

QUANTENSENSORIK: DIE ZUKUNFT, DIE JETZT BEGINNT

Prof. Dr. Kai Bongs

DLR Institut für Quantentechnologien, Ulm



Wofür sind Sensoren gut?

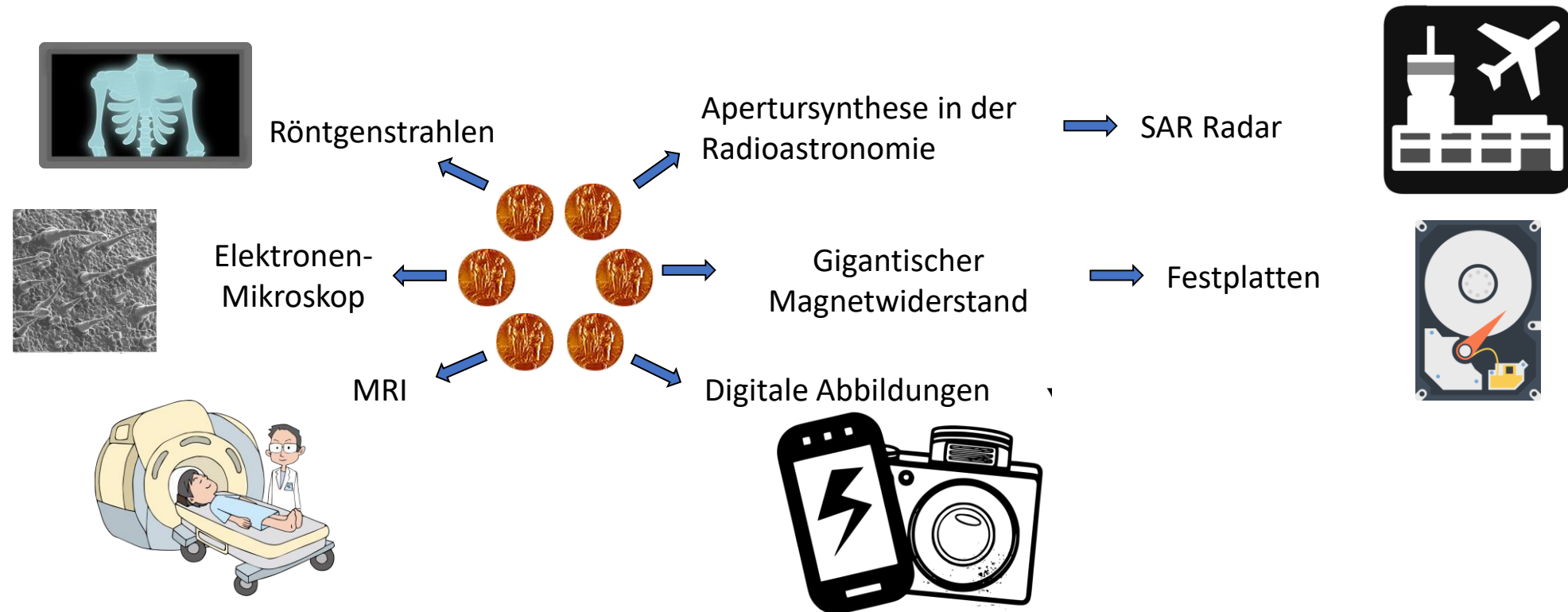
Wie wichtig sind Sensoren für unser Leben?

Wann haben Sie zum letzten Mal einen Sensor benutzt?

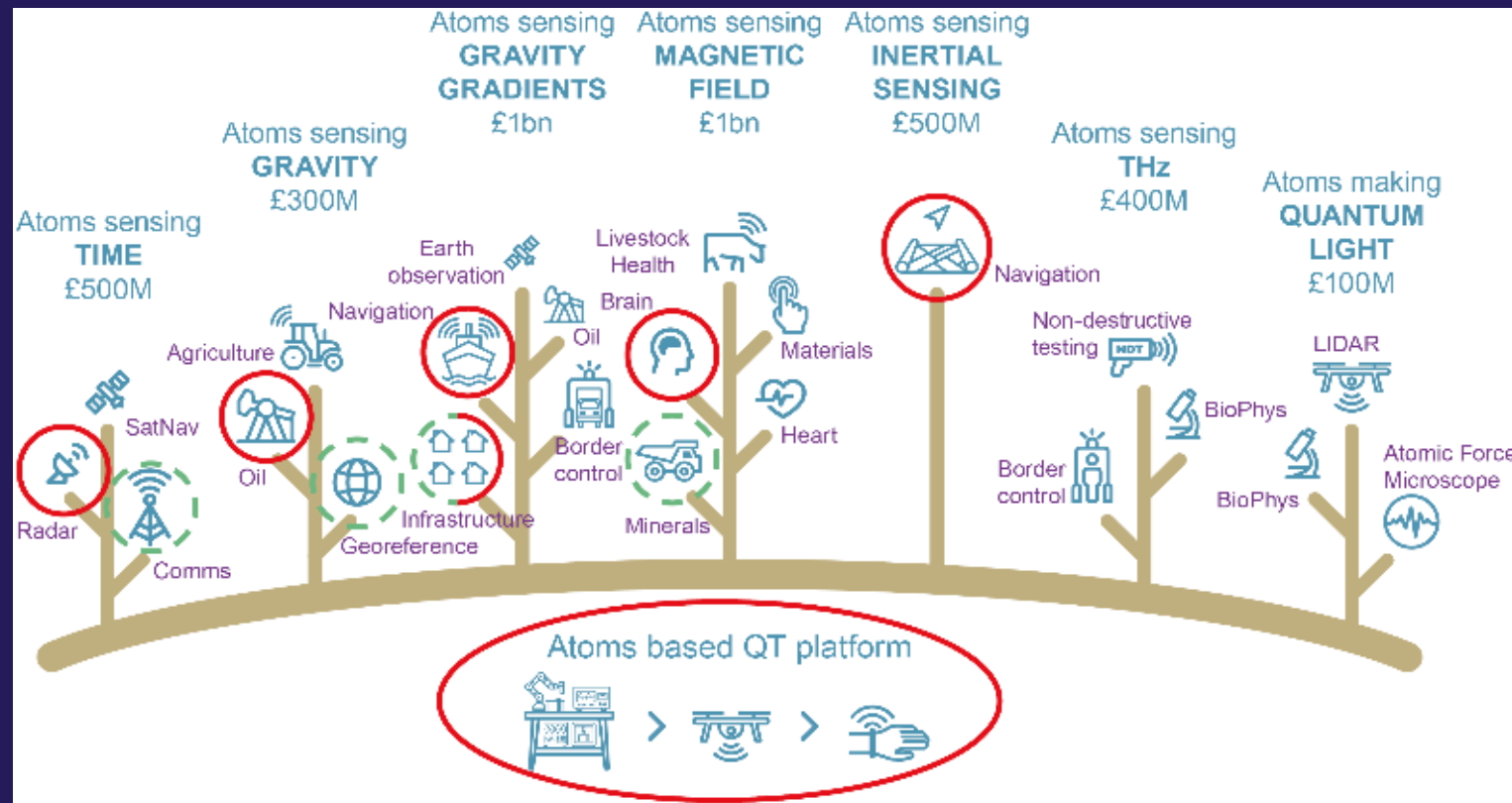
Disruptive Technologie durch Sensoren

Sensoren haben einen großen Einfluss auf unser Leben

- Historische Beispiele basierend auf Sensor-Nobelpreisen



Roadmap to Applications



For Atom Interferometry, see also: Nature Reviews Physics **1**, 731 (2019)

Quantentechnologie liegt in der Zukunft!?

Warum JETZT?

Quantensensoren und –Uhren sind schon da!



Quantenuhren
definieren unsere
Zeit seit 1967



Satellitenavigation



Quantenmagnetometer
sind seit Jahrzehnten
kommerziell erhältlich



Suche nach Mineralien



Magnetoencephelographie

Roadmap für Quanten-Magnetfeldsensoren

Relevanz für viele Anwendungen



Exploration



Quanten-
Magnetoencephalographie



Klinische
Diagnostik

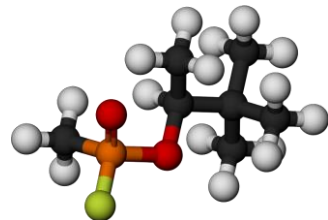


Gaming

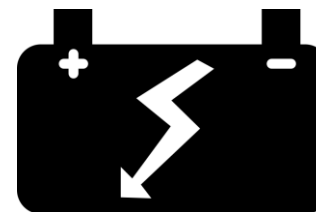
2020

2030

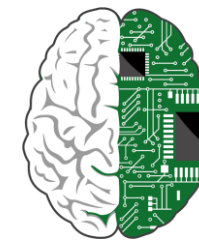
2040



Chemische Analyse



Batteriediagnostik



Gehirn-Maschine
Schnittstellen

Quantentechnologie – wie es begann

1900: Beschreibung der Strahlung heißer Objekte



Planck Postulat: Elektromagnetische Energie kann nur in quantisierter Form emittiert werden.

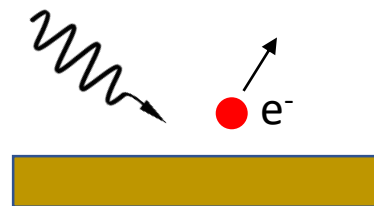
$$E = h \nu$$

Quantentechnologie – wie es begann

1900: Beschreibung der Strahlung heißer Objekte



Albert Einstein's Erklärung
des photoelektrischen
Effekts mit der
„Lichtquantenhypothese“



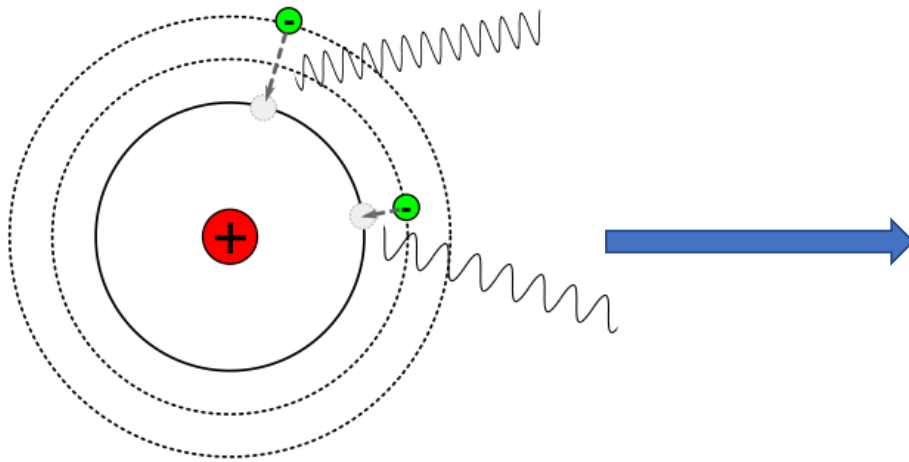
→ Nobelpreis 1921

Planck Postulat: Elektromagnetische Energie kann nur in quantisierter Form emittiert werden.

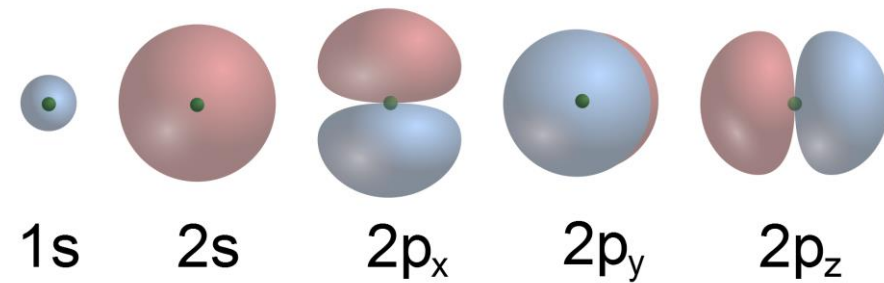
$$E = h \nu$$

Quantenwellen

1920-30: Welle-Teilchen-Dualität als zentrales Konzept in der Quantenmechanik



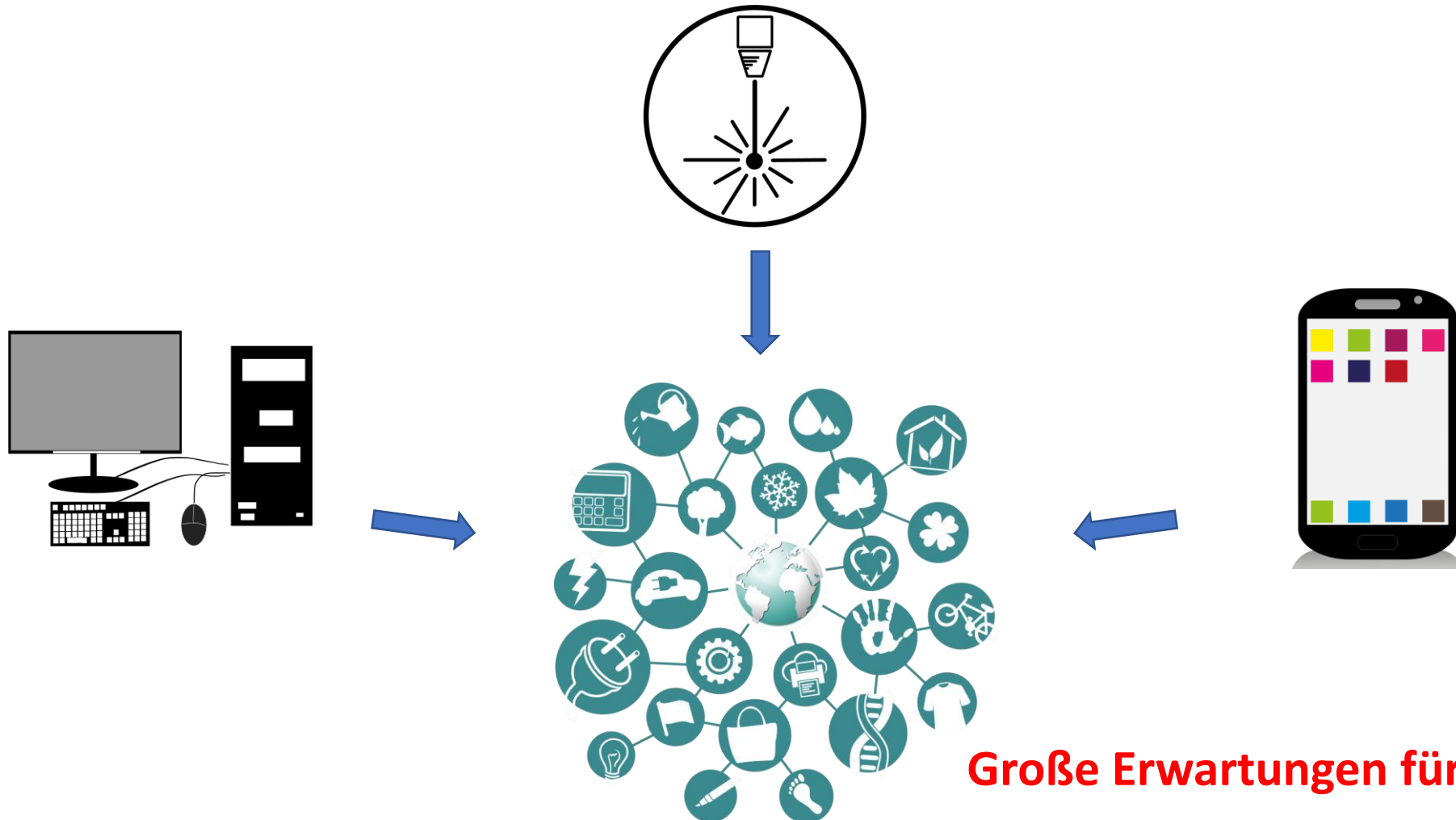
Bohr's Atommodell



By This file was made by User:Sven
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>), CC BY-SA 2.5-2.0-1.0

Quantum 1.0

Technologie basierend auf dem quantenmechanischen Verständnis von Festkörpern

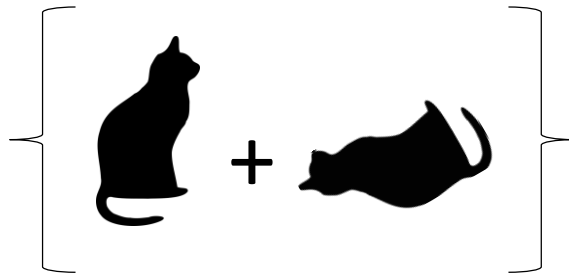


Große Erwartungen für Quantum 2.0

Quantum 2.0

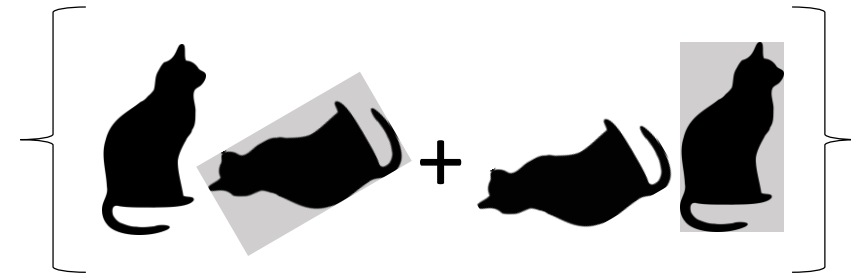
Superposition und Verschränkung

Superposition



Teilchen gleichzeitig in mehreren Zuständen
→ Schrödinger's Katze

Verschränkung

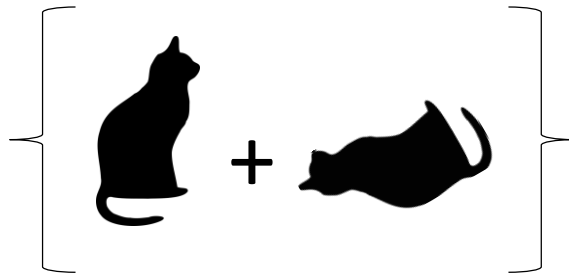


„Verschränkung über mehrere Teilchen hinweg“

Quantum 2.0

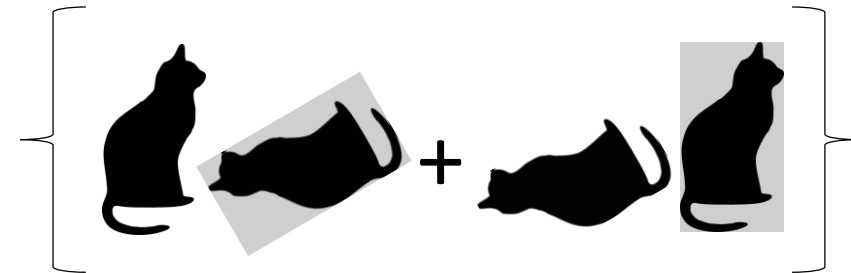
Superposition und Verschränkung

Superposition

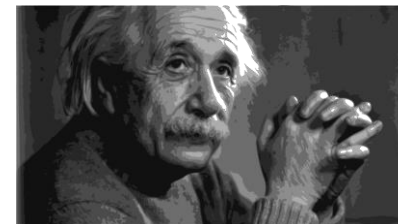


Teilchen gleichzeitig in mehreren Zuständen
→ Schrödinger's Katze

Verschränkung



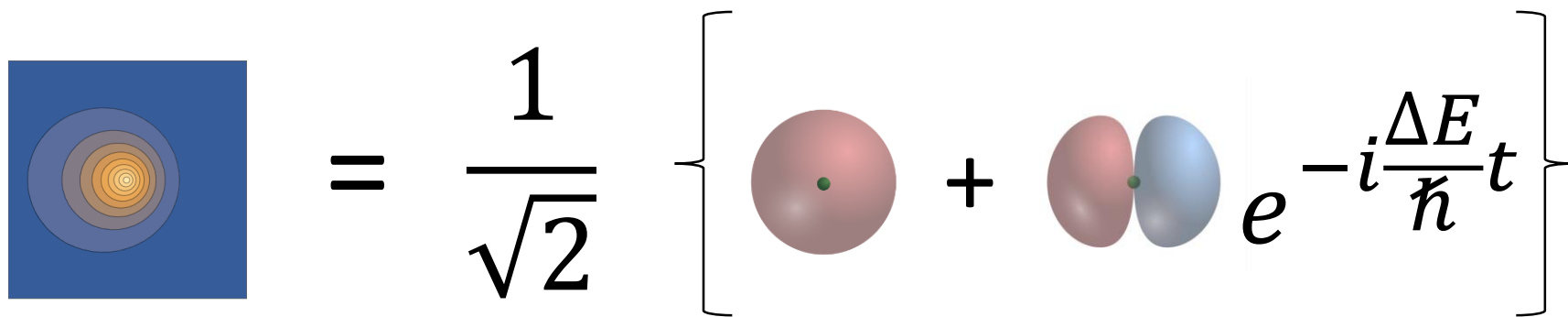
„Verschränkung über mehrere Teilchen hinweg“



„Gott würfelt nicht“

Beispiel: Superposition in einem Atom

„Schwingende Elektronenwolke“

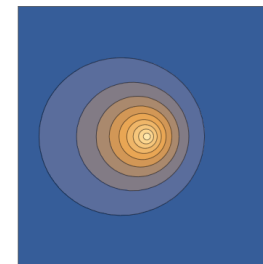
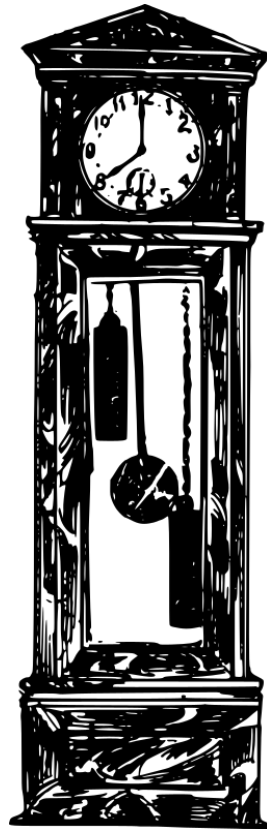


$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \text{red sphere} + \text{red and blue lobes} e^{-i\frac{\Delta E}{\hbar}t} \right\}$$

Abgewandelt von:
 By This file was made by User:Sven
 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>), CC BY-SA 2.5-2.0-1.0

Wie funktionieren Quantenuhren?

Eine Quantenuhr ersetzt den Oszillator (z.B. Pendel) einer Uhr mit einem Atom



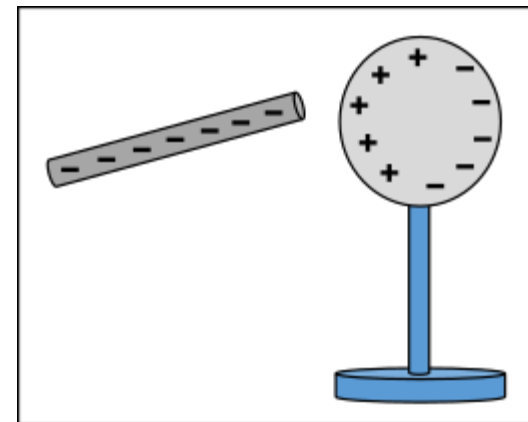
Reproduzierbar und präzise durch Naturgesetze

Wie bringt man ein Atom zum Schwingen?

„Schubsen“ mit elektrischen Feldern



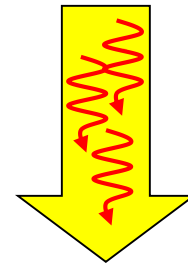
„Anschubsen“ eines klassischen Pendels



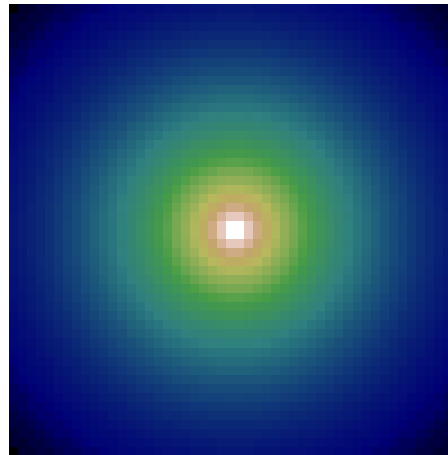
Induzierter elektrischer Dipol

Wie bringt man ein Atom zum Schwingen?

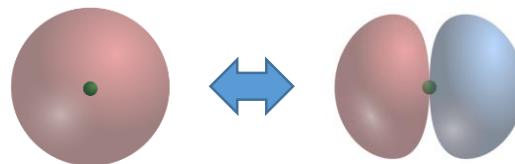
Licht-Atom-Wechselwirkung



Licht = oszillierendes elektrisches Feld
→ Periodisches „Anschubsen“



Atom = „elektrisches Pendel“

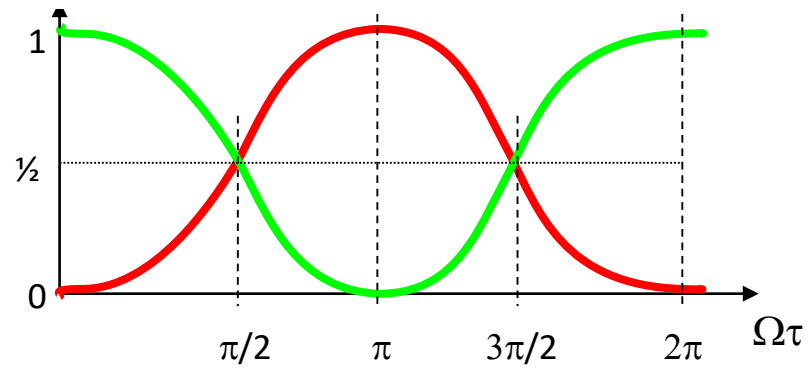


Quanteninterpretation:
Kopplung elektronischer Eigenzustände

Anregung mit Lichtblitzen

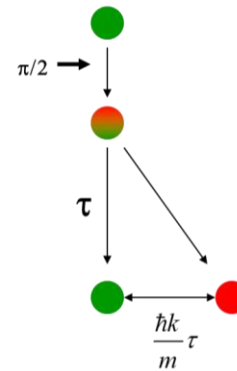
Superposition der Energie- und Impulszustände

Wahrscheinlichkeit das Teilchen im **Grundzustand** oder im **angeregten Zustand** zu finden

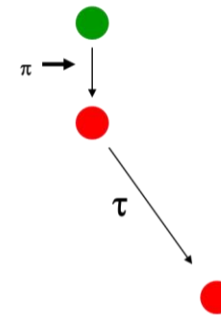


Einstrahldauer des Laserlichts

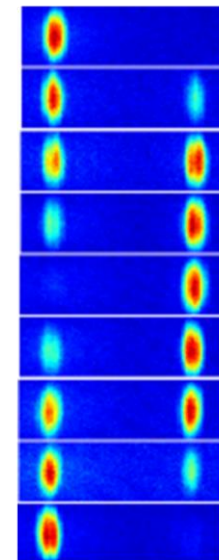
Strahlteiler



Spiegel



Rabi-Oszillation

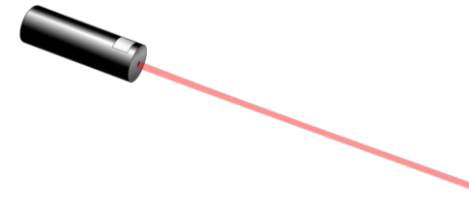
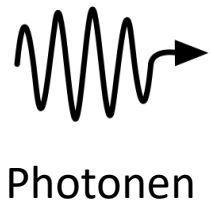
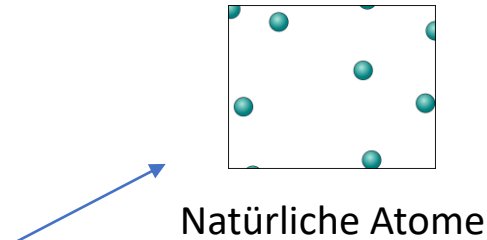
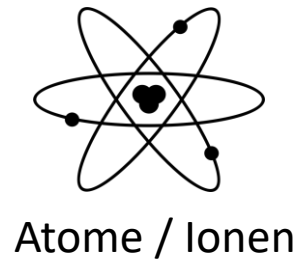


Zutaten für die Quantentechnologie

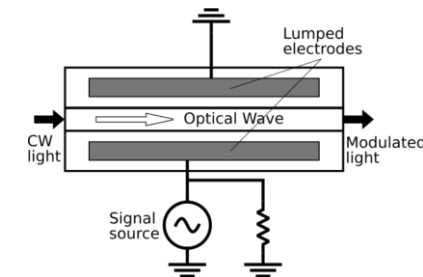
Quantenteilchen

+

Kontrolle



Laser- oder RF Pulse



Nichtlineare Kristalle
Photonische Systeme

Elektronik
Software
Abschirmung
Verpackung
Nutzerschnittstelle
...

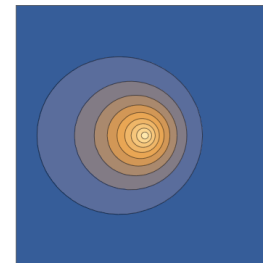
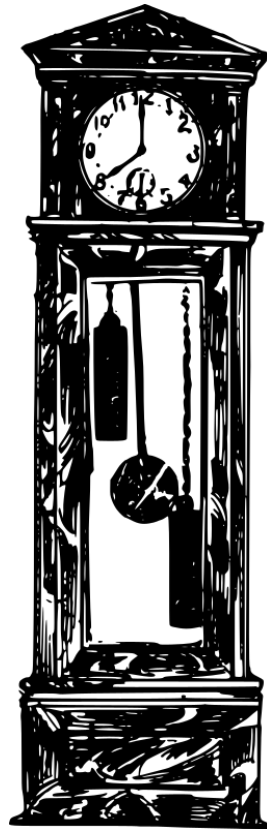
Beispiele für Quantentechnologien



Fokus: Sensoren und Uhren

Wie funktionieren Quantenuhren?

Eine Quantenuhr ersetzt den Oszillator (z.B. Pendel) einer Uhr mit einem Atom



Reproduzierbar und präzise durch Naturgesetze

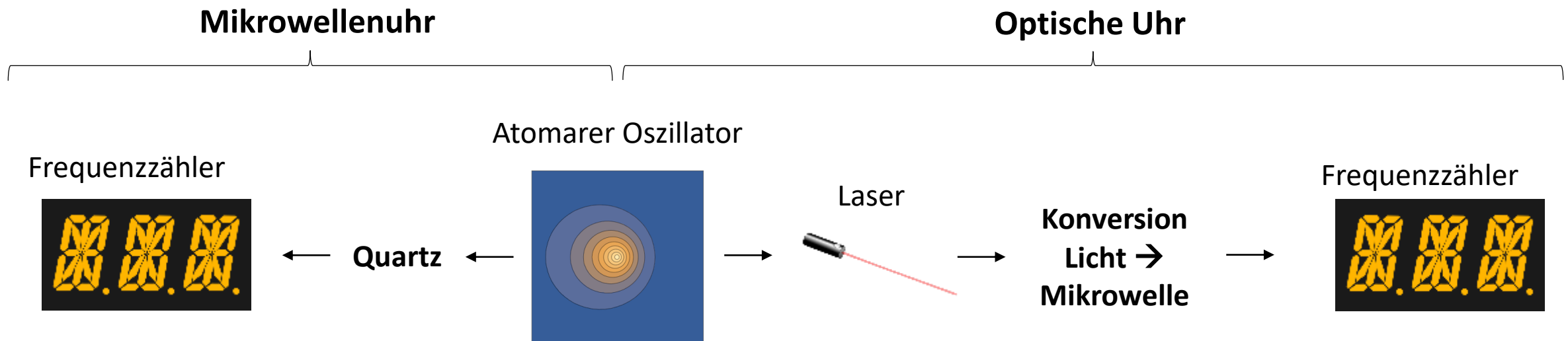
Wo bekommen Sie Ihre Zeit her?

Uhren und Synchronisation

- Ist die Zeit „einfach da“, so wie Strom aus der Steckdose kommt?

Mikrowellenuhren (alt) und Optische Uhren (neu)

Optische Quanten-Uhren erlauben 100.000-fach höhere Präzision und schnellere Synchronisation



Atomarer Mikrowellenübergang stabilisiert einen Quarzoszillator

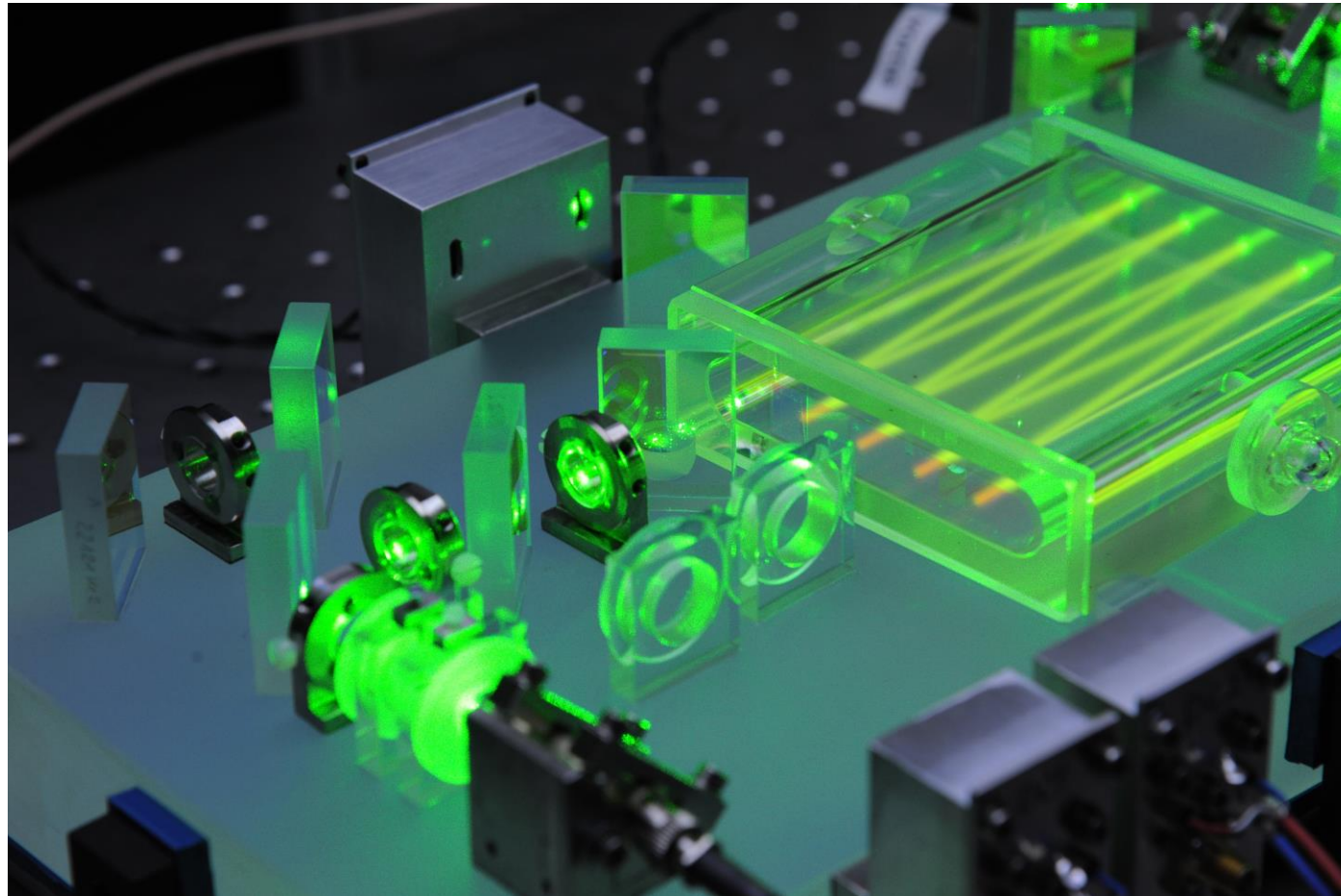
Optischer atomarer Übergang stabilisiert einen Laser

→ Derzeitige Definition der Zeit

**Disruptiv: 100x bessere Synchronisation als Zeit von GNSS
niedrigeres Phasenrauschen als Quarz-Oszillatoren**

So sieht es in der Praxis aus

DLR JodUhr



Uhr des DLR QT in Ulm: Weltweit Führend

ISBN 978-92-76-48726-5

ISSN 1831-9424

doi:10.2760/525422

Summarizing table on status of chip-scale atom clocks with primary frequency standard performances



JRC TECHNICAL REPORT

Next-Generation Chip Scale Atomic Clocks

Physics	Species	Transition	Size	Stability	Maturity	Players	Notes
Laser-cooled atoms Double resonance	Rb Cs	Microwave	250cm ³ Phys. Pack. 2.2W (not all components)	10 ⁻¹²	High (abandoned)	Draper & Simmetricom & Microsemi	MCAFS design (Miniature Cold Atom Frequency Standard) have reached a dead-end around 2014. It never could meet the requirements on long-term stability.
Laser-cooled atoms Coherent population trapping	Rb	Microwave	Laboratory table	10 ⁻¹¹ to 10 ⁻¹³	Low	NIST & ColdQuanta	Efforts are flourishing in several groups worldwide. Still low-TRL systems, affected by many technical issues: promising physics, but no guarantee the desired specs can be reached in a miniaturized system.
Thermal trapped ions Doppler narrowing by buffer gas	Yb+	Microwave	0.8cm ³ Vacuum package	10 ⁻¹² to 10 ⁻¹³	Relatively high	Sandia & JPL	Advanced prototype stage, with performance level in line with desiderata. However, full miniaturization and integration require costly high-tech, and further progress in enabling components.
Thermal trapped ions Doppler narrowing by buffer gas	Hg+	Microwave	15cm ³ Vacuum package	10 ⁻¹³ to 10 ⁻¹⁴	Relatively high	JPL China	JPL is miniaturizing its DSAC, which has demonstrated very good long-term performances also in space. The Wuhan Institute of Physics and Mathematics has developed a 16.4L space prototype, and is working for miniaturization. ESA has commissioned a study to Orolia and OHB.
Thermal vapour Modulation Transfer Spectroscopy	Rb I ₂	Optical	30X50cm (only optics, no frequency comb)	10 ⁻¹⁴ to 10 ⁻¹⁵	Medium (tabletop)	China Germany	Table-top implementations with commercial components and good performances. DLR has tested a 33L I ₂ -based MTS system (without comb) in a rocket, ESA is considering it for G2G.
Thermal vapour Two Photon Transition	Rb	Optical	30L → 10L	10 ⁻¹⁴ to 10 ⁻¹⁵	Medium (tabletop)	AFRL	Optical Rb-TPT has been implemented with COTS components. The final target is 10L (attainable in 3-5 years).
Thermal vapour Two Photon Transition	Rb	Optical	35cm ³ Phys. Pack. 420mW (no freq. comb)	10 ⁻¹³	Low	NIST & Draper	Microfabricated frequency combs enabled a partially integrated chip-scale system. A full miniature system needs development and integration of several component (timescale 5-10 years).

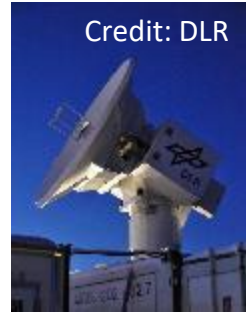
DARPA ACES target (2016-ongoing): 3·10⁻¹⁴ stability floor, 50cm³, 250mW

Anwendungen Quantenuhren

Systemlösungen für Zukunftstechnologien



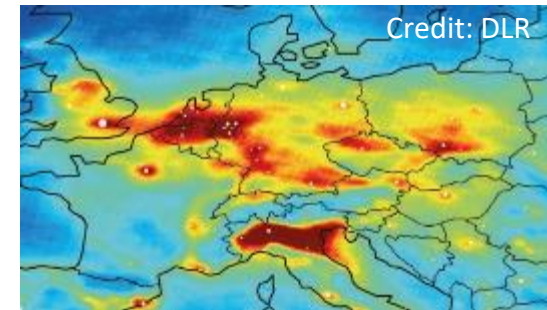
Satelliten-Navigation



3d Radar



Urbane Flüge

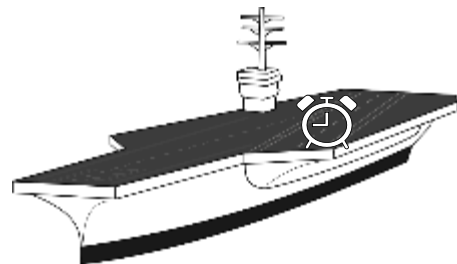


Globale Höhenreferenz

2030

2040

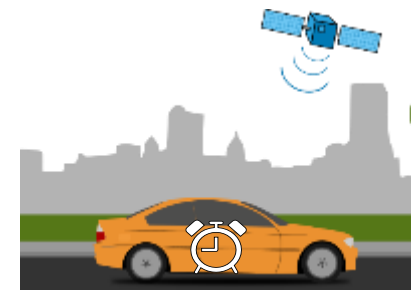
2050



Hoheitliche Navigation



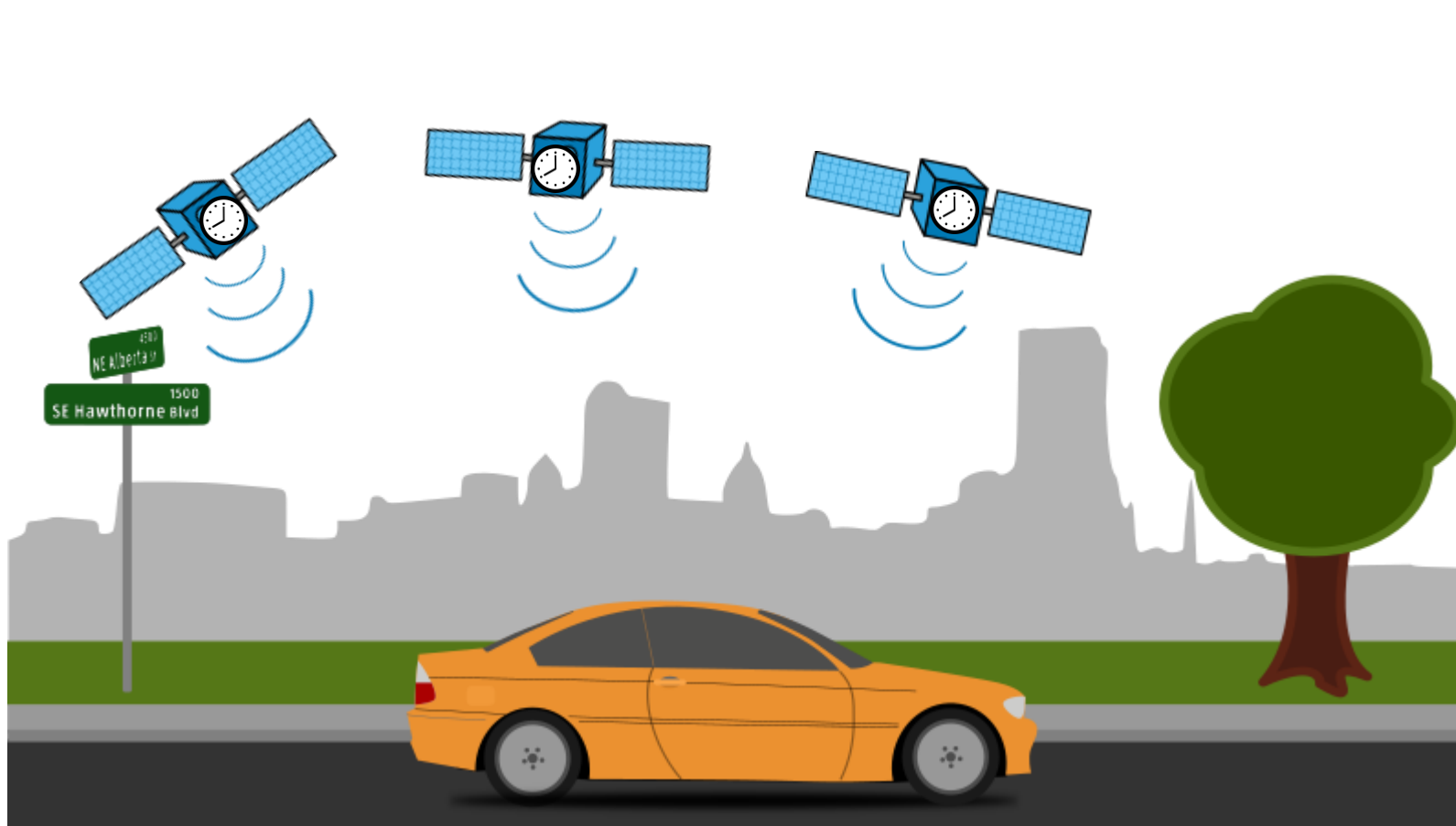
Kommunikation



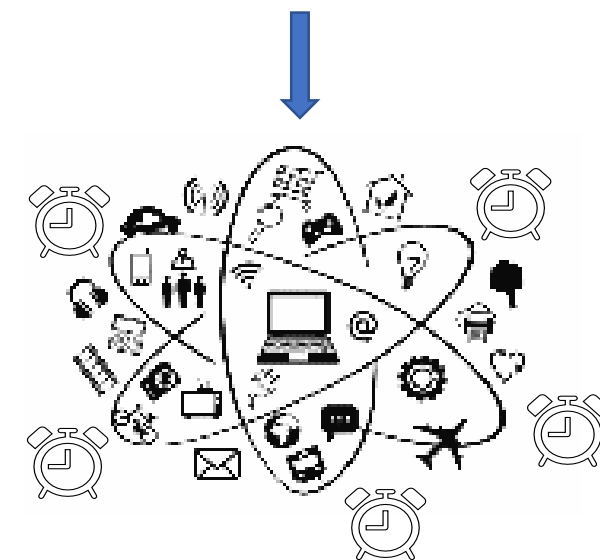
Autonome Fahrzeuge

Quantum 2.0 für Navigation und Zeit

Quantenuhren ermöglichen derzeitige Satellitennavigationssysteme



Navigation



Synchronisierung

Wirtschaftliche Bedeutung: 5-10% BIP

Satellitenavigation – in Kürze

Abstand durch Laufzeitmessungen



Distanz: d



Empfang zur Zeit t_e

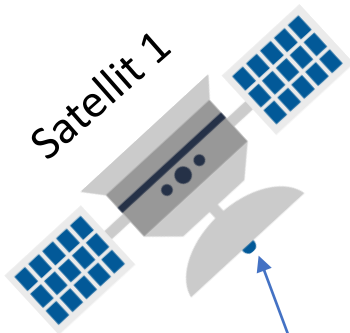
Lichtgeschwindigkeit (~ 30 cm in 1 ns)

$$d = c(t_e - t_s)$$

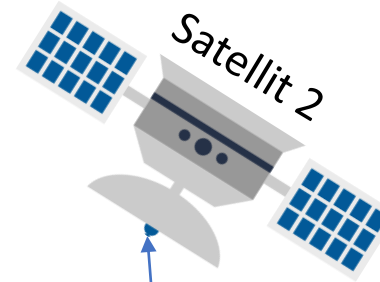


Satellitenavigation – in Kürze

Abstand durch Laufzeitmessungen



Distanz: d_1



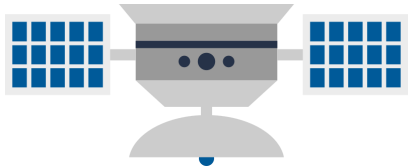
Distanz: d_2



Satellitennavigation – in Kürze



Abstand durch Laufzeitmessungen UND Zeit



Enthält hochgenaue Quantenuhr, die an die Weltzeit angebunden ist




Enthält keine hochgenaue Quantenuhr

Abfallprodukt?



Beobachtung von 4 Satelliten liefert die dreidimensionale Position UND die Weltzeit

Zeit – die „Unsichtbare Ressource“



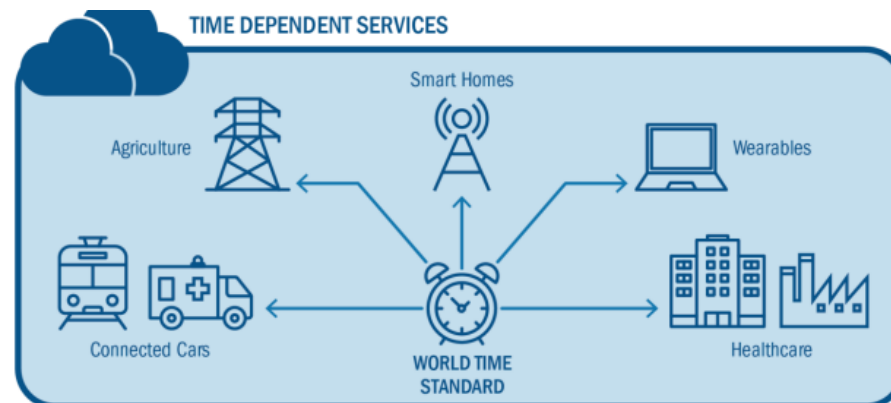
DEFEND TODAY. SECURE TOMORROW.

TIME – THE INVISIBLE UTILITY

SECTORS AND INDUSTRIES DEPENDENT ON TIME

Communications	Transportation	Power Grid	Finance	Security	IT
Telecommunication	Aviation	Frequency Monitoring	Regulatory Requirements	Cryptography	Smart Devices
Cloud Operations	Maritime	Multi-rate Billing	ATM Networks	Access Control	Incident Investigations
Internet of Things (IoT)	Pipelines	Fault Detection		Forensics	
	Rail			Surveillance	

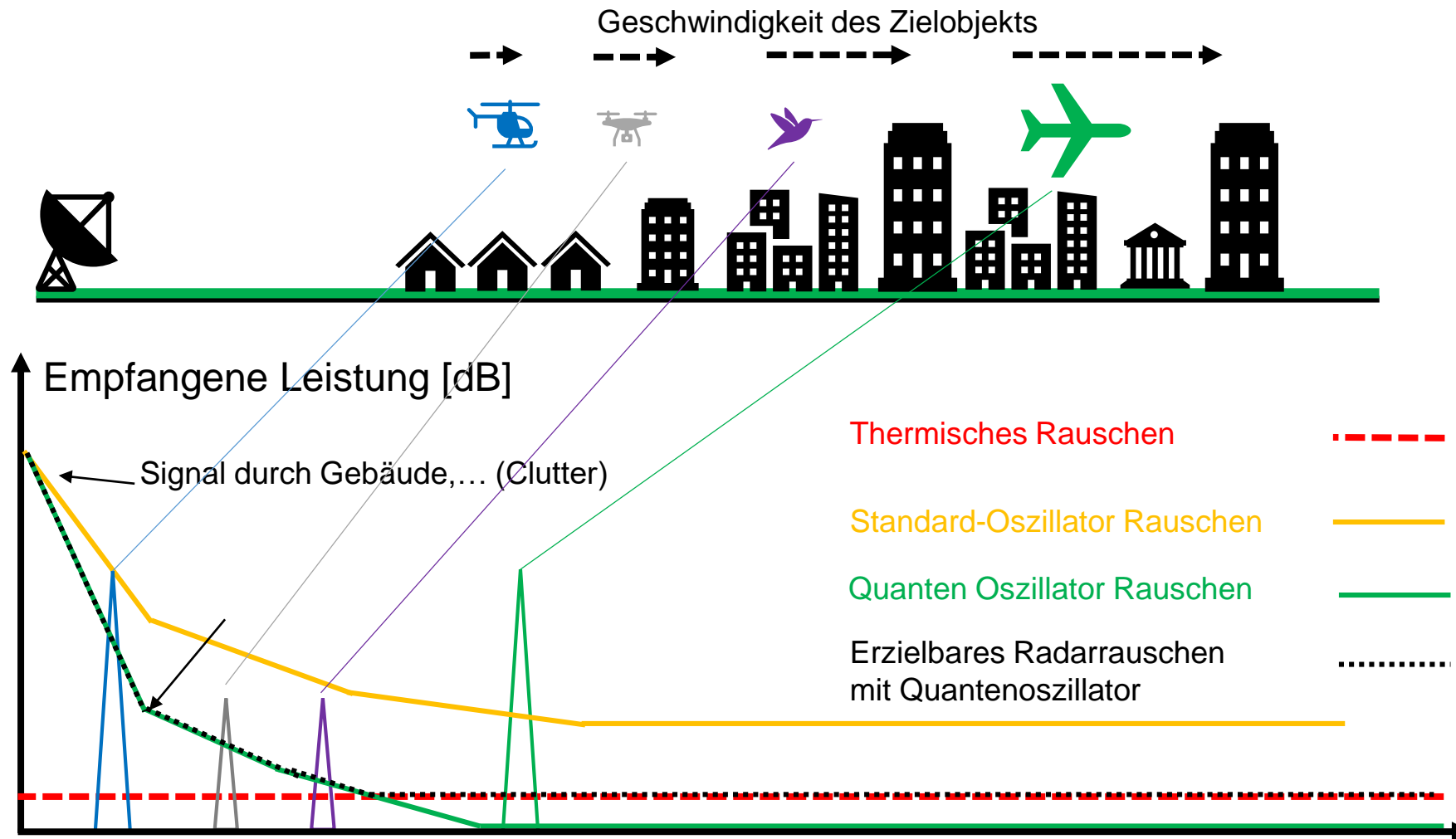
Vergleich:
kritische Materialien



Anwendungspotenzial: Urbane Luftraumüberwachung



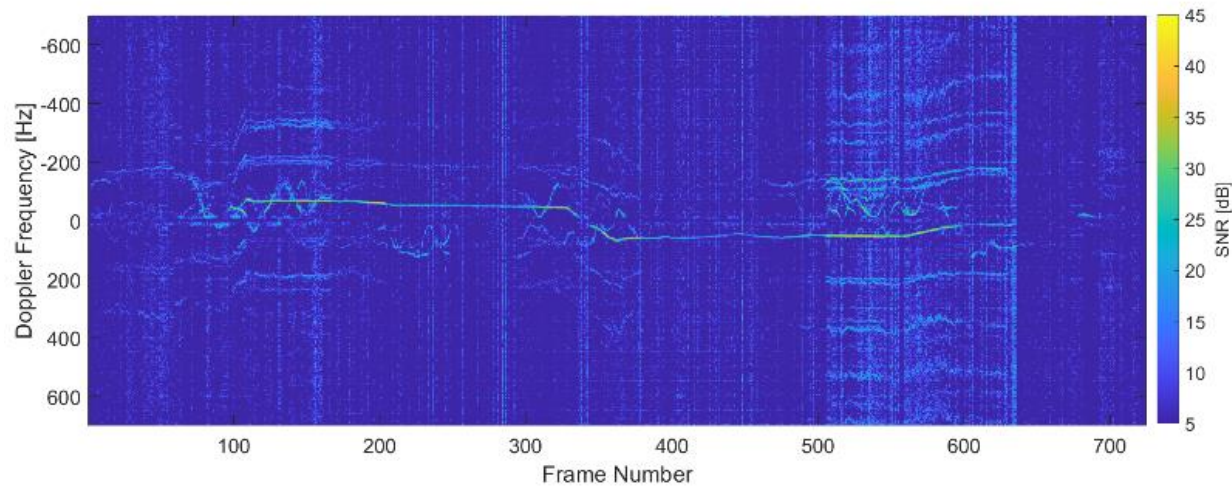
Ziel: Verbesserung urbaner Flugsicherung



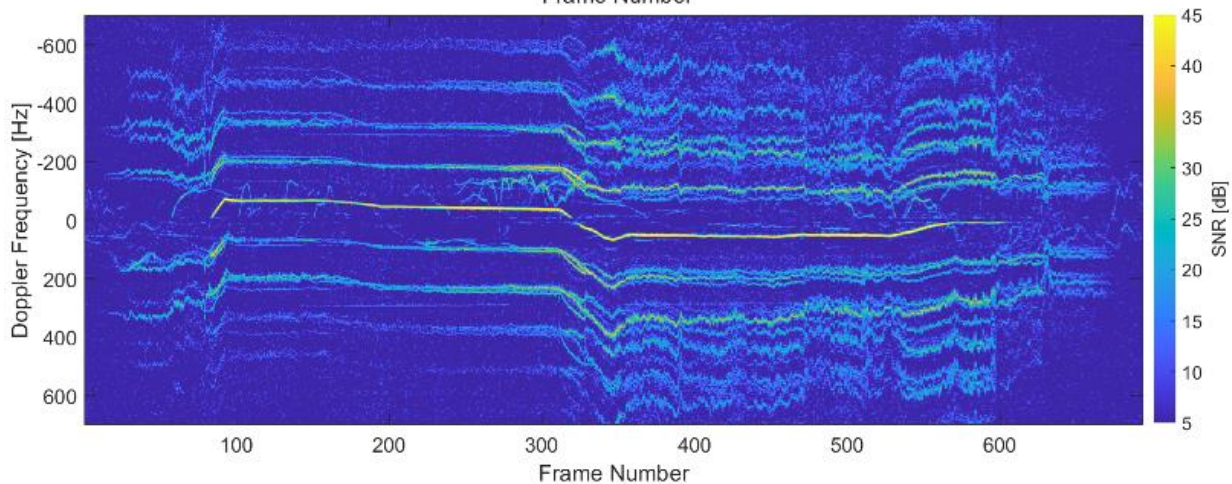
Grafiken:
Credit Prof. Y. Singh
University of Birmingham

Praktische Auswirkungen Oszillator

Ermöglichung der Klassifizierung und Verfolgung von Flugobjekten



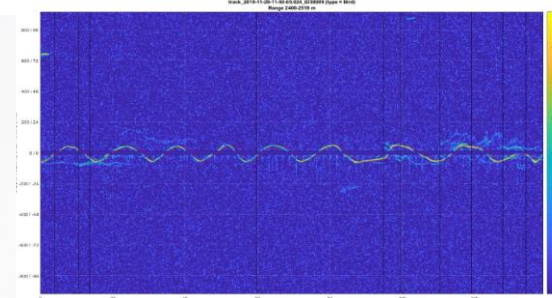
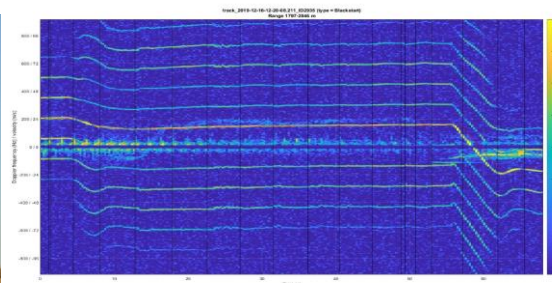
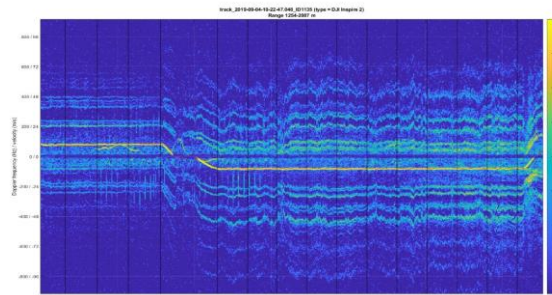
Standard-Oszillator



Besserer (klassischer) Oszillator

Praktische Auswirkungen Oszillator

Ermöglichung der Klassifizierung und Verfolgung von Flugobjekten



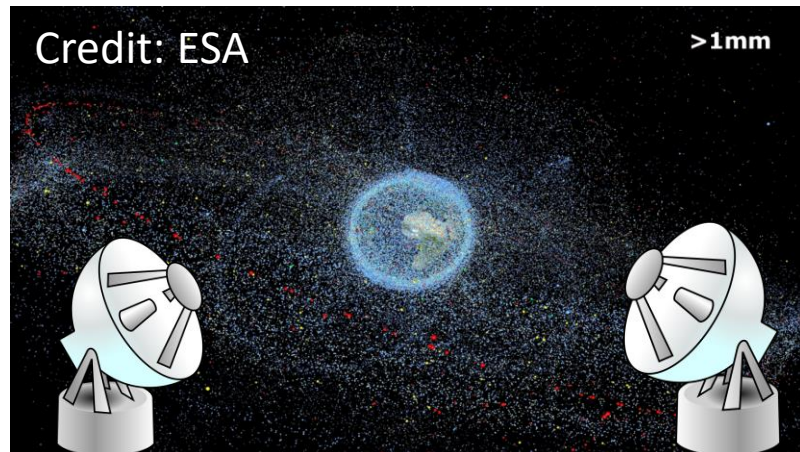
Standard-Oszillator

Besserer Oszillator

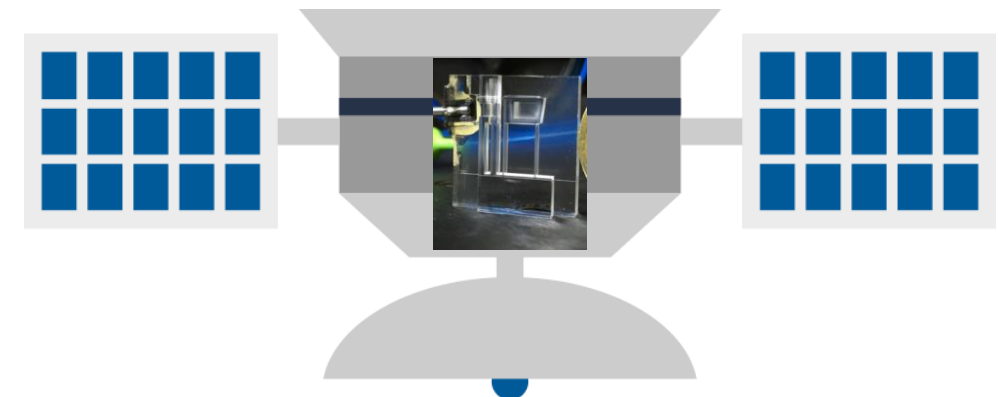


Quantentechnologie für Space Traffic Management

Orbitkontrolle, Space Debris und Thermosphärenwinde



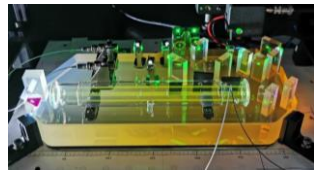
Zeitsynchronisierte Radarsysteme für
3d LEO-Beobachtung im cm Bereich



Präzise Beschleunigungssensorik für
Thermosphärenwinde und Teilchen bis mm

Quantentechnologie für Mobilität

Uhren und Inertialsensoren (mit DLR SI, KN, GK, OS)

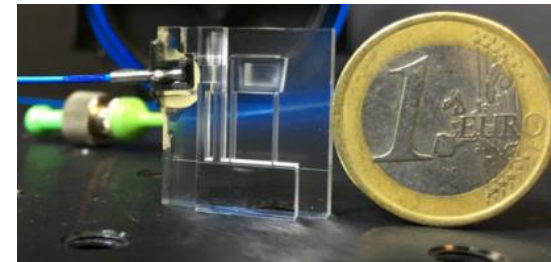


DLR-Uhr auf der ISS
Ziel: 2026-2028



Credit: ESA

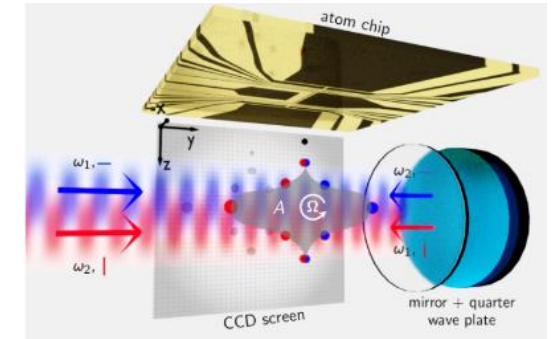
Zukünftige Galileo-Generationen



Optomechanisch: DLR QT



Inertialsensoren

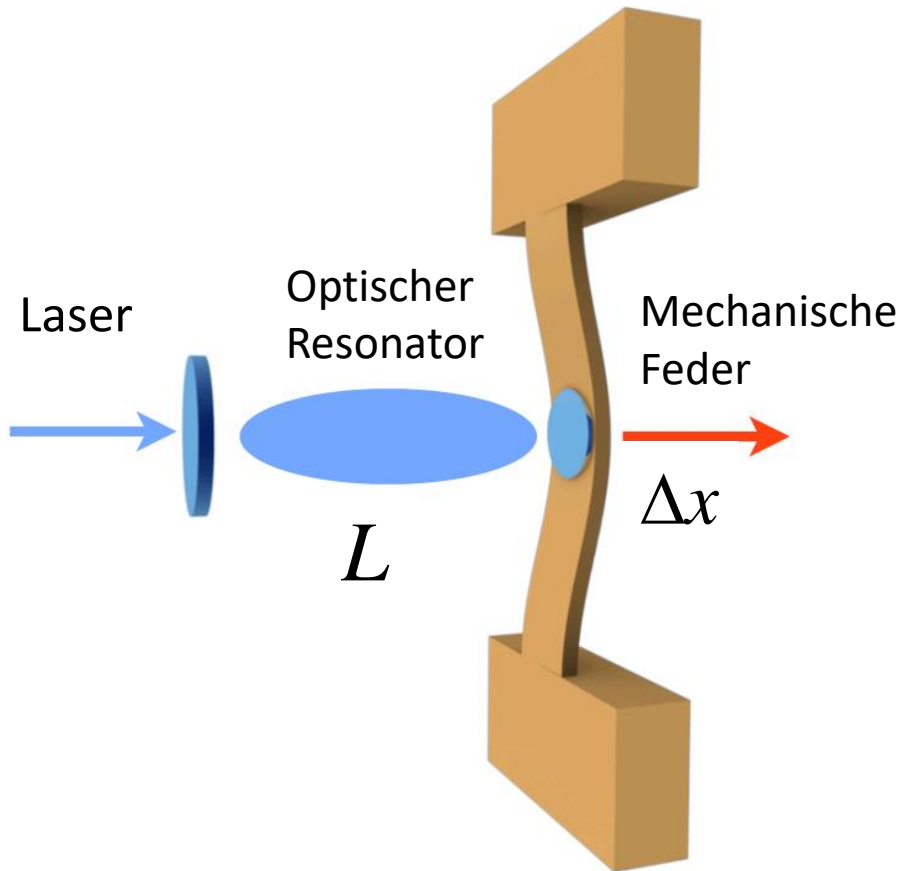


Atominterferometrie: DLR SI



Optomechanische Beschleunigungssensoren

Masse-Feder System mit Laser ausgelesen



Beschleunigung

Mechanische Resonanzfrequenz

Optische Frequenzverschiebung

$$\frac{\Delta x}{L} = \frac{a/\omega_0^2}{L} = \frac{\Delta \nu}{\nu_0}$$

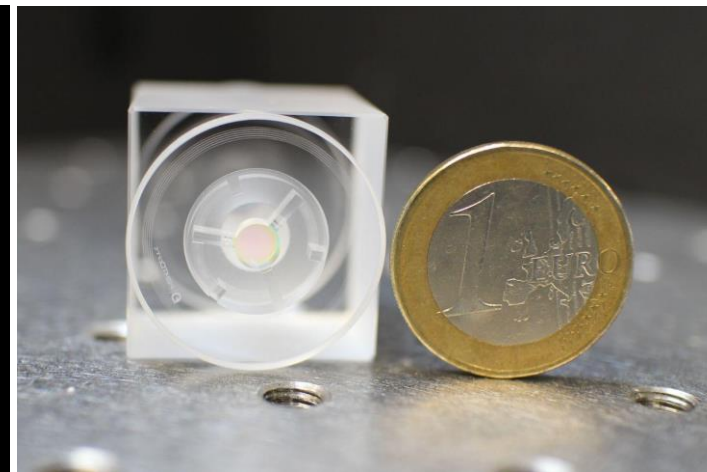
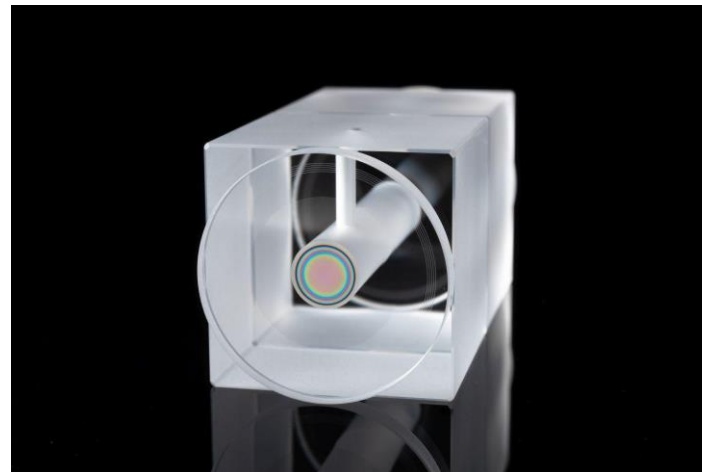
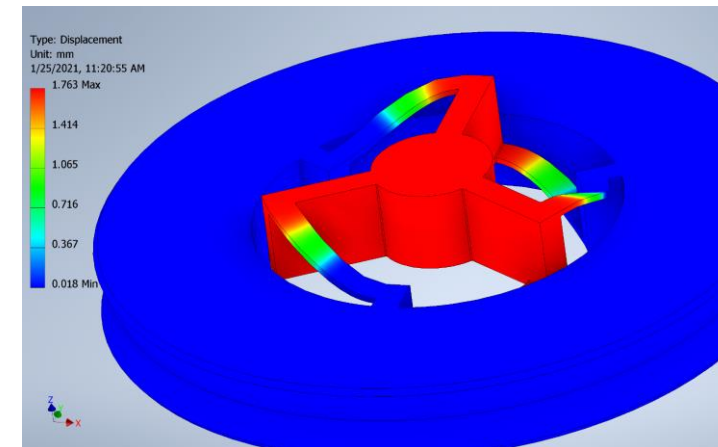
Optische Resonanzfrequenz

→ Ein „Uhrenlaser“ erlaubt genaue Beschleunigungsmessungen

Prototypen zur Beschleunigungsmessung

Kompaktes und robustes Design

- Monolithischer Glasresonator
- Erwartete Empfindlichkeit $< 1\text{ng}$



Quantensensoren in der Kommunikation

Empfänger aus hochangeregten Atomen

- Extrem sensitiv
- Sehr breitbandig
- Sehr gut adressierbar

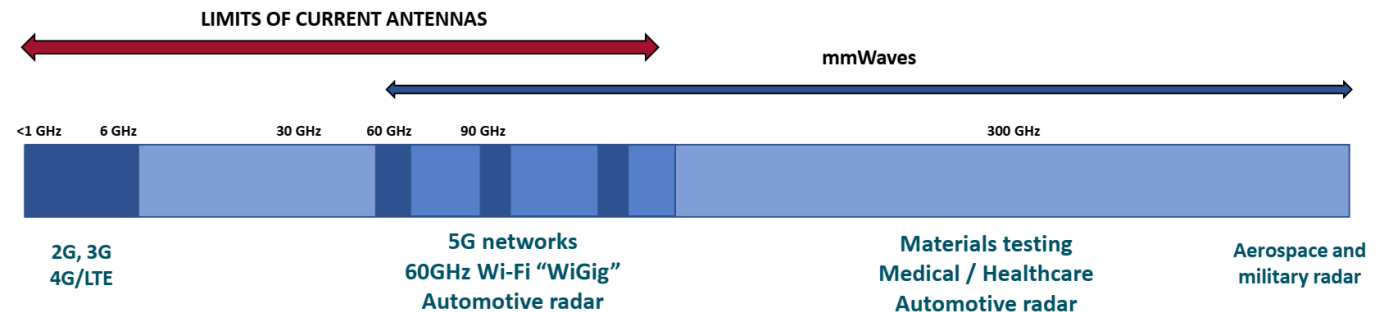


Anwendungen

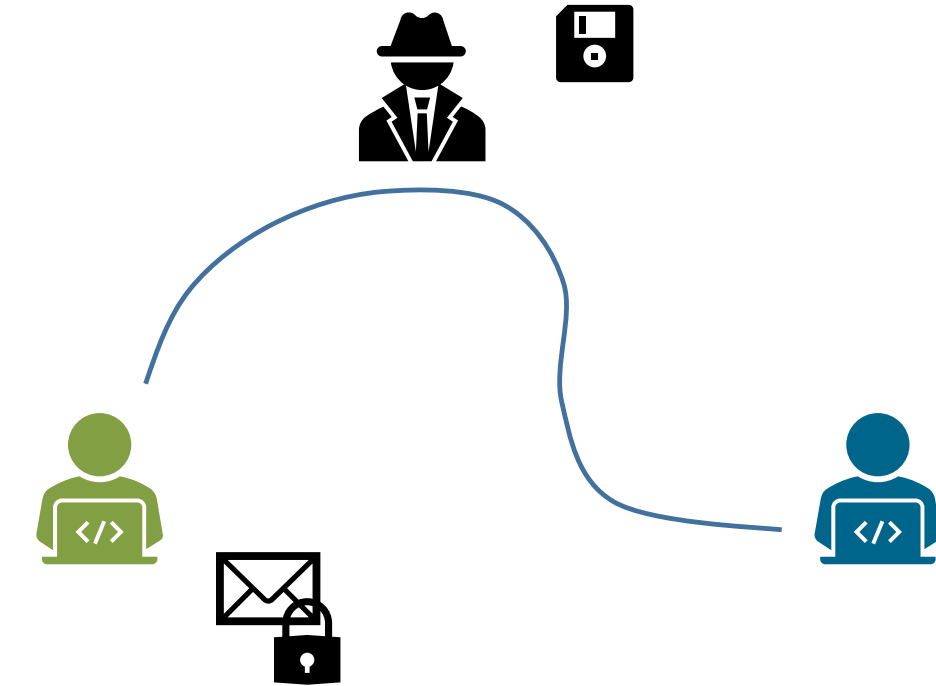


- EMP-sichere Satelliten
- RF Empfänger mit hoher Störunterdrückung
- Erdbeobachtung

Sehr kompakte
Sensoreinheiten



Sichere Kommunikation



1 6 4 5 2 6 3 5 4 1 2 ...

6 1 3 3 5 6 4 1 3 6 2 ...

Wie sensible Daten schützen?

Kommunikation mit einzelnen Lichtteilchen

Erzeuge zwei **verschränkte** Photonen



Ergebnis zufällig, aber
Oberseite plus Unterseite
immer 7.

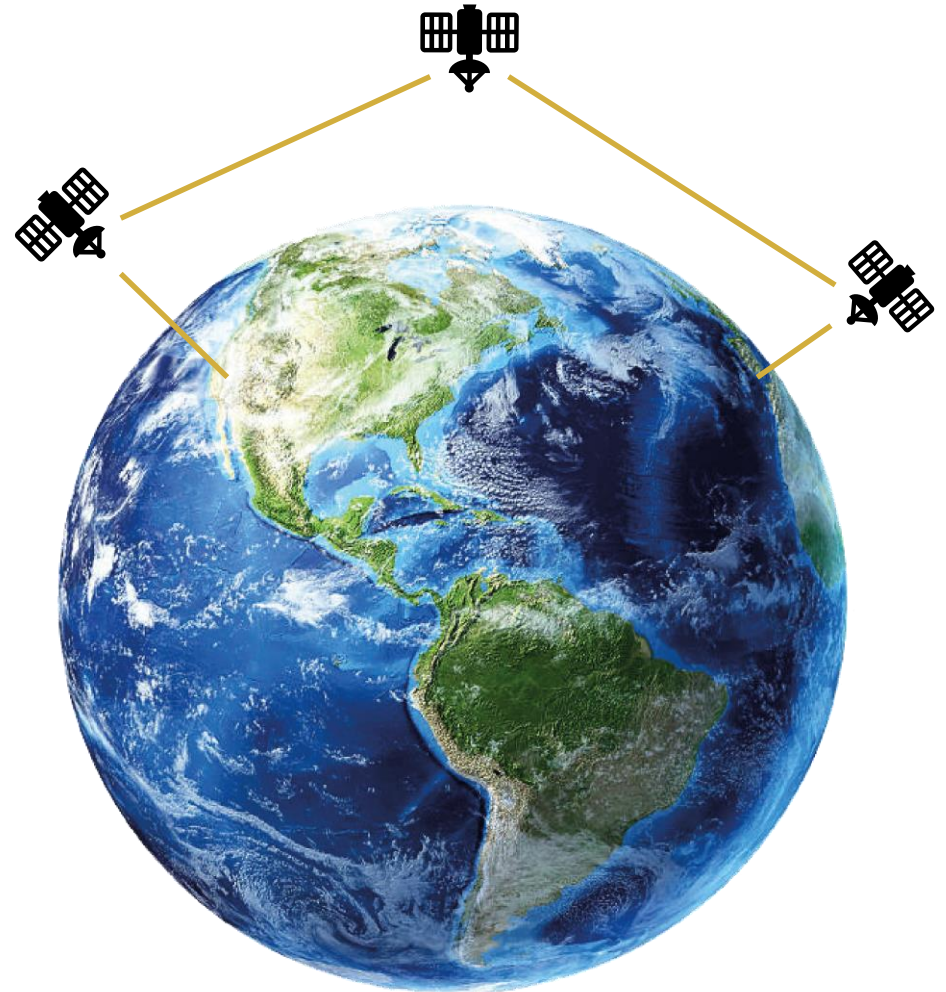
Zustand kann nicht perfekt
kopiert werden

Sichere Kommunikation auf globaler Skala

Mit Glasfaserkabeln ≈ 100 km Reichweite

Globale Verschränkung über Satelliten

- Quantenkryptographie
- Geheimes Quantencomputing
- Quanten-Authentifizierung

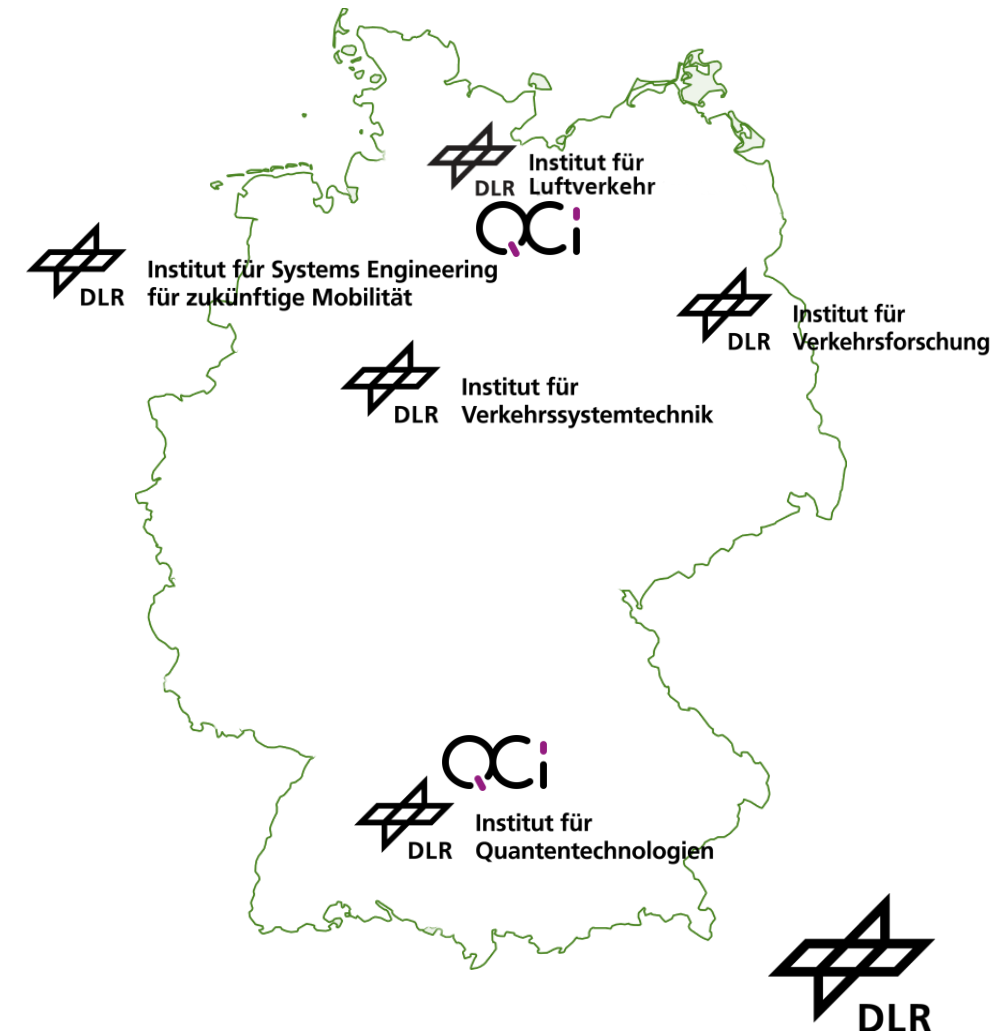


Quantencomputing & **Mobilität** (**QCMobility**)



Ziele

- Erforschung des Potenzials von Quantencomputern
- Kooperation mit Industriepartnern
- Implementierung von Demonstrationsproblemen
- Erstellung einer Roadmap



Projektleitung

Sabine Wölk und Matthias Zimmermann (Institut für Quantentechnologien)

Anwendungsbereiche in der Mobilität



Luftverkehr

- Flugplanung
- Crewplanung
- Flugweg- und Profilloptimierung

Schienerverkehr

- Disposition
- Fahrplanerstellung
- Kapazitätsmanagement
- Routen-/ Trajektorienoptimierung

QC Mobility



Intermodaler Verkehr

- Steuerung intermodaler Transportlogistikketten
- Optimierung mehrdimensionaler Logistiknetzwerke (Straße-Schiene, Straße-Schiff, Schiene-Schiff)

Straßenverkehr

- Virtuelle Haltestellen für den bedarfsorientierten Nahverkehr (Rufbussysteme)
- Ladezonen für Lieferdienste

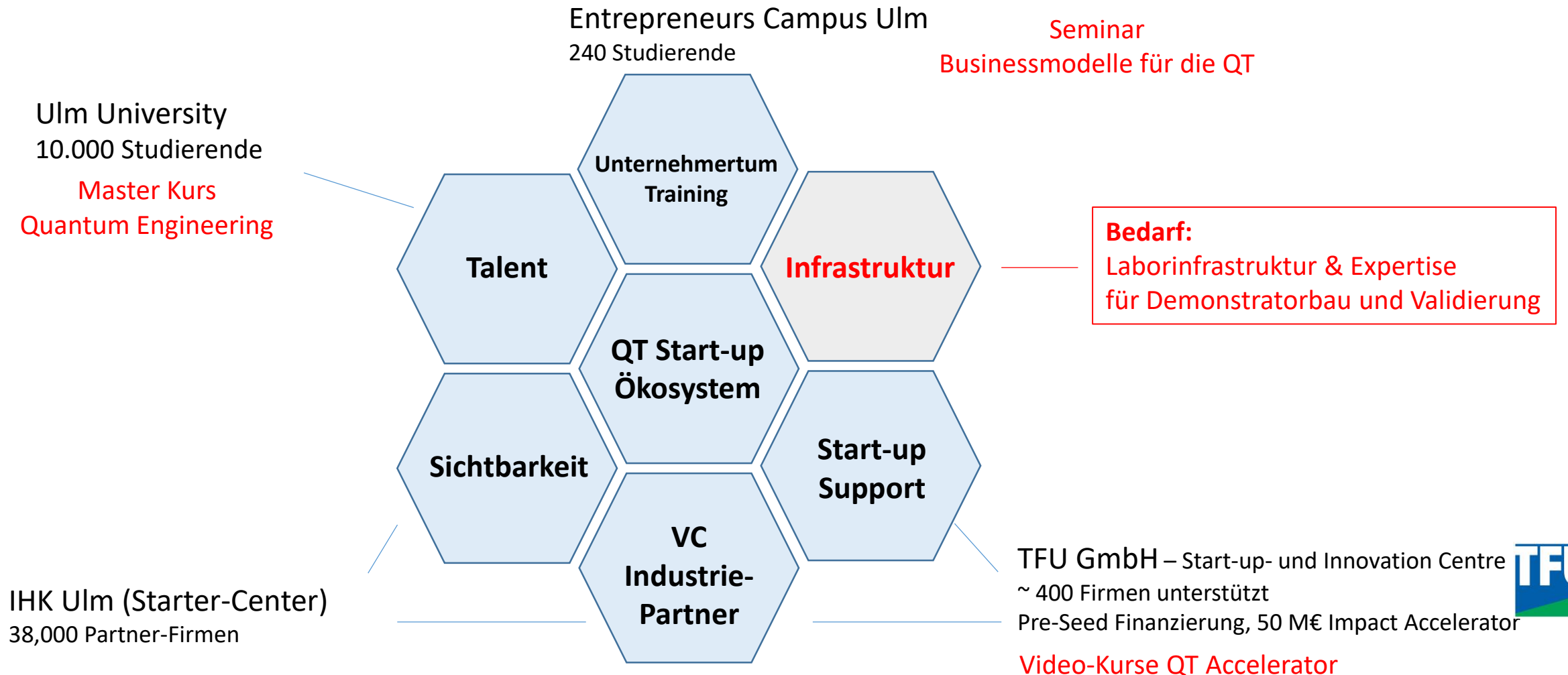
Maritimer Verkehr

- Verifikation und Validierung automatisierter/ hochautonomer Systeme
- Flottenmanagement
- Routen-/ Trajektorienoptimierung



Chance: QT Innovations-Ökosystem

Infrastruktur für „Deep Tech“ Innovation



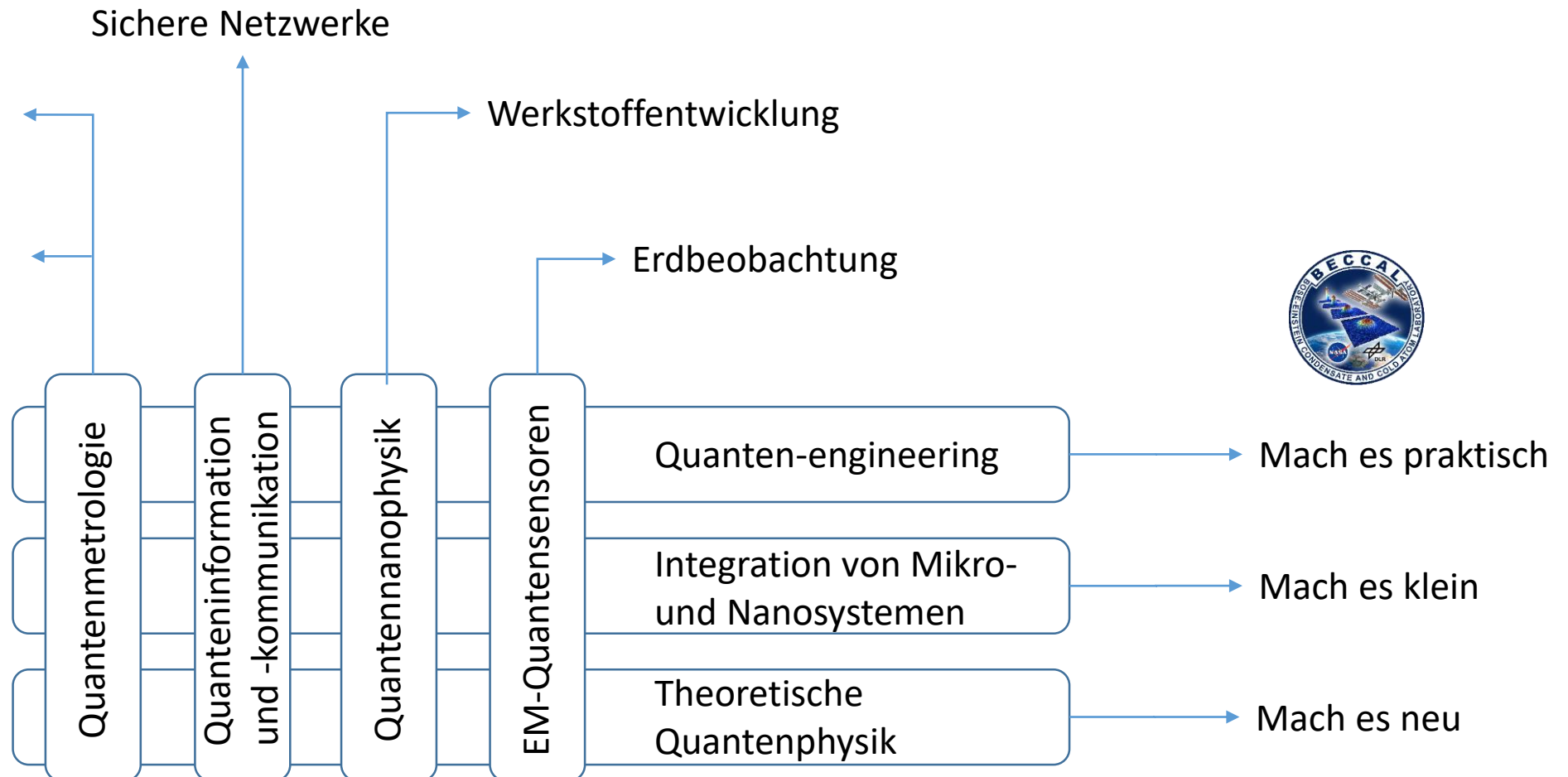
DLR Institut für Quantentechnologien, Ulm



Quantentechnologie von der Idee bis ins All



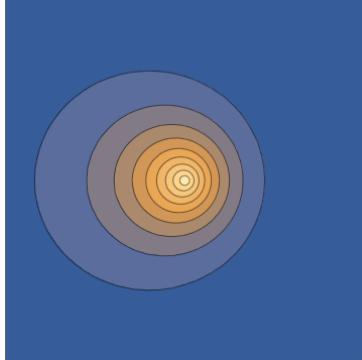
Präzise Zeit
Präziser Ort



Das Institut auf einen Blick

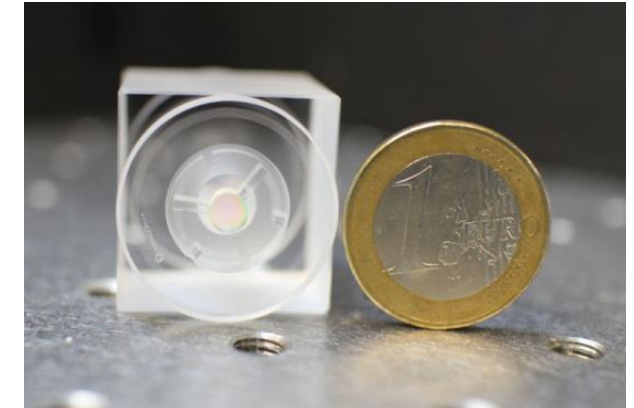


Sichere
Kommunikation



Hochgenaue
Zeitmessung

Kompakte
Sensoren



Resilientere
Navigation



Hardware für
Satellitennavigation