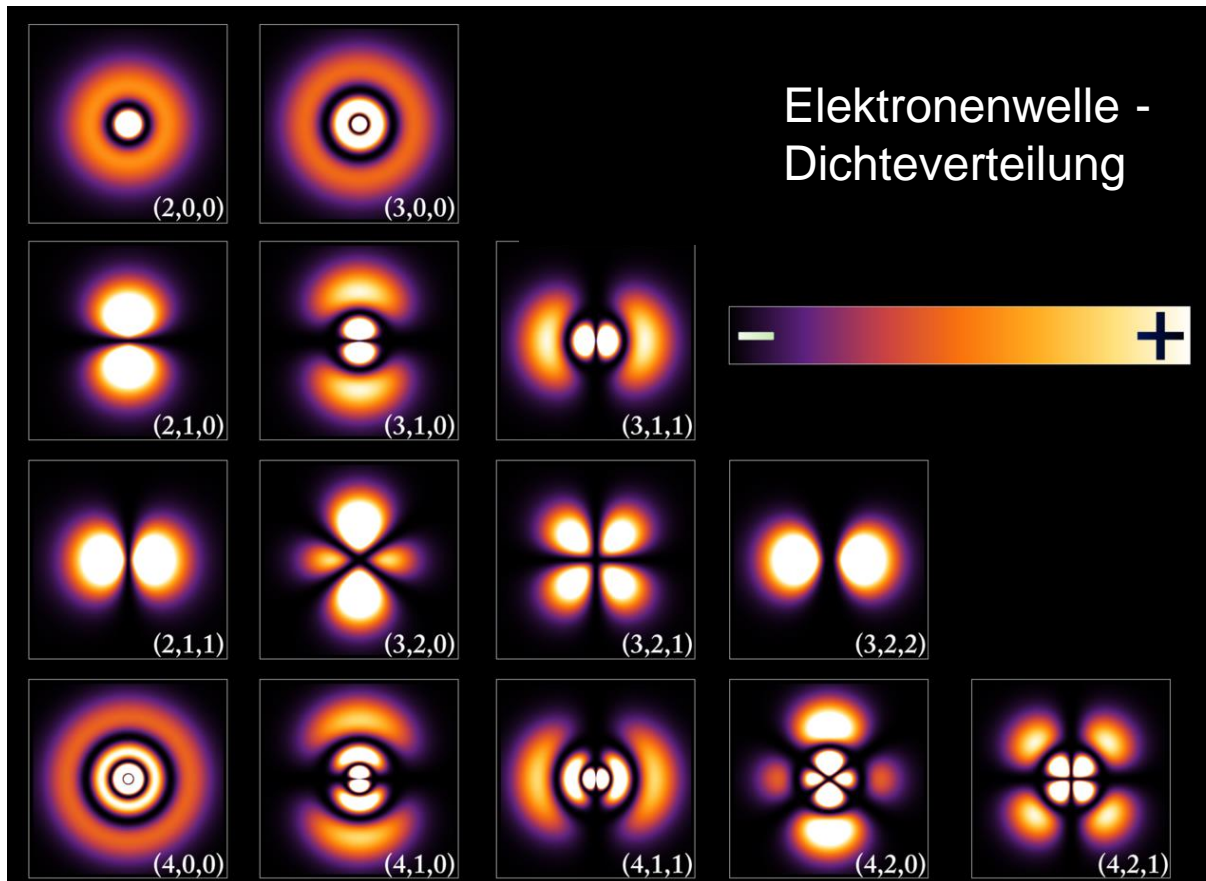
1. Quanten-Objekte sind Wellen–Teilchen
2. Nur Aussagen über Wahrscheinlichkeiten sind möglich
3. Quantenobjekte können Interferenzen zeigen
(„Superposition klassischer Möglichkeiten“)
4. Die Art der Messung entscheidet über das Ergebnis

Theoretischer Formalismus:

Verknüpfung von Teilchen- und Wellenkonzepten

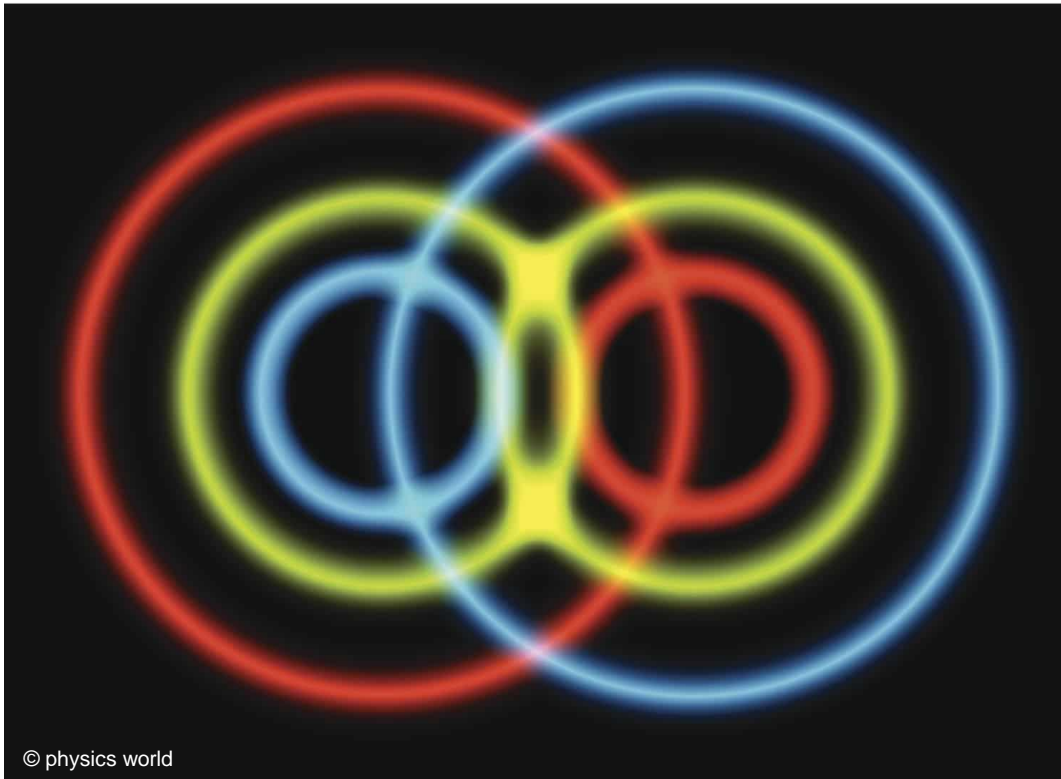
Verknüpfung von klassischer Mechanik und Statistischer Physik

Quantisierung: Spektrum Wasserstoff



Mehr-Körper-Interferenz: Verschränkung

– Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile



Nobel Prize 2022

Grundlage der modernen Physik in allen Bereichen

Elementarteilchen: Standardmodell

Konstituenten der Hadronen (Quarks, Gluonen)

Leptonen (Elektronen, Myonen etc.)

Atom- und Molekülphysik

Atom- und Molekülbindung, Spektren, Bose-Einstein-Kondensation, ...

Kondensierte Materie

Stabilität, Phasenübergänge, Supraleitung, Quanten-Hall-Effekt, Quasi-Teilchen, Topologie,.....

Kosmologie

Big Bang, Inflationäres Universum, Hawking-Strahlung,...

Quanten – Welt:

Stellt herkömmliche Vorstellungen in Frage

- Was ist ein Teilchen?
- Ist der Zufall integraler Bestandteil der Natur?
- Gibt es Eigenschaften vor einer Messung?
- Warum sehen wir die Quantenphänomene nicht in der Makrowelt?

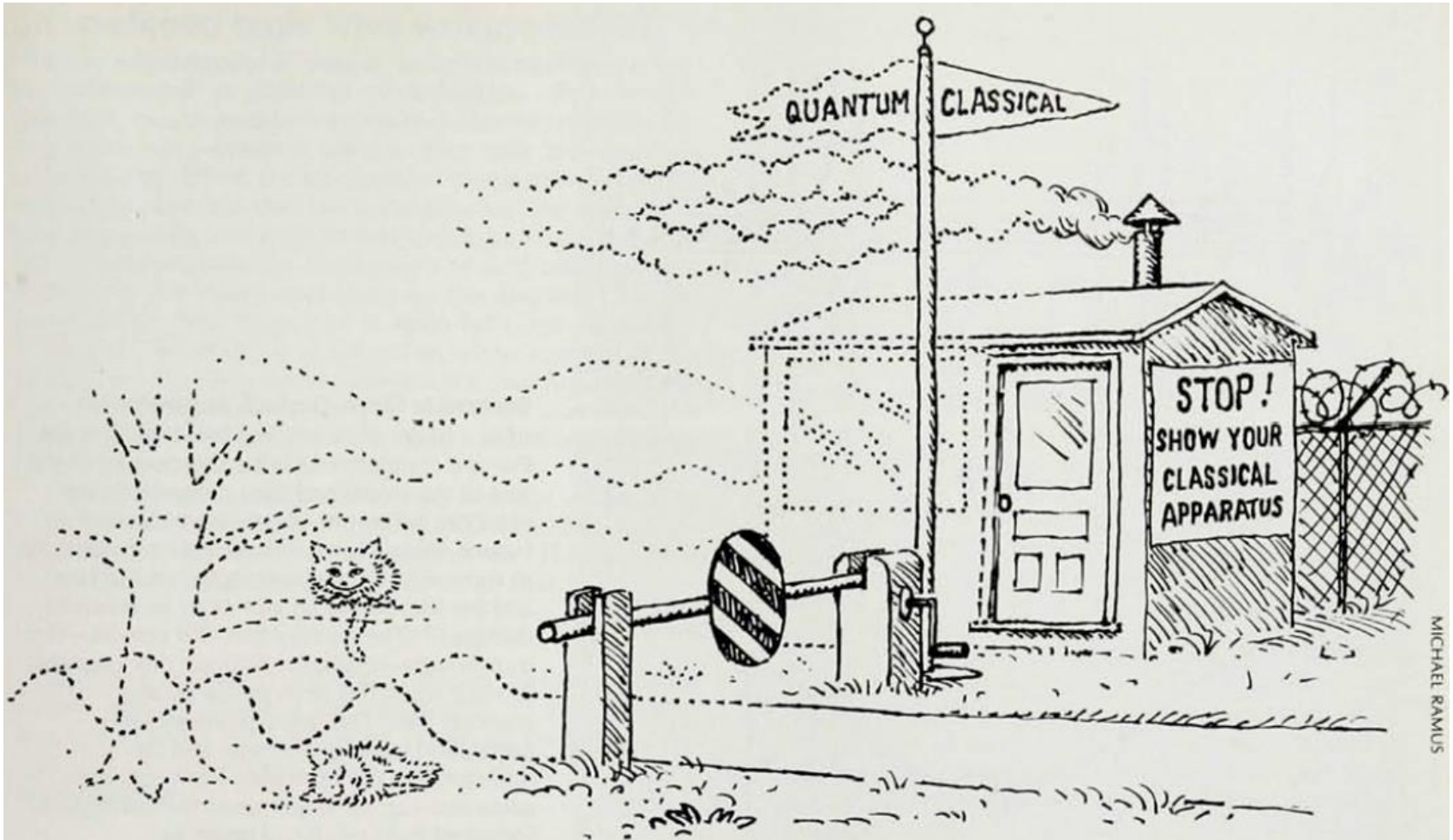
Quantenphänomene nutzbar machen?

Quanten-Welt



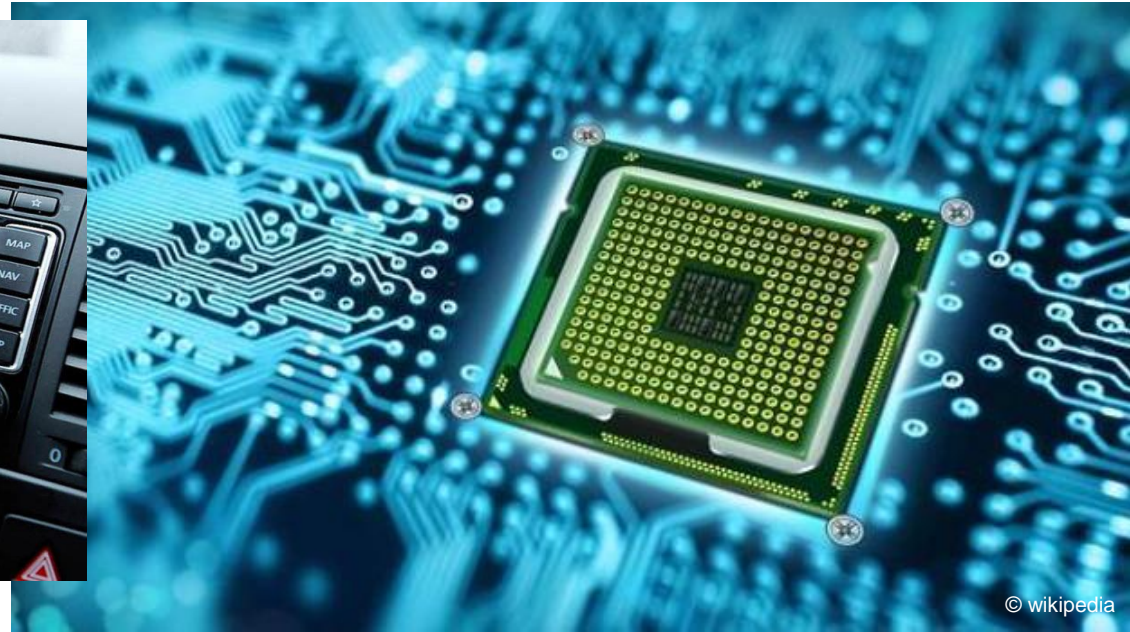
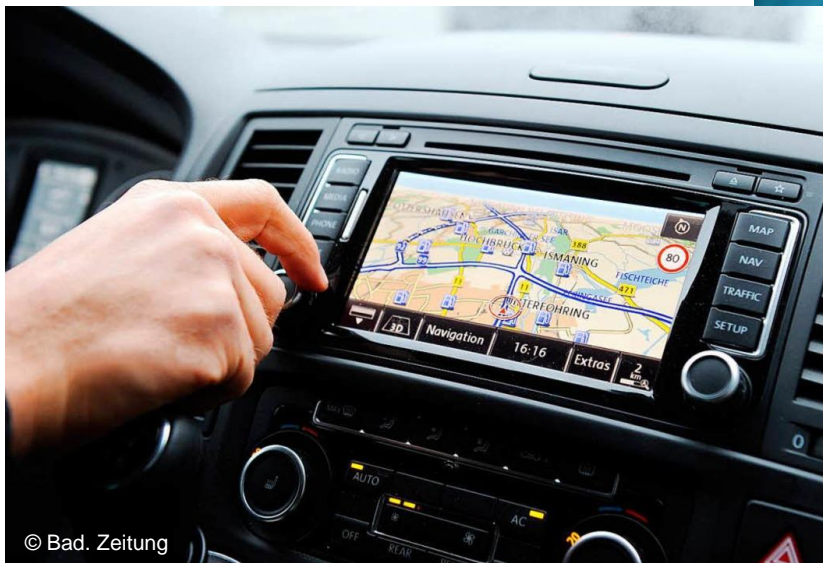
Klassische Welt

Dekohärenz



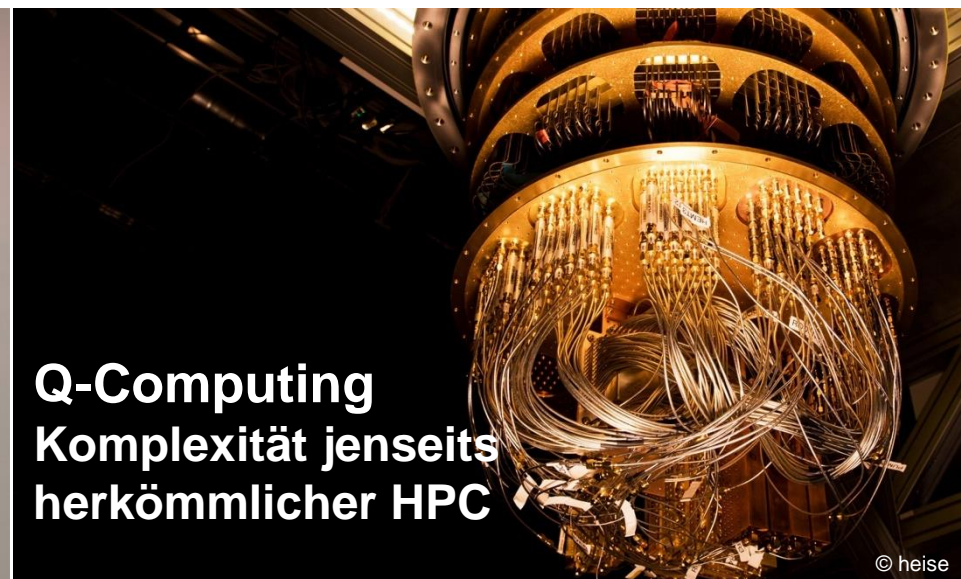
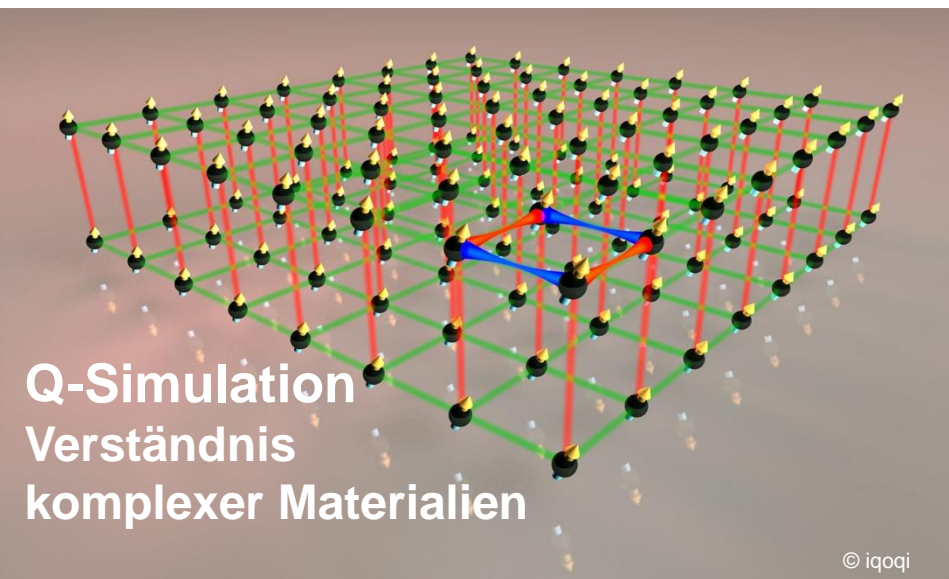
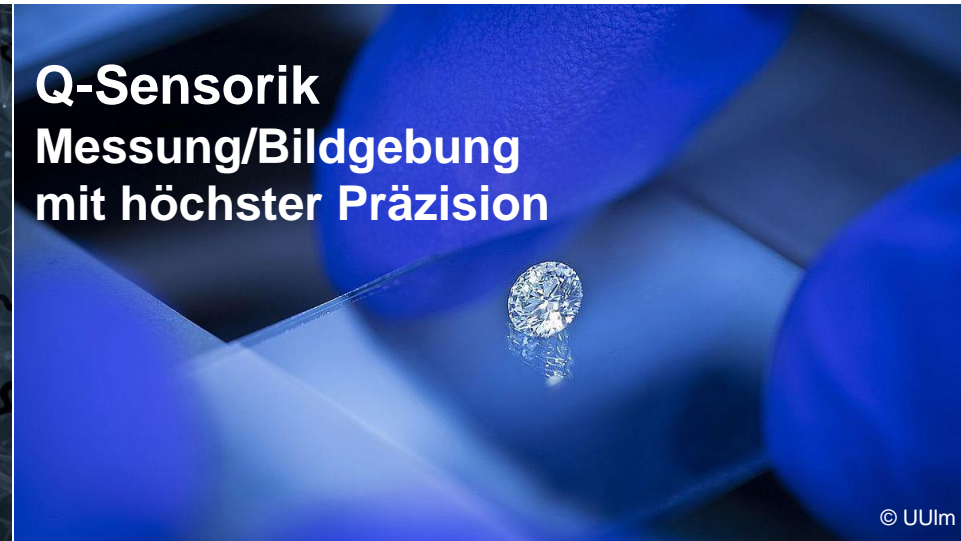
Quanten im 20. Jhd.

Quantisierung
Ununterscheidbarkeit



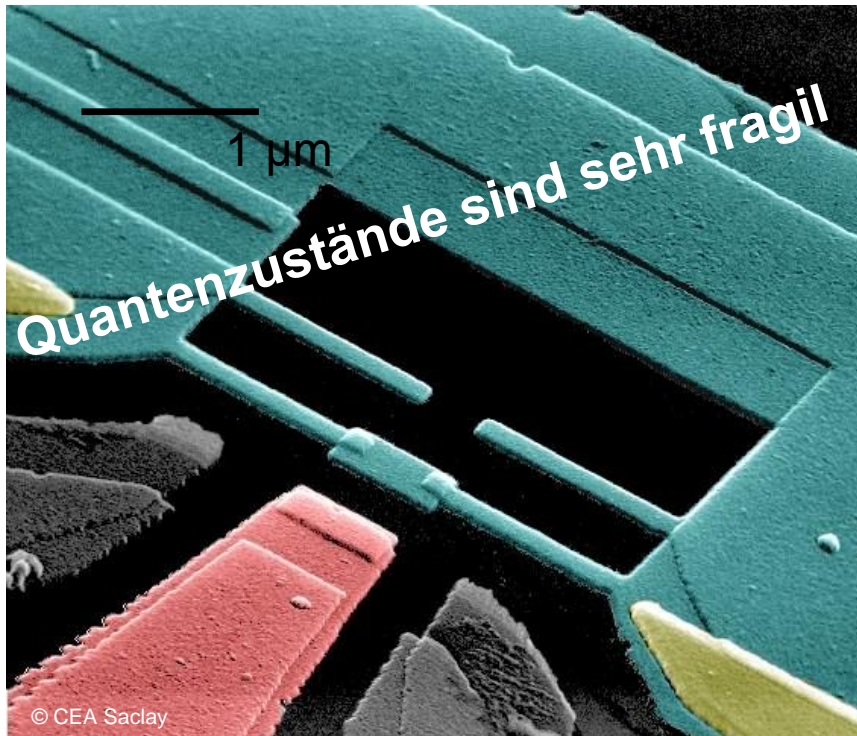
Quanten im 21. Jhd.

Superposition
Verschränkung



Quanten Computing/Simulation

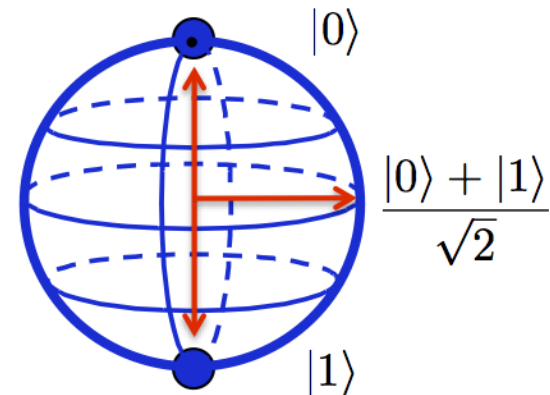
Informationsverarbeitung mittels Quanten-Bits (Qubits)



● 0

● 1

Klassisches Bit



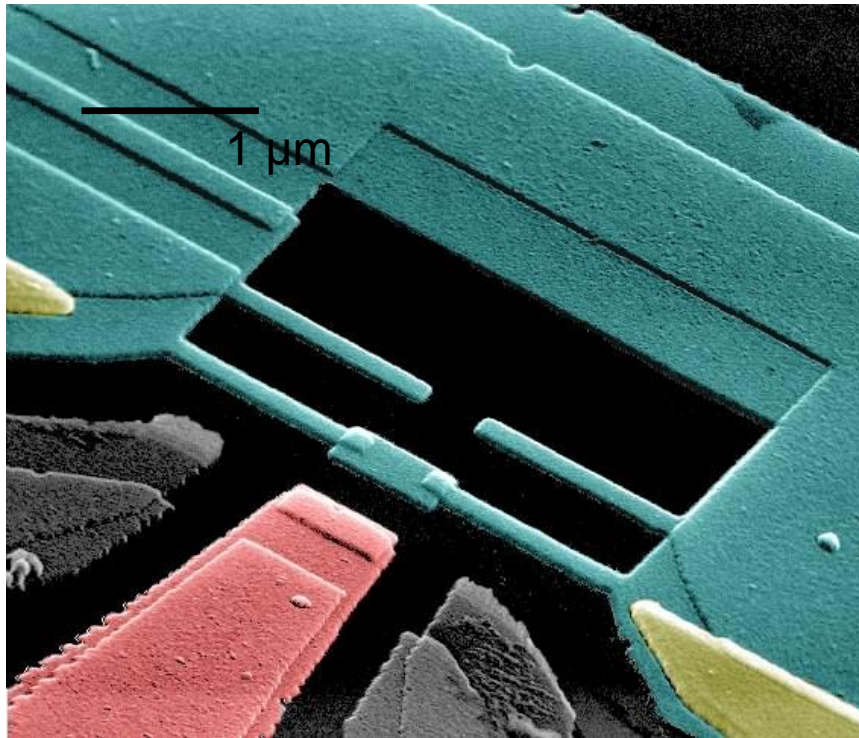
Qubit

CEA Saclay

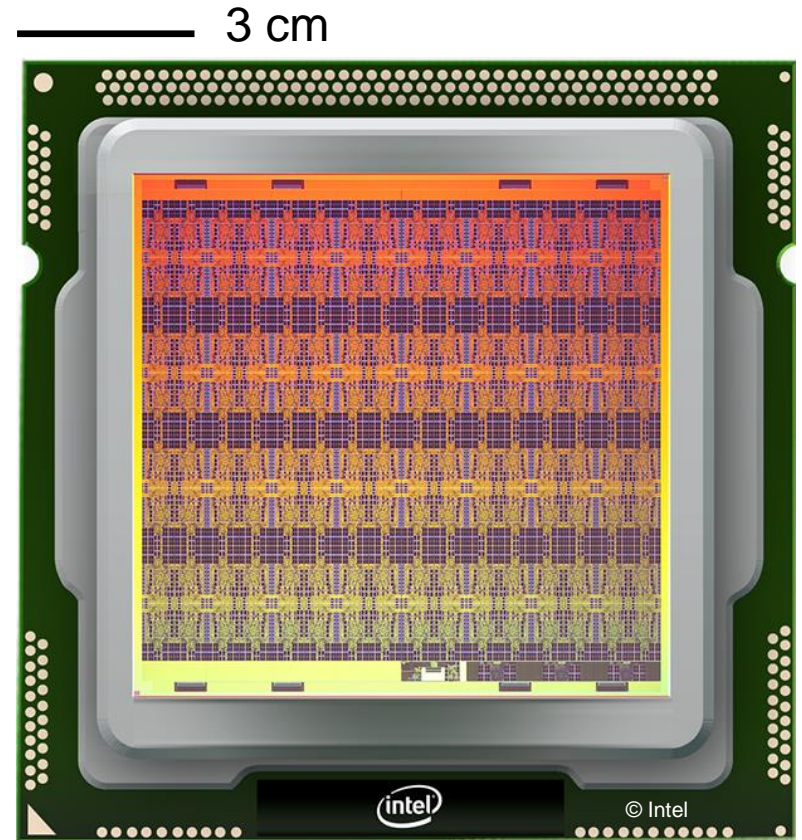
2002 Quantronium – 1 Qubit
(Superpositionen von „0“ und „1“)

Quanten Computing/Simulation

Informationsverarbeitung mittels Quanten-Bits (Qubits)



2002 Quantronium – 1 Qubit



2020 Intel – 49 Qubits - Verschränkung

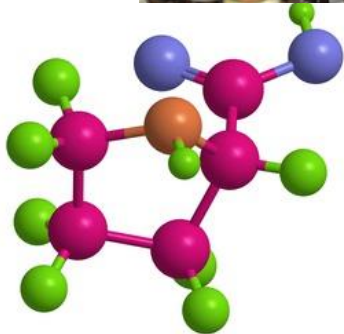
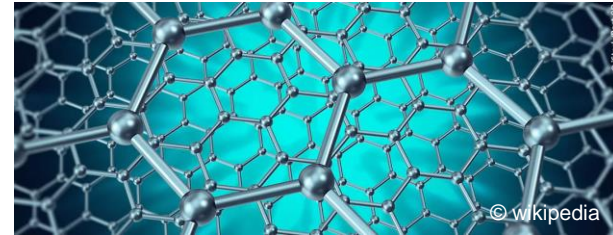
Quanten Computing/Simulation

Anwendungsfelder

Chemie, Pharmazie, Materialwissenschaften

Optimierung und Logistik

Analyse in und Informationen aus großen Datenmengen (QC+KI)



Quanten Computing/Simulation



IBM Ehningen

2021 IBM Q, Ehningen

Quanten-Sensorik

Quantensensoren verschieben die Grenzen des technologisch/physikalisch Möglichen



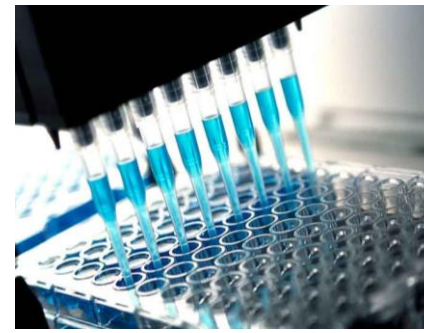
IOT & Lifestyle

Smart Health Sensoren



Mobilität

Sensoren für die Navigation



Gesundheit & Biomedizin

Sensoren mit hoher Spezifität

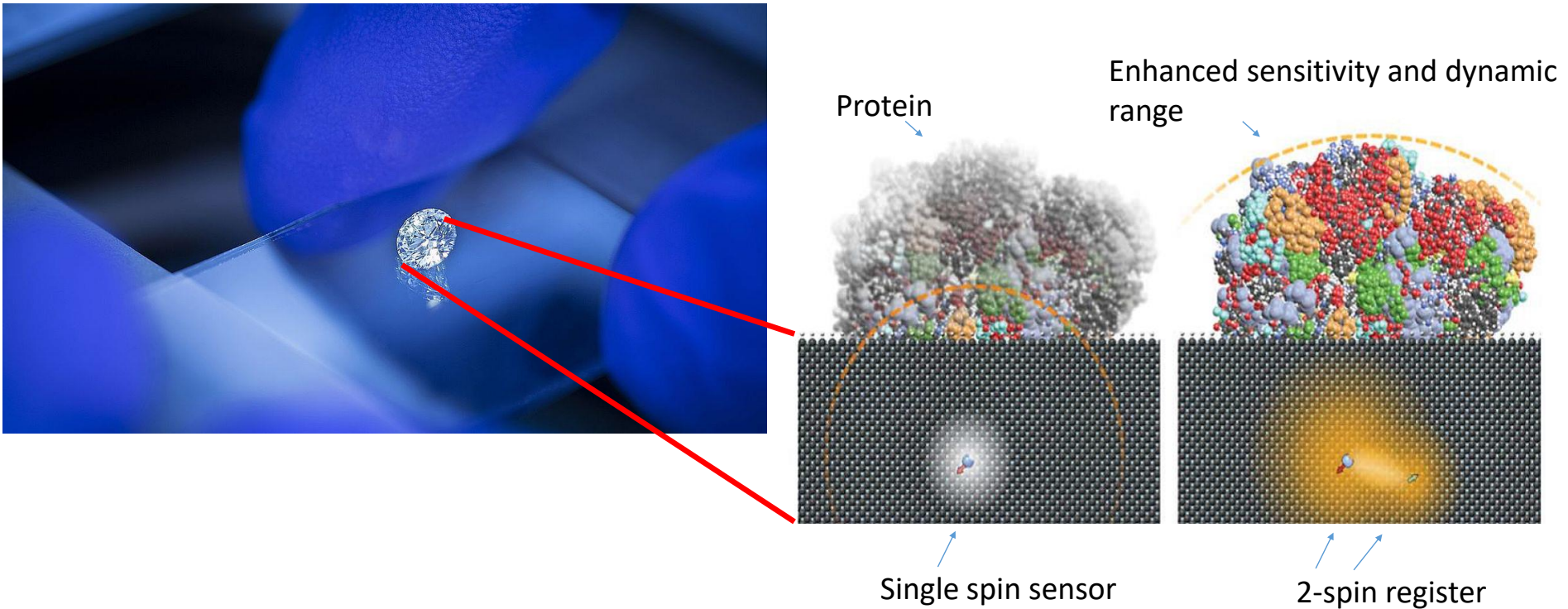


Nachhaltigkeit

Umweltsensoren

Quanten-Sensorik

Sensorik mit „gefangenen“ Atomen: Nano-Diamant



Inhalt

1. Teilchen und Wellen
2. Eindimensionale Potentialmodelle
3. Zwei-Zustandssystem
4. Prinzipien der Quantenmechanik
5. Eindimensionaler harmonischer Oszillator
6. Messwerte und Wahrscheinlichkeiten
7. Drehimpuls
8. Das Wasserstoffatom
9. Zeitunabhängige Störungstheorie

Bücher...

- Cohen-Tannoudji, de Gruyter, zwei Bände
- Schwabl, Quantenmechanik
- Grawert, Quantenmechanik
- Sakurai: Modern Quantum Mechanics
- Bronstein

Rahmenbedingungen

- Vier Seminare – kleine Gruppen!
- Eine Gruppe für Lehramt
Gruppeneinteilung: Moodle Freischaltung heute Abend/morgen früh
- Hausaufgaben: Bis zu zwei Personen, Ausgabe Freitagmittag, Abgabe Donnerstag der Folgewoche bis 18 Uhr
- Zulassung Klausur: 50% bei Einzelabgabe/Zweierabgabe
- Probeklausur um die Mitte des Semesters