

# ANWENDUNGSCHANCEN FÜR QUANTENTECHNOLOGIEN IN DER RAUMFAHRT

**Prof. Dr. Kai Bongs**

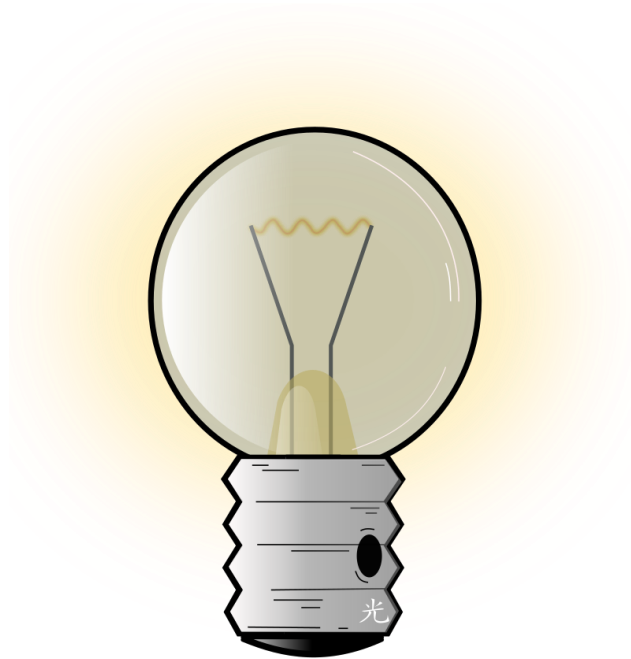
**DLR Institut für Quantentechnologien, Ulm**

**Fachbereich Physik, Universität Ulm**



# Quantentechnologie – wie es begann

1900: Beschreibung der Strahlung heißer Objekte

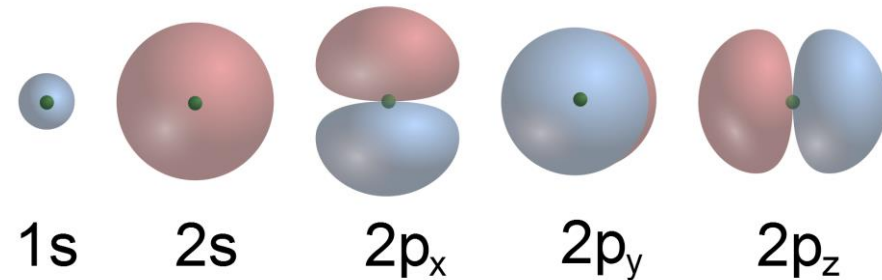
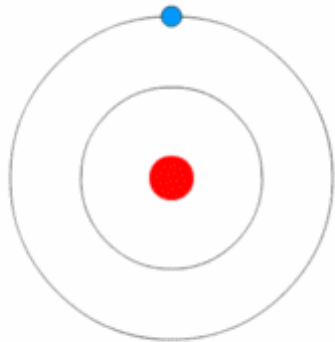


Planck Postulat: Elektromagnetische Energie kann nur in quantisierter Form emittiert werden.

$$E = h \nu$$

# Quantenwellen

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

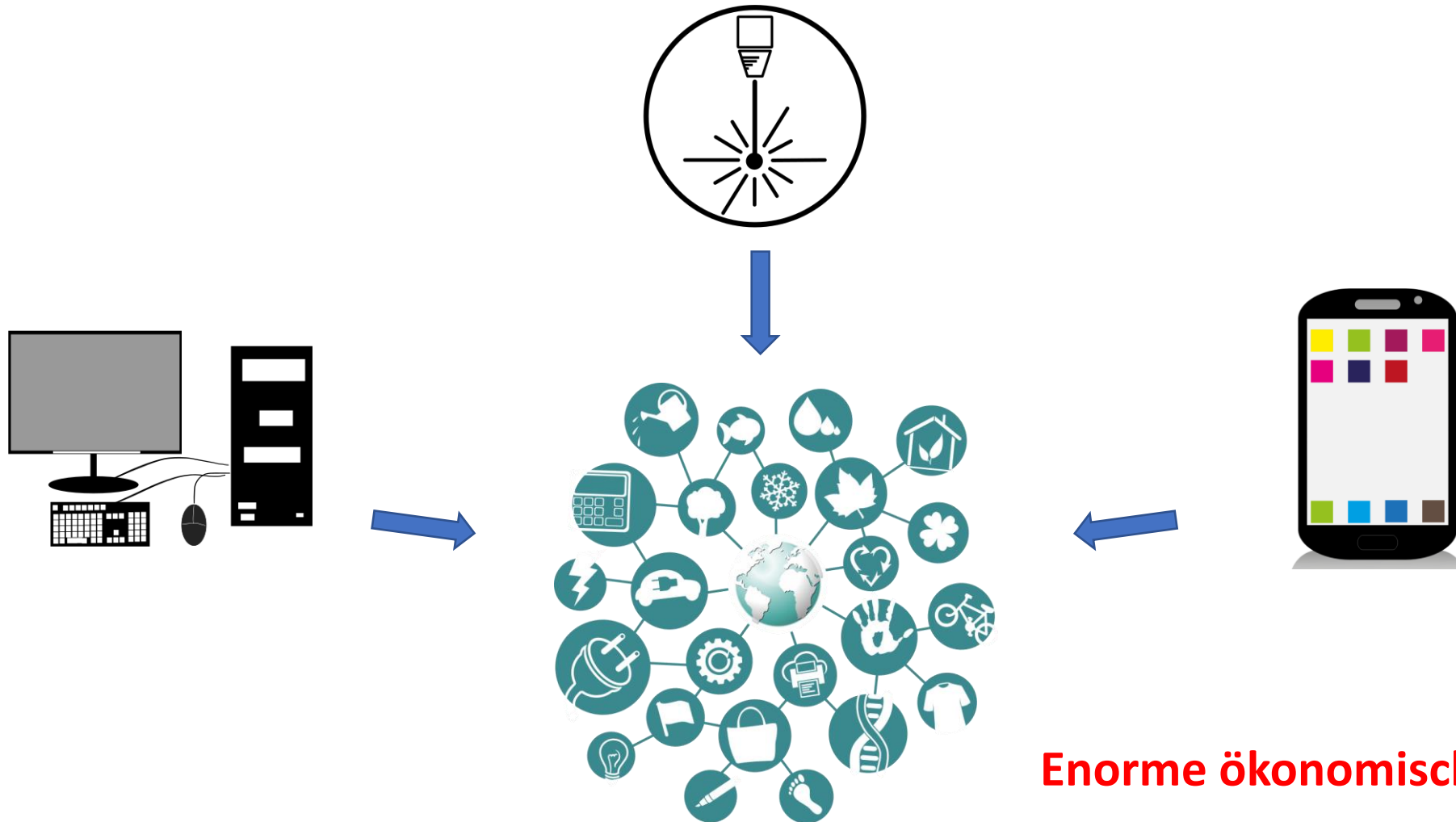


By Kurzonddddd (Own work) [CC BY-SA 3.0  
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)],  
via Wikimedia Commons

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

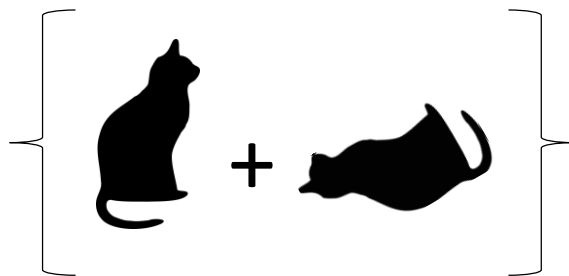


**Enorme ökonomische Bedeutung!**

# Quantum 2.0

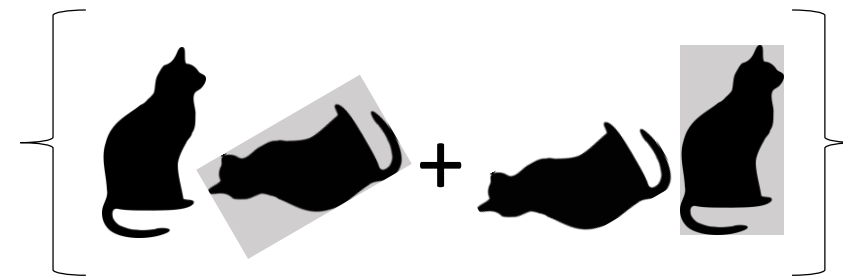
## Superposition und Verschränkung

### Superposition



Teilchen in zwei Zuständen gleichzeitig  
→ Schrödinger's Katze

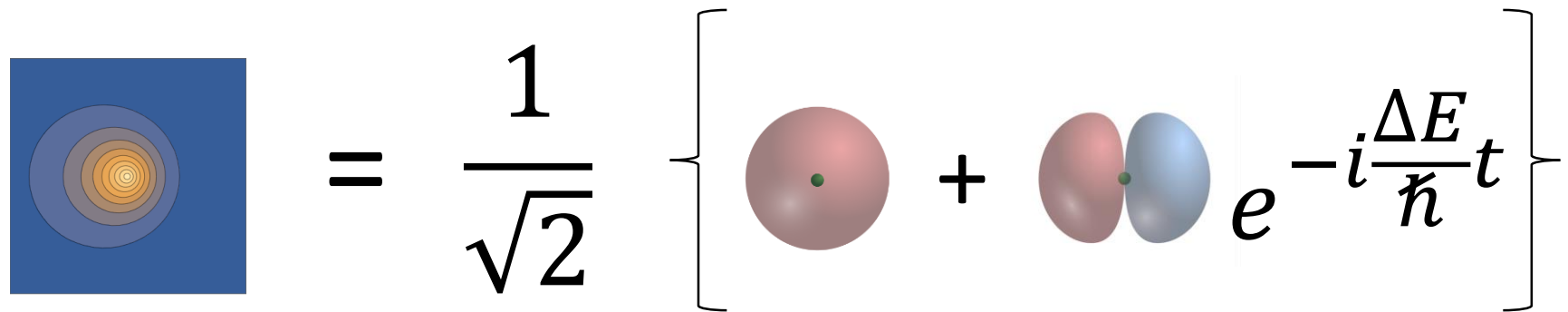
### Verschränkung



„Superposition über mehrere Teilchen hinweg“

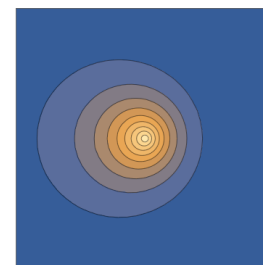
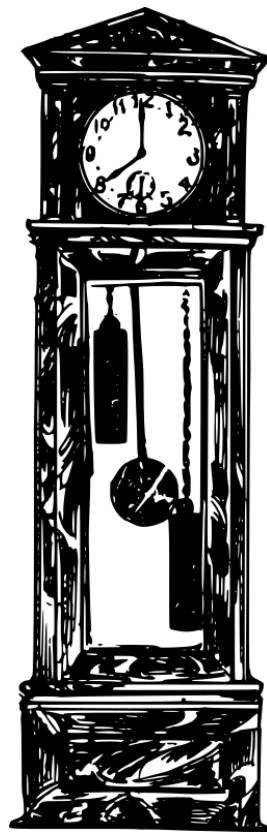
# Beispiel: Superposition im Atom

Oszillierende Elektronenwolke


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

# Wie funktionieren Quantenuhren?

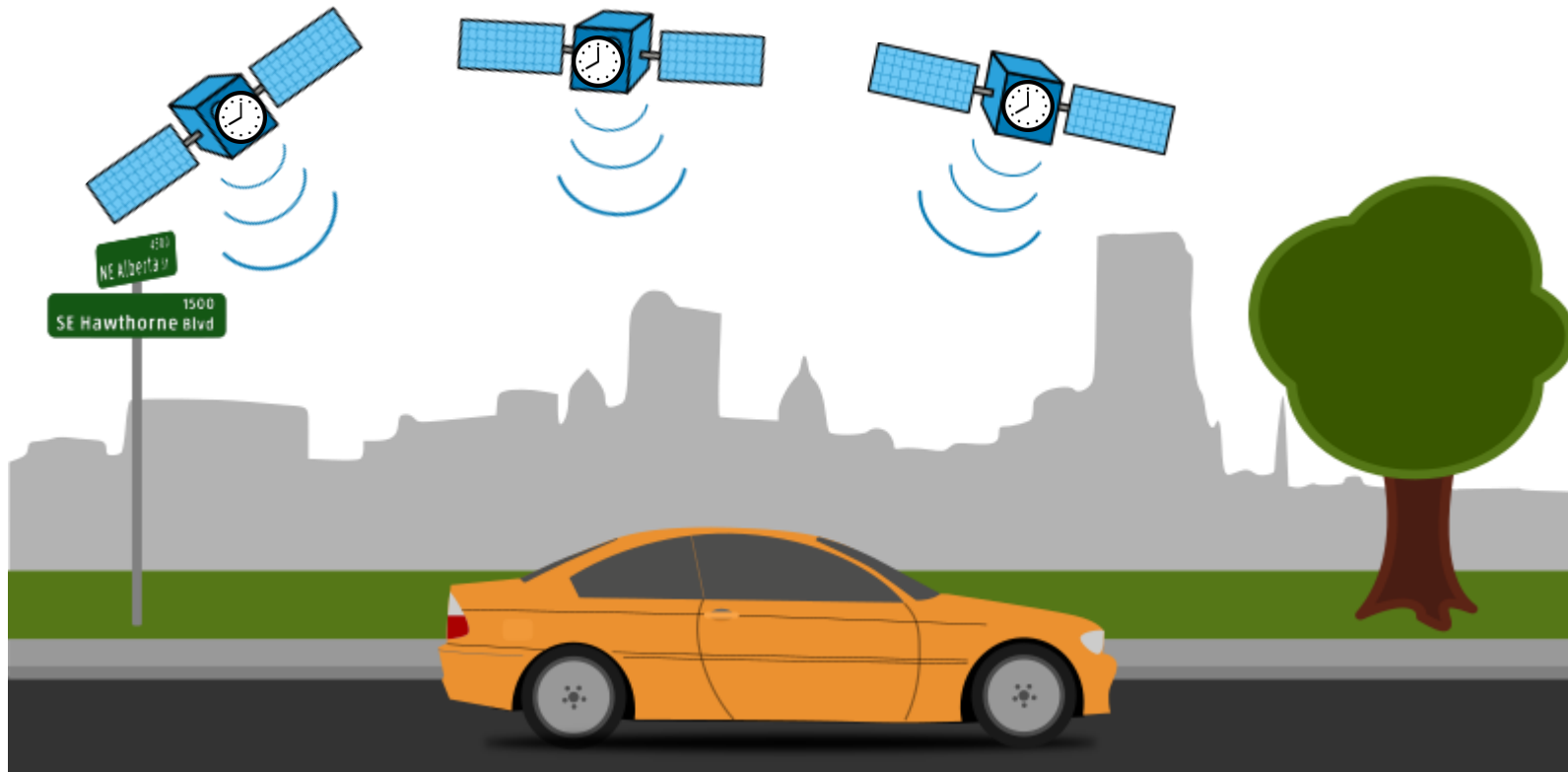
Eine Quantenuhr ersetzt den Oszillator (z.B. Pendel) einer Uhr mit einem Atom



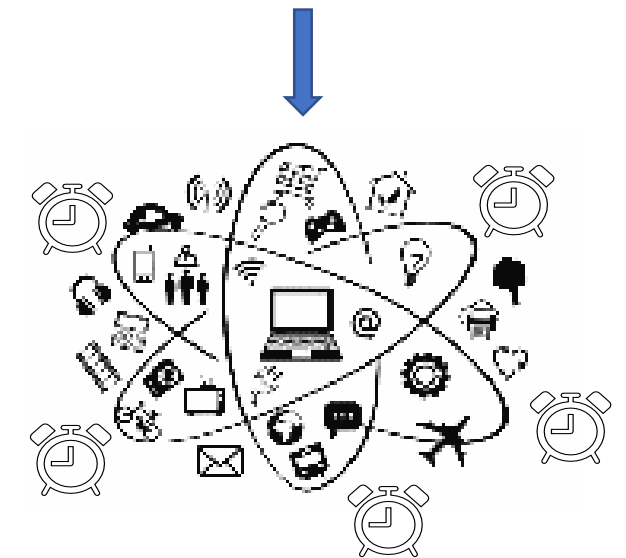
**Reproduzierbar und präzise durch Naturgesetze**

# Quantentechnologie für Navigation und Zeit

Quantenuhren ermöglichen alle derzeitigen Satellitennavigationsysteme



Navigation



Synchronisation



# Quantum 2.0 ist JETZT!

Quantensensoren sind kommerziell erhältlich – und sie sind „besser“ als klassische Sensoren

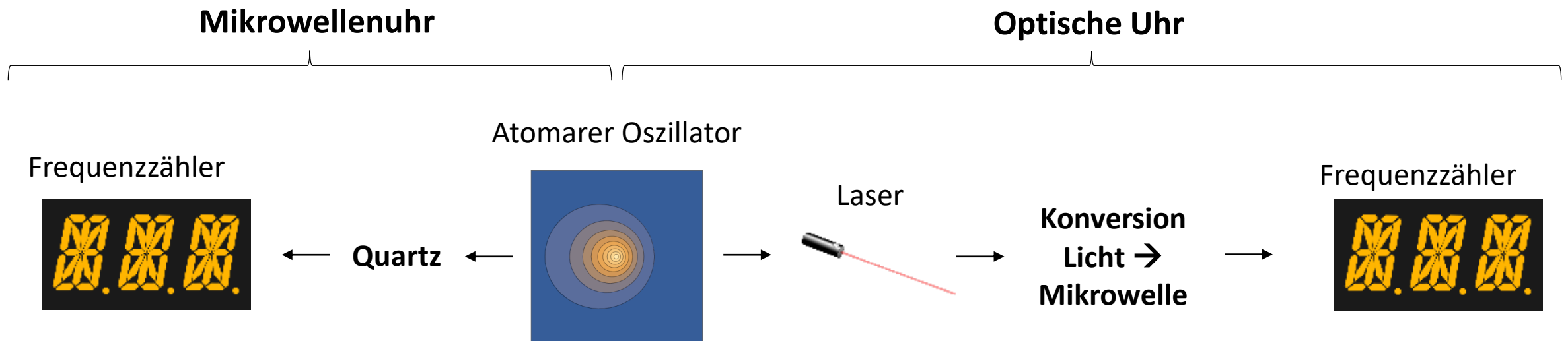
- QuSpin, Fieldline, Twinleaf,... : Quantenmagnetometer
- CERCA Magnetic Ltd: Magnetoencephalographie-Systeme basierend auf Quantenmagnetometern
- Nvision: Krebstherapie-Testsystem basierend auf Quantentechnologie-Spinmanipulation
- AoSense, Delta-G, Exail: Gravitations(gradienten)sensoren basierend auf Quantentechnologie
- Q.ANT: Demonstration einer Prothesensteuerung durch Quantenmagnetometer

....

**Wir stehen erst am Anfang – es kommt noch viel mehr!**

# Mikrowellenuhren (alt) und Optische Uhren (neu)

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



Atomarer Mikrowellübergang stabilisiert einen Quarzoszillator

Optischer atomarer Übergang stabilisiert einen Laser

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

# DLR Uhr: Weltweit Führend

Next-Generation Chip Scale Atomic Clocks

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

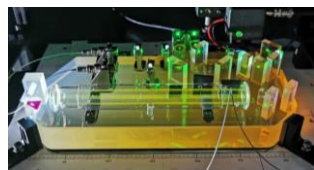
Physics	Species	Transition	Size	Stability	Maturity	Players	Notes
Laser-cooled atoms Double resonance	Rb Cs	Microwave	250cm <sup>3</sup> Phys. Pack. 2.2W (not all components)	10 <sup>-12</sup>	High (abandoned)	Draper & Simmetricom & Microsemi	MCAFS design (Miniature Cold Atom Frequency Standard) seems to have reached a dead-end around 2014. It never cleared DARPA III requirements on long-term stability.
Laser-cooled atoms Coherent population trapping	Rb	Microwave	Laboratory table	10 <sup>-11</sup> to 10 <sup>-13</sup>	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 <sup>3</sup> Vacuum package	10 <sup>-12</sup> to 10 <sup>-13</sup>	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 <sup>3</sup> Vacuum package	10 <sup>-13</sup> to 10 <sup>-14</sup>	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 <sub>2</sub>	Optical	30X50cm (only optics, no frequency comb)	10 <sup>-14</sup> to 10 <sup>-15</sup>	Medium (tabletop)	China Germany	Table-top implementations with commercial components and good performances. DLR has tested a 33L I <sub>2</sub> -based MTS system (without comb) in a rocket, ESA is considering it for G2G.
Thermal vapour Two Photon Transition	Rb	Optical	30L → 10L	10 <sup>-14</sup> to 10 <sup>-15</sup>	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 <sup>3</sup> Phys. Pack. 420mW (no freq. comb)	10 <sup>-13</sup>	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).

US Förderung >\$100M

DARPA ACES target (2016-ongoing): 3·10<sup>-14</sup> stability floor, 50cm<sup>3</sup>, 250mW

# Quantentechnologie für Navigation

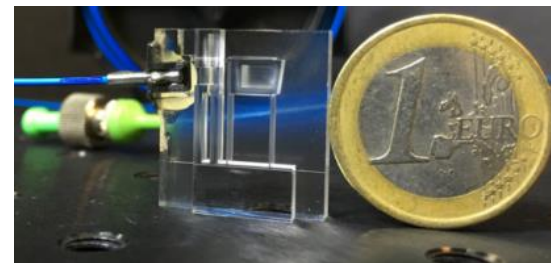
## Uhren und Inertialsensoren (mit DLR SI)



DLR-Uhr auf der ISS  
Ziel: 2026-2028



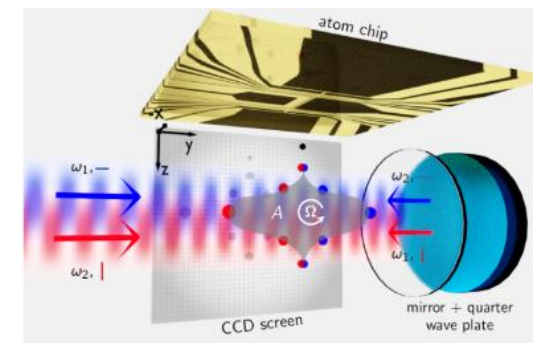
Zukünftige Galileo-Generationen



Optomechanisch: DLR QT



Inertialsensoren

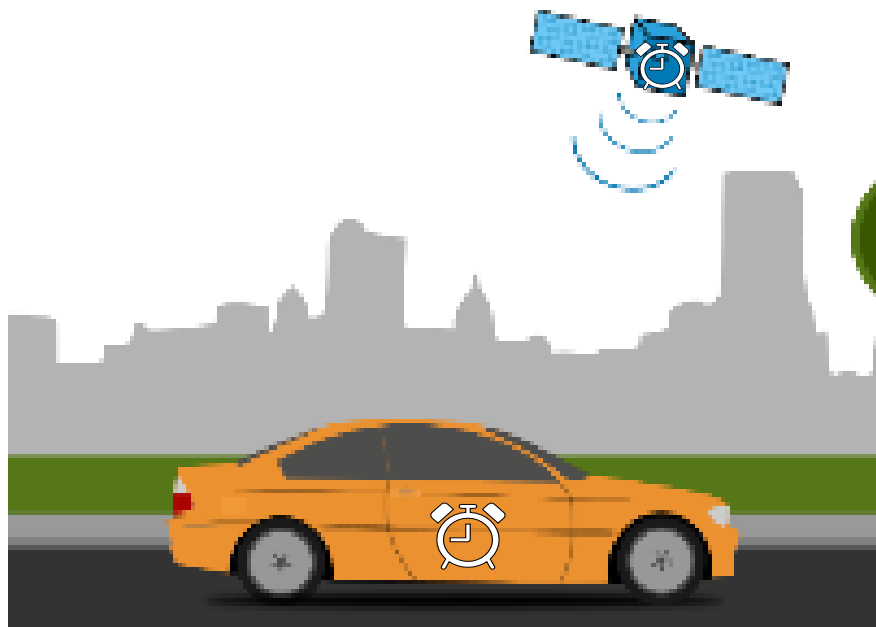


Atominterferometrie: DLR SI



# Zukunftsanwendung: Cloud Robotics

Autonome Fahrzeuge und Roboter mit Cloud computing benötigen zeitsynchronisierte Netze!



- Deterministischer Datentransfer mit sub-ms Latenz
  - Technische Lösung steht bei Funknetzwerken noch aus
  - Kompakte präzise Uhren versprechen einen Durchbruch
- **Next Generation Chip Scale Atomic Clocks**

# EU Aktivitäten in Space Regulation

Regulation braucht Kontrolle



HIGH REPRESENTATIVE  
OF THE UNION FOR  
FOREIGN AFFAIRS AND  
SECURITY POLICY

Strasbourg, 15.2.2022  
JOIN(2022) 4 final

**JOINT COMMUNICATION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE  
COUNCIL**

**An EU Approach for Space Traffic Management  
An EU contribution addressing a global challenge**

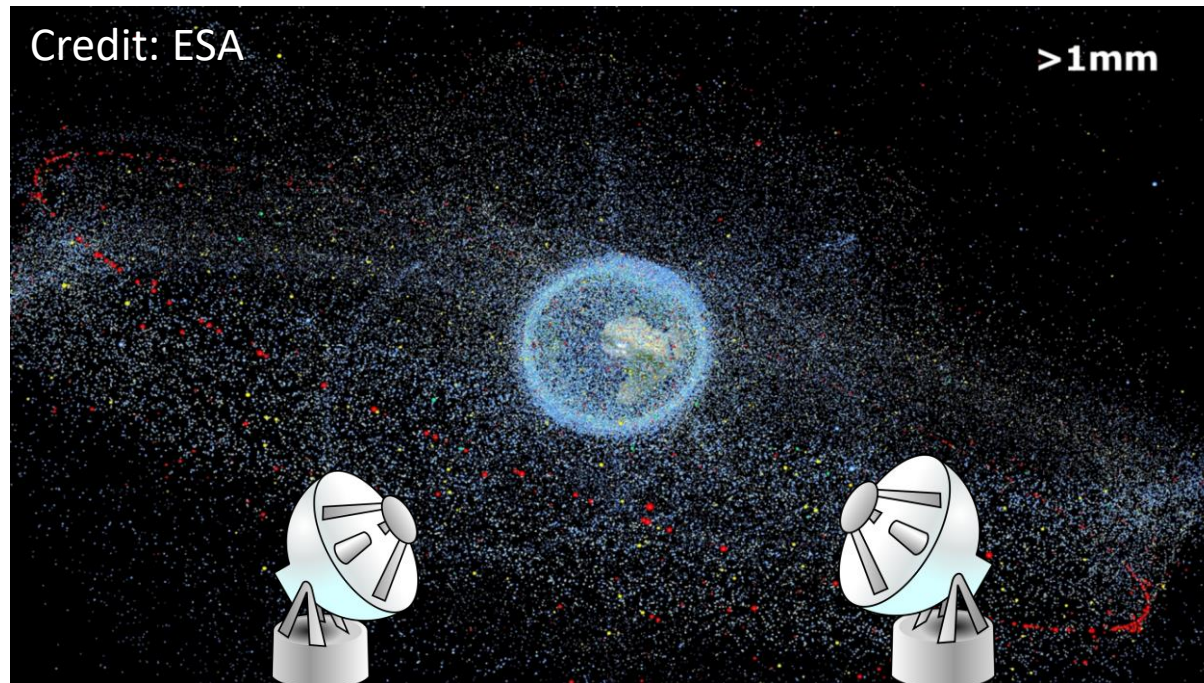
● Council of the EU Press release 23 May 2023 15:20

## The Council calls for a European approach on space traffic management

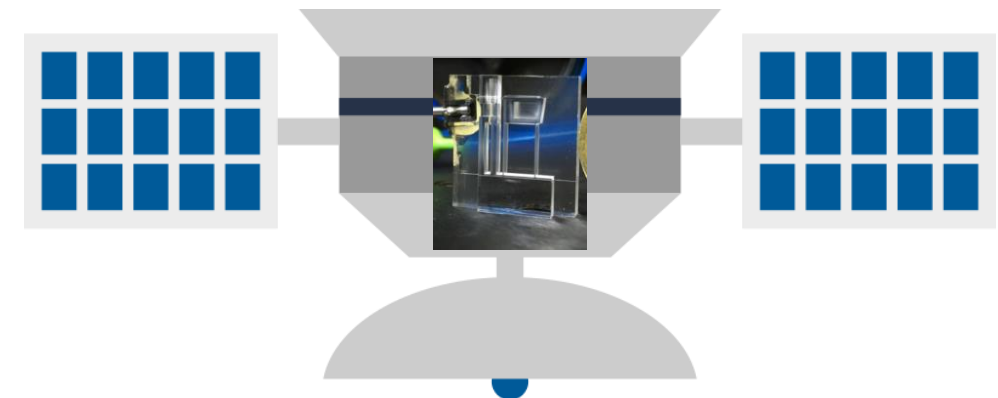
Today the Council adopted conclusions on the **'Fair and sustainable use of space'**, which includes a call for a European approach to space traffic management, at a time when orbits are increasingly congested with space objects.

# Quantentechnologie für Space Traffic Management

Orbitkontrolle, Space Debris und Thermosphärenwinde



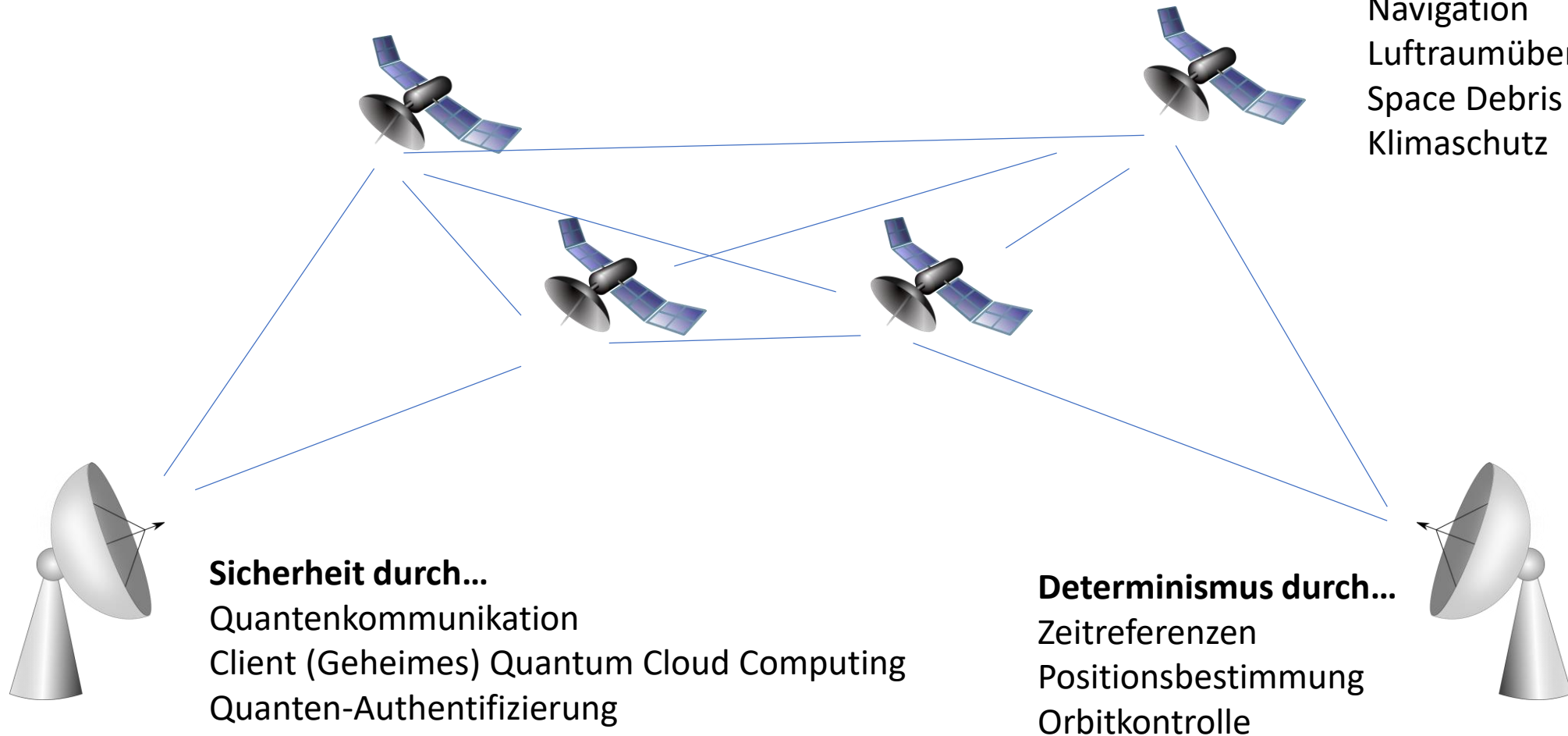
Zeitsynchronisierte Radarsysteme für LEO-Beobachtung im sub-cm Bereich



Präzise Beschleunigungssensorik für Thermosphärenwinde bis zu mm-Teilchen

# Quantentechnologie für eine vernetzte Zukunft

Sichere, deterministische und intelligente Netze





Was sind Ihre Ideen für die Quantentechnologie?

