

Quantensensorik

Einzug der Quantentechnologie
in die Messtechnik




Paul Seifert, 12.07.2023

Universität der Bundeswehr München

1

Quantensensorik

1. Quantentechnologie in der Messtechnik
2. Anwendungsbeispiele
3. Supraleitende Quantendetektoren

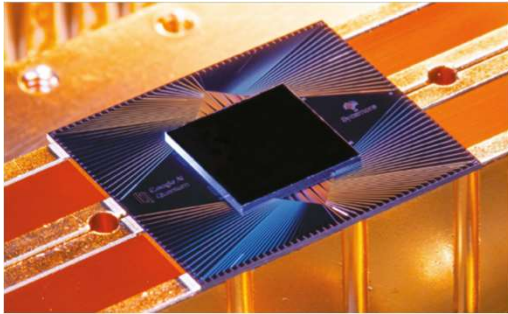


Paul Seifert, 12.07.2023

2

Quantenüberlegenheit

Überlegenheit von Quantencomputern gegenüber klassischen Computern bei der Lösung eines komplexen Problems



Google: 23. Oktober 2019

In der Quantentechnologie werden spezifische Eigenschaften der Quantenmechanik ausgenutzt

Computer nur ein Teilgebiet der Quantentechnologien

Quanten:

1. Rechnen (Computer)
2. Kommunikation (Kryptographie)
3. Simulation (Simulation komplexer Objekte und Prozesse)
4. Sensorik

Quantensensorik: Vielversprechende und bereits nutzbare Anwendung der Quantenmechanik

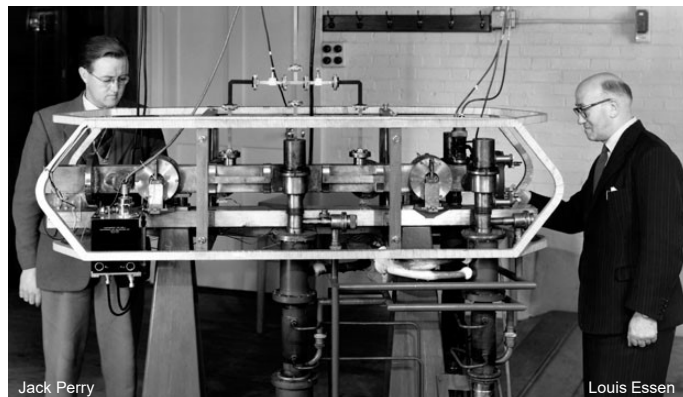
3

Der erste Quantensensor: Die Atomuhr



Riefler Präzisionspendeluhr

Abgelöst durch



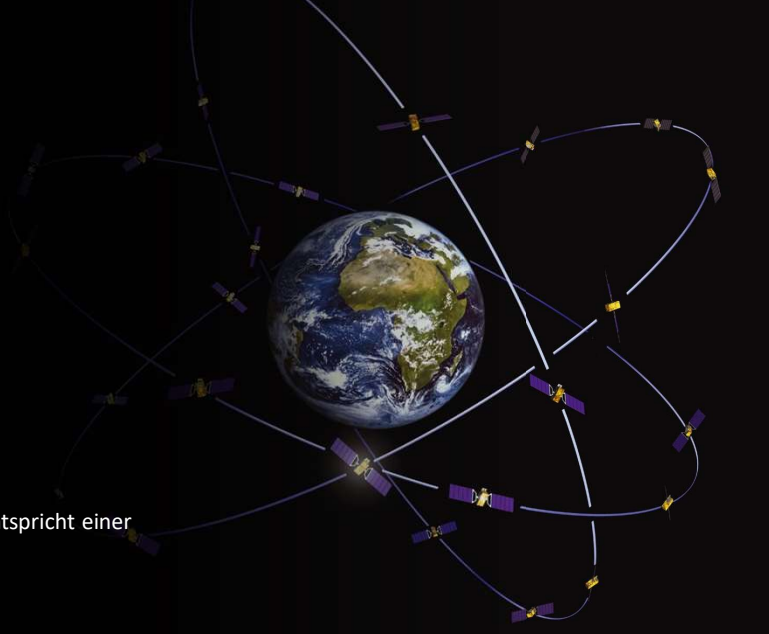
Jack Perry

Louis Essen

1955: erste Cäsium 133 Atomuhr

National Physical Laboratory

4



**Der erste Quantensensor:
Anwendung im GPS**


GPS Satelliten sind mit Cäsium-Atomuhren bestückt

Genauigkeit von einer Milliardstel Sekunde entspricht einer Ortsgenauigkeit von etwa einem Meter

Heute: Ungenauigkeit < 1 Sekunde pro Alter des Universums

www.esa.int









5



**Aktuelle Entwicklung:
Die Quantensensorik der zweiten Generation**

In welchen Anwendungen lassen sich aktuelle Sensortechnologien durch Eigenschaften der Quantenmechanik verbessern?

Anwendungsgebiete der Quantensensorik

 Bioimaging Neural sensing and heart imaging	 Spectroscopy Imaging of molecular structures such as proteins	 Communication Signal receiving and amplification for radar communication; calibrating electrical standards to support 5G/6G	 Navigation Providing high-accuracy GPS; assisting with navigation inside buildings and underground
 Environmental monitoring Predicting volcanic disruption and measuring CO ₂ emissions	 Infrastructure monitoring Monitoring mechanical stability and detecting leaks	 Geographical surveying Assisting with the location of oil and gas	 Fundamental science Accessing high-energy physics beyond the standard model

McKinsey & Company

Zeit, Beschleunigung, Rotation, Temperatur,
Licht, elektrische/magnetische Felder, Ströme...

<https://www.mckinsey.com/industries/advanced-electronics/our-insights/shaping-the-long-race-in-quantum-communication-and-quantum-sensing>

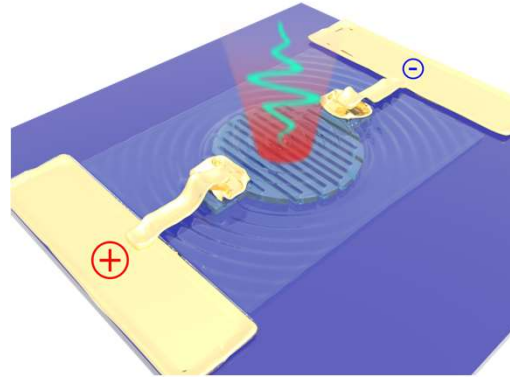
6

Was macht einen Sensor aus?

Messung ist die Grundlage der Wissenschaft an sich

Ein idealer Sensor:

- Sensitiv gegenüber der Eigenschaft, die gemessen werden soll
- Insensitiv gegenüber allen anderen Eigenschaften, die während der Messung auftreten können
- Darf die gemessene Eigenschaft nicht beeinflussen



7

Was macht einen Sensor aus?

Messung ist die Grundlage der Wissenschaft an sich

• Ein idealer Sensor:

Wo kommt die Quantenmechanik ins Spiel?

- Insensitiv gegenüber allen anderen Eigenschaften sein die während der Messung auftreten können
- Darf die gemessene Eigenschaft nicht beeinflussen

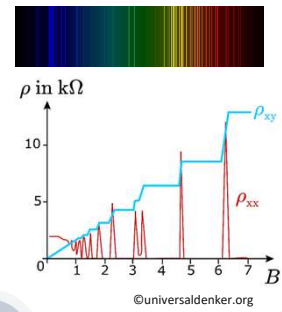
8

Quantenmechanik

Eigenschaften:

1 Quantisierung:

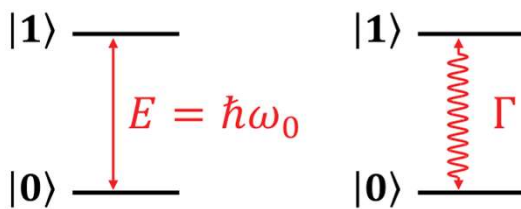
Ausnützen eines Quantenobjekt zur Messung einer physikalische Größe.
Das Quantenobjekt hat hierbei diskrete Energiezustände



9

Quantisierung

Ein Quantenobjekt hat quantisierte Messgrößen wie Frequenz, Energie, Drehimpuls...



Diese sind unveränderlich wie "Naturkonstanten" und somit eine ideale Referenz für andere Messgrößen.

Beispiel: Zeitmessung

*Alle Uhren bestehen aus zwei Komponenten:
Etwas, das periodisch ist, und etwas, das diesen periodischen Vorgang zählt.*

Der periodische Vorgang:

- Erddrehung bei Sonnenuhr.
- Pendel bei Pendeluhr.
- **"Schwingendes" Atom in Atomuhren.**

Rev. Mod. Phys. **89**, 035002 (2017)

10

Quantenmechanik

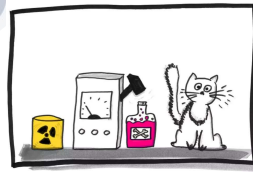
Eigenschaften:

1 Quantisierung:

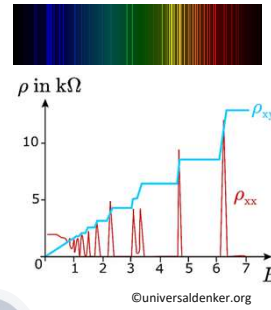
Ausnützen eines Quantenobjekt zur Messung einer physikalische Größe.
Das Quantenobjekt hat hierbei diskrete Energiezustände

2 Superposition:

Ausnützen örtlich oder zeitlich überlagerter Zustände zur Messung einer physikalische Größe



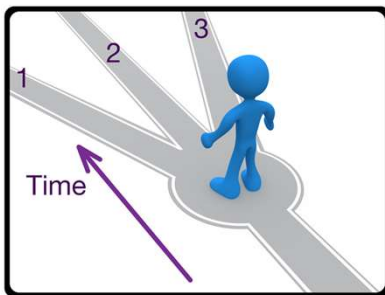
© Joachim Herz Stiftung Dr. Jenny Meßinger-Koppelt



©universaldenker.org

11

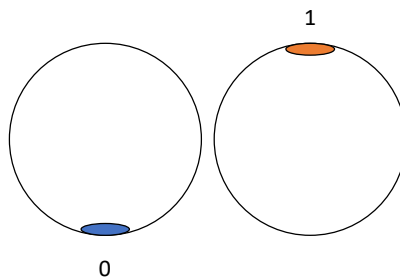
Superposition (kohärente Überlagerung)



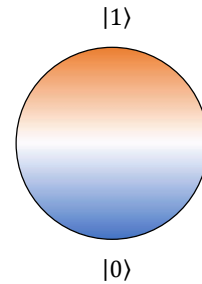
© Joachim Herz Stiftung Dr. Jenny Meßinger-Koppelt

Klassischer Zustand: Bit

Quantenmechanischer Zustand: Qubit



"0" oder "1"



$$a \cdot |0\rangle + b \cdot |1\rangle$$

Ein Quantenmechanischer Zustand ergibt sich aus der **Überlagerung** aller möglichen Zustände
Erst die Messung legt den Zustand auf einen der möglichen Zustände fest

Bild: <https://graphene.limited/developers/physics-of-triggering/modern-superposition>

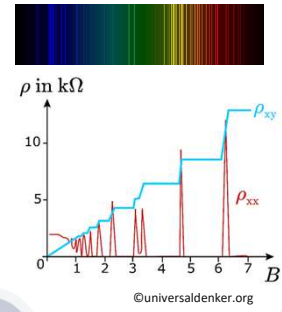
12

Quantenmechanik

Eigenschaften:

1 Quantisierung:

Ausnützen eines Quantenobjekt zur Messung einer physikalische Größe.
Das Quantenobjekt hat hierbei diskrete Energiezustände



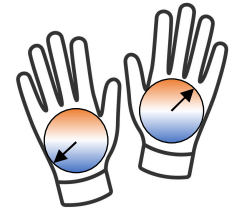
2 Superposition:

Ausnützen örtlich oder zeitlich überlagerter Zustände zur Messung einer physikalische Größe



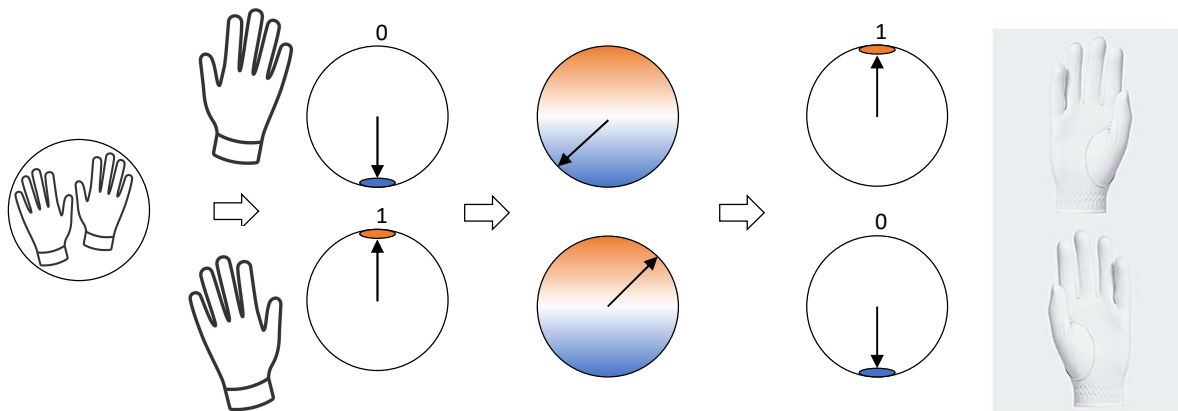
3 Quantenverschränkung:

Ausnützen von Verschränkung mehrerer Quantenobjekte zur Erhöhung der Sensitivität oder Präzision jenseits des klassisch möglichen.



13

Verschränkung



Paarweise Erzeugung von Quantenzuständen

Zustände bleiben aneinander gekoppelt: "verschränkt"

Durch messen eines Zustandes legen wir automatisch den zweiten Zustand fest

14

Experimentelle Implementierung:

- Neutrale Atome
- Ionenfallen
- Rydberg Atome
- Festkörper Spins
- Supraleitende Schaltkreise
- Elementarteilchen
- Optomechanische Resonatoren
- Photonen

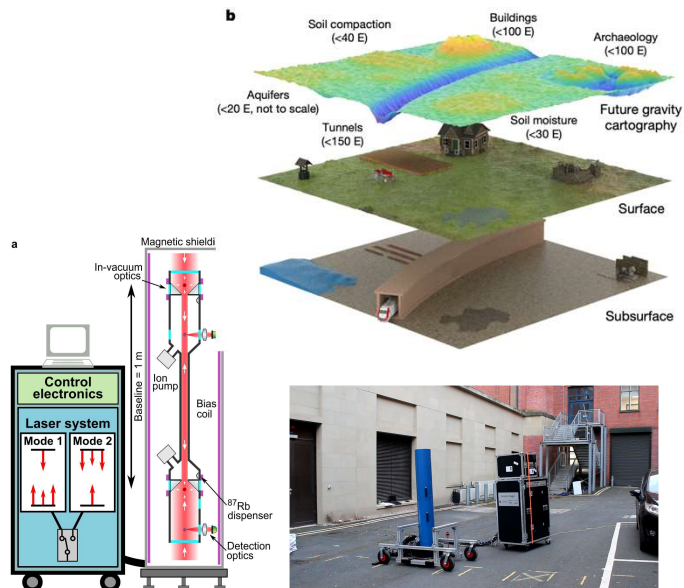
Implementation	Qubit(s)	Measured quantity(ies)	Typical frequency	Initialization	Readout	Type ^a
Neutral atoms						
Atomic vapor	Atomic spin	Magnetic field, Rotation, Time/Frequency	DC-10 GHz	Optical	Optical	II-III
Cold clouds	Atomic spin	Magnetic field, Acceleration, Time/Frequency	DC-10 GHz	Optical	Optical	II-III
Trapped ion(s)						
	Long-lived	Time/Frequency	THz	Optical	Optical	II-III
	electronic state	Rotation		Optical	Optical	II
	Vibrational mode	Electric field, Force	MHz	Optical	Optical	II
Rydberg atoms						
	Rydberg states	Electric field	DC, GHz	Optical	Optical	II-III
Solid state spins (ensembles)						
NMR sensors	Nuclear spins	Magnetic field	DC	Thermal	Pick-up coil	II
NV ⁰ center ensembles	Electron spins	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC-GHz	Optical	Optical	II
Solid state spins (single spins)						
P donor in Si	Electron spin	Magnetic field	DC-GHz	Thermal	Electrical	II
Semiconductor quantum dots	Electron spin	Magnetic field, Electric field	DC-GHz	Electrical, Optical	Electrical, Optical	I-II
Single NV ⁰ center	Electron spin	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC-GHz	Optical	Optical	II
Superconducting circuits						
SQUID ^c	Supercurrent	Magnetic field	DC-10 GHz	Thermal	Electrical	I-II
Flux qubit	Circulating currents	Magnetic field	DC-10 GHz	Thermal	Electrical	II
Charge qubit	Charge eigenstates	Electric field	DC-10 GHz	Thermal	Electrical	II
Elementary particles						
Muon	Muonic spin	Magnetic field	DC	Radioactive decay	Radioactive decay	II
Neutron	Nuclear spin	Magnetic field, Phonon density, Gravity	DC	Bragg scattering	Bragg scattering	II
Other sensors						
SET ^d	Charge eigenstates	Electric field	DC-100 MHz	Thermal	Electrical	I
Optomechanics	Phonons	Force, Acceleration, Mass, Magnetic field, Voltage	kHz-GHz	Thermal	Optical	I
Interferometer	Photons, (Atoms, Molecules)	Displacement, Refractive Index	-			II-III

Rev. Mod. Phys. **89**, 035002 (2017)

15

Quantengravimeter: Kartographie der Schwerkraft

- Messung kleinster Änderungen der Schwerkraft mittels einer Wolke einzelner Atome
- Sensitiv genug, um Tunnel, Keller Grundwasser, Bodenfeuchtigkeit etc. aufzuspüren



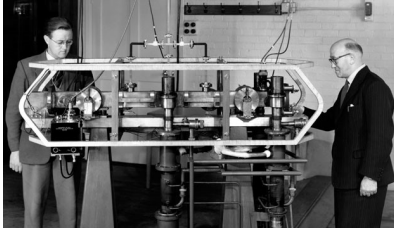
Stray, B. et al. *Nature* **602**, pages 590–594 (2022)

16


Quanten passive Navigation:

Quantensensorik gestützte Navigation ohne GPS

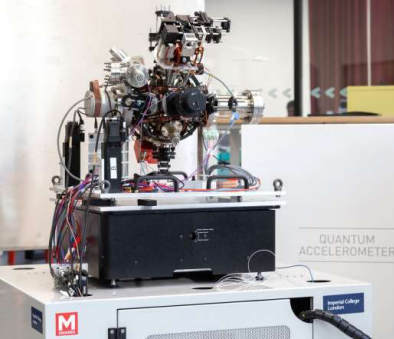
- 3D Atomgyroskop
- Quanten Beschleunigungssensor
- Atomuhr
- Modul zur Signalverarbeitung



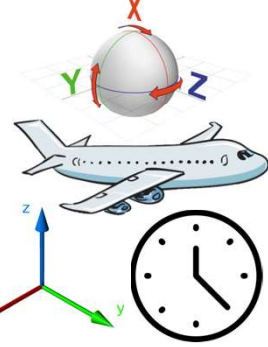
National Physical Laboratory



<https://navisp.esa.int/>



M Squared, Imperial college London



17

GEO600, LIGO, Virgo:

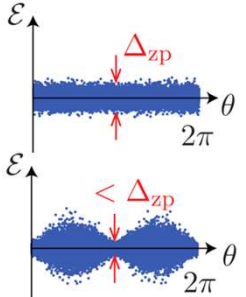

Nachweis von Gravitationswellen mit "gequetschtem" Licht

Heisenbergsche Unschärfe:

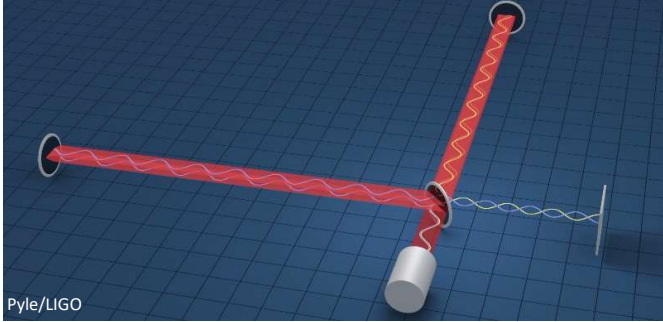
$$\Delta X \cdot \Delta Y \geq 1$$

$$\Delta X \Leftrightarrow \Delta Y$$

Messung von Längenveränderungen
10000 mal kleiner als ein Atomkern

Christian Offenberg / Alamy Stock Photo



Pyle/LIGO

PRL 123, 231107 (2019) American Journal of Physics 81, 767 (2013)

18

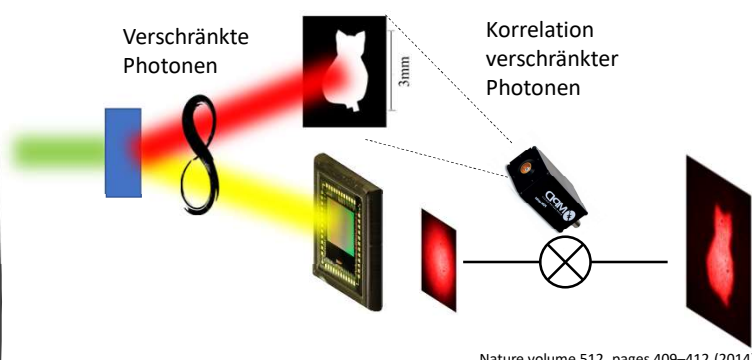
Quantenbildgebung:

Bildgebung mittels verschränkter Photonen, die ein Objekt gar nicht beleuchten

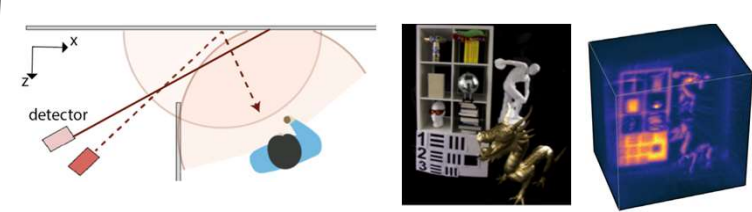
NLOS Bildgebung

Bildgebung mittels einzelner Photonen mit Zeitstempel und Bildrekonstruktion

Bild über Rekordentfernung von 1.43 km



Nature volume 512, pages 409–412 (2014)



PNAS 118 (10) e2024468118 (2021) Nature Reviews Physics volume 2, pages 318–327 (2020)

19

Quantenkryptographie:


Quantenschlüsselverteilung

Physikalisch sichere Punkt-zu-Punkt Kommunikation

Schlüssel für Kommunikation wird mittels einzelner Photonen übermittelt oder paarweise verschränkt generiert

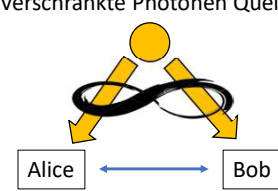
China: Satellitengestütztes Glasfaser-Netzwerk zur Quantenschlüsselverteilung über 4600 km

Klassischer Kanal

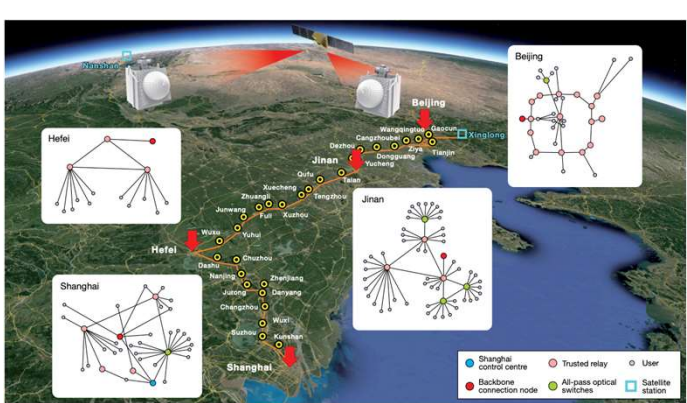


Einzelne Photonen

Verschränkte Photonen Quelle



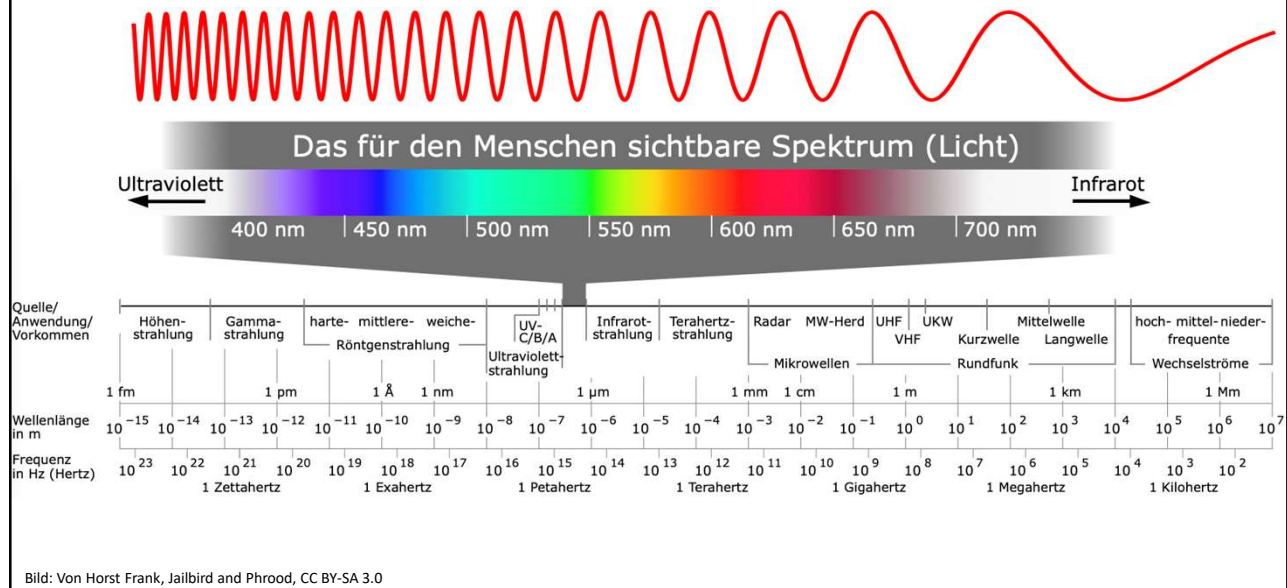
Klassischer Kanal



Chen. et al. Nature volume 589, pages 214–219 (2021)

20

Das elektromagnetische Spektrum



21

Das elektromagnetische Spektrum

Detektoreffizienz bei Telekomwellenlänge (1550nm):

- Konventionelle Photodiode: ~40%

Detektion bei langwelligem Infrarot (> 1mm):

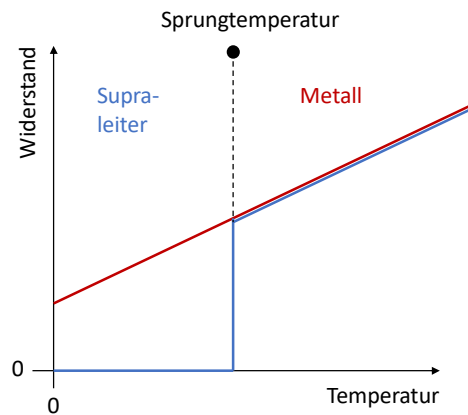
- Konventionelle Photodiode: Nicht möglich

22

Quantenzustand: Supraleitung

$|1\rangle$ 

$|0\rangle$ 



23

Quantenzustand: Supraleitung

Detektoreffizienz bei Telekomwellenlänge (1550nm):

- Konventionelle Photodiode: ~ 40%
- Supraleitende Detektoren: **98%**

Detektion bei langwelligem Infrarot (> 1mm):

- Konventionelle Photodiode: Nicht möglich
- Supraleitende Detektoren: ???

24

Quantenzustand: Supraleitung

Detektoreffizienz bei Telekomwellenlänge (1550nm):

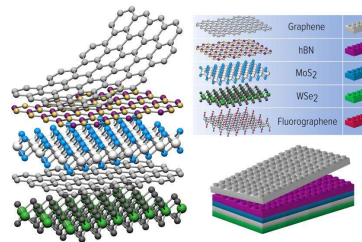
- Konventionelle Photodiode: ~ 40%
- Supraleitende Detektoren: **98%** **Aber T ~ 4K**

Detektion bei langwelligem Infrarot (> 1mm):

- Konventionelle Photodiode: Nicht möglich
- Supraleitende Detektoren: **Möglich**

25

Zweidimensionale Kristalle



graphene family	graphene	= Niedrigste Wärmekapazität		
2D chalcogenides	MoS ₂ , WS ₂ , MoSe ₂ , WSe ₂	semiconducting dichalcogenides: MoTe ₂ , WTe ₂ , ZrS ₂ , ZrSe ₂ , etc.	metallic dichalcogenides: NbSe ₂ , NbS ₂ , TaS ₂ , TaSe ₂ , NiGe ₂ , etc.	layered semiconductors: GaSe, GaTe, InSe, Bi ₂ Se ₃ , etc.
3D oxides	micas, BSCCO layered Cu oxides	MoO ₃ , WO ₃ , TaO ₅ , RuO ₄ , etc.	perovskite-type: BaTiO ₃ , SrTiO ₃ , etc.	hydroxides: Ni(OH) ₂ , Eu(OH) ₂ , etc. OTHERS

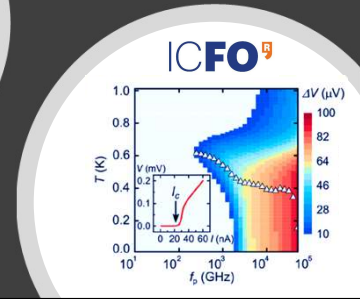
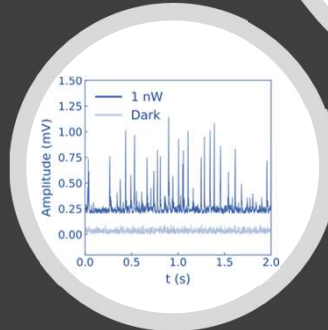
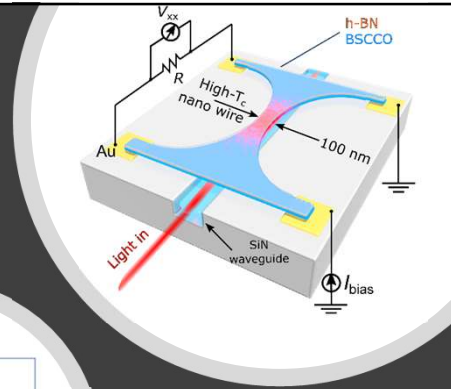
A. Geim, et. al. Nature 419, 412-413 (2013)

9

26

Infrarot Detektion mit Supraleitern

- Niedrigste messbare Leistung:
55 **Attowatt** / $\sqrt{\text{Hz}}$
- Bandbreite:
94 MHz
- **1 Attowatt ist ein trillionstel Watt**
100 aW = 10^{-16} W = Leistung einer 25 Watt Glühlampe aus der Distanz des Erdradius
- Messung einzelner Photonen (Lichtquanten) bei einer Temperatur von 20 K (Weltrekord*)
- Mit neuartigen Materialien:
Potenziell Messung einzelner Photonen bis Ferninfrarot und Mikrowellenbereich



Seifert, P. et al, 2D Materials, 8, 035053 (2021)
Luque, R., Seifert, P. et al. 2D Mater. 10 021001 (2023)
Seifert, P. et al, Nano Lett. 20, 5, 3459–3464 (2020)

27



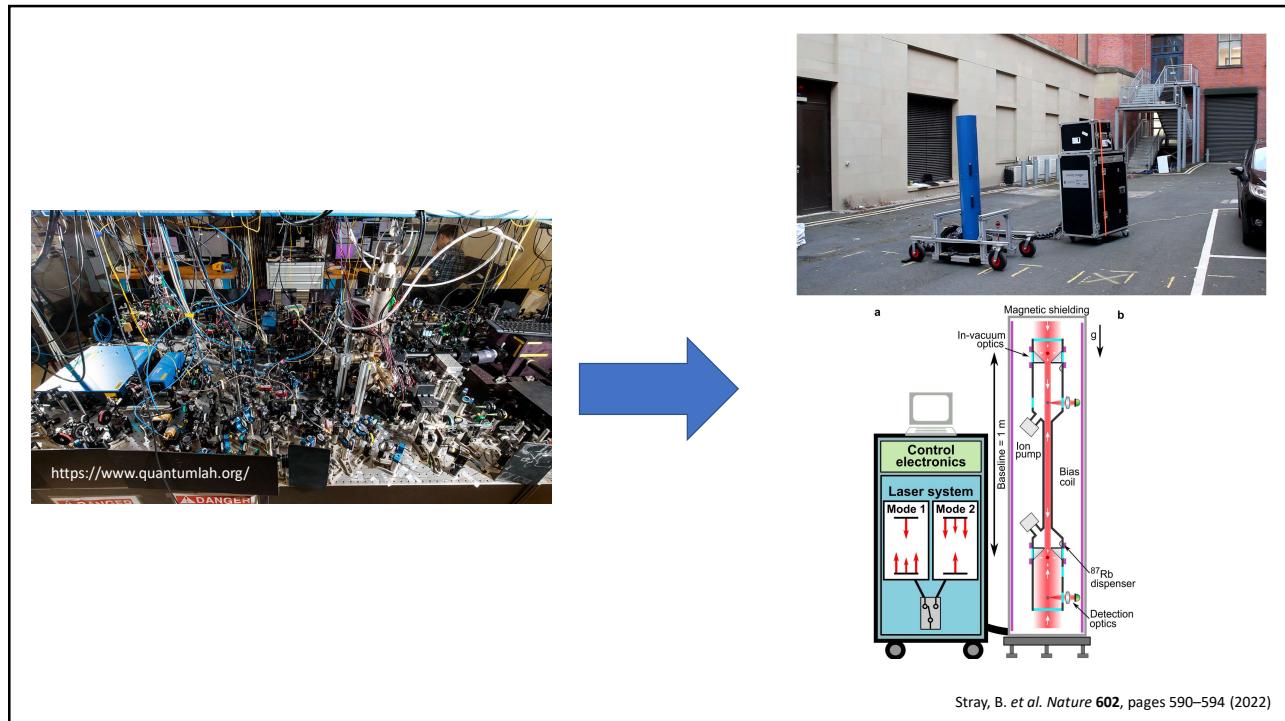
Aktuelle Entwicklung: Die Quantensensorik der zweiten Generation

In welchen Anwendungen lassen sich aktuelle Sensortechnologien durch Eigenschaften der Quantenmechanik verbessern?

Implementation	Qubit(s)	Measured quantity (ies)	Typical frequency	Initialization	Readout	Type*
Neutral atoms						
Atomic vapor	Atomic spin	Magnetic field, Rotation, Time/Frequency	DC–10 GHz	Optical	Optical	II–III
Cold clouds	Atomic spin	Magnetic field, Acceleration, Time/Frequency	DC–10 GHz	Optical	Optical	II–III
Trapped ion(s)						
	Long-lived electronic state	Time/Frequency	THz	Optical	Optical	II–III
	Rotation	Rotation		Optical	Optical	II
	Vibrational mode	Electric field, Force	MHz	Optical	Optical	II
Rydberg atoms						
	Rydberg states	Electric field	DC, GHz	Optical	Optical	II–III
Solid state spins (ensembles)						
NMR sensors	Nuclear spins	Magnetic field	DC	Thermal	Pick-up coil	II
NV ^b center ensembles	Electron spins	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC–GHz	Optical	Optical	II
Solid state spins (single spins)						
P donor in Si	Electron spin	Magnetic field	DC–GHz	Thermal	Electrical	II
Semiconductor quantum dots	Electron spin	Magnetic field, Electric field	DC–GHz	Electrical, Optical	Electrical, Optical	I–II
Single NV ^b center	Electron spin	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC–GHz	Optical	Optical	II
Superconducting circuits						
SQUID ^d	Supercurrent	Magnetic field	DC–10 GHz	Thermal	Electrical	I–II
Flux qubit	Circulating currents	Magnetic field	DC–10 GHz	Thermal	Electrical	II
Charge qubit	Charge eigenstates	Electric field	DC–10 GHz	Thermal	Electrical	II
Elementary particles						
Muon	Muonic spin	Magnetic field	DC	Radioactive decay	Radioactive decay	II
Neutron	Nuclear spin	Magnetic field, Phonon density, Gravity	DC	Bragg scattering	Bragg scattering	II
Other sensors						
SET ^d	Charge eigenstates	Electric field	DC–100 MHz	Thermal	Electrical	I
Optomechanics	Phonons	Force, Acceleration, Mass, Magnetic field, Voltage	kHz–GHz	Thermal	Optical	I
Interferometer	Photons, (Atoms, Molecules)	Displacement, Refractive Index	–	–	–	II–III

Rev. Mod. Phys. 89, 035002 (2017)

28



29

Quantensensorik

Einzug der Quantentechnologie
in die Messtechnik

Paul Seifert, 12.07.2023

ICFO  Universität  der Bundeswehr München

30