

ZUKUNFTSTECHNOLOGIE – QUANTEN IM ALLTAG

Companisto Masterclass

Prof. Kai Bongs
Institutsdirektor QT

DLR-Institut für Quantentechnologien
Wilhelm Runge Straße 10
89081 Ulm



Research Center + Space Agency + Project Management

AERONAUTICS



SPACE



ENERGY



TRANSPORT



SECURITY

civil security & defence research



DIGITALISATION, QUANTUM TECHNOLOGY AND SYSTEM MODELLING



- Europe's largest research centre for aeronautics and space
- Close cooperation with academia, research, business and industry
- BMWK is the primary funding ministry, BMVg provides institutional funding, BMI, BMU and others provide project funding

DLR sites

- **54 institutes and facilities across 30 sites**
 - 8 research stations
 - 4 international offices
- **More than 10.000 employees**
 - ~ 5.800 Scientific Staff
- **Budget: ~ 1.100 Mio. € (2021)**
 - ~ 550 Mio. Third-Party Funding



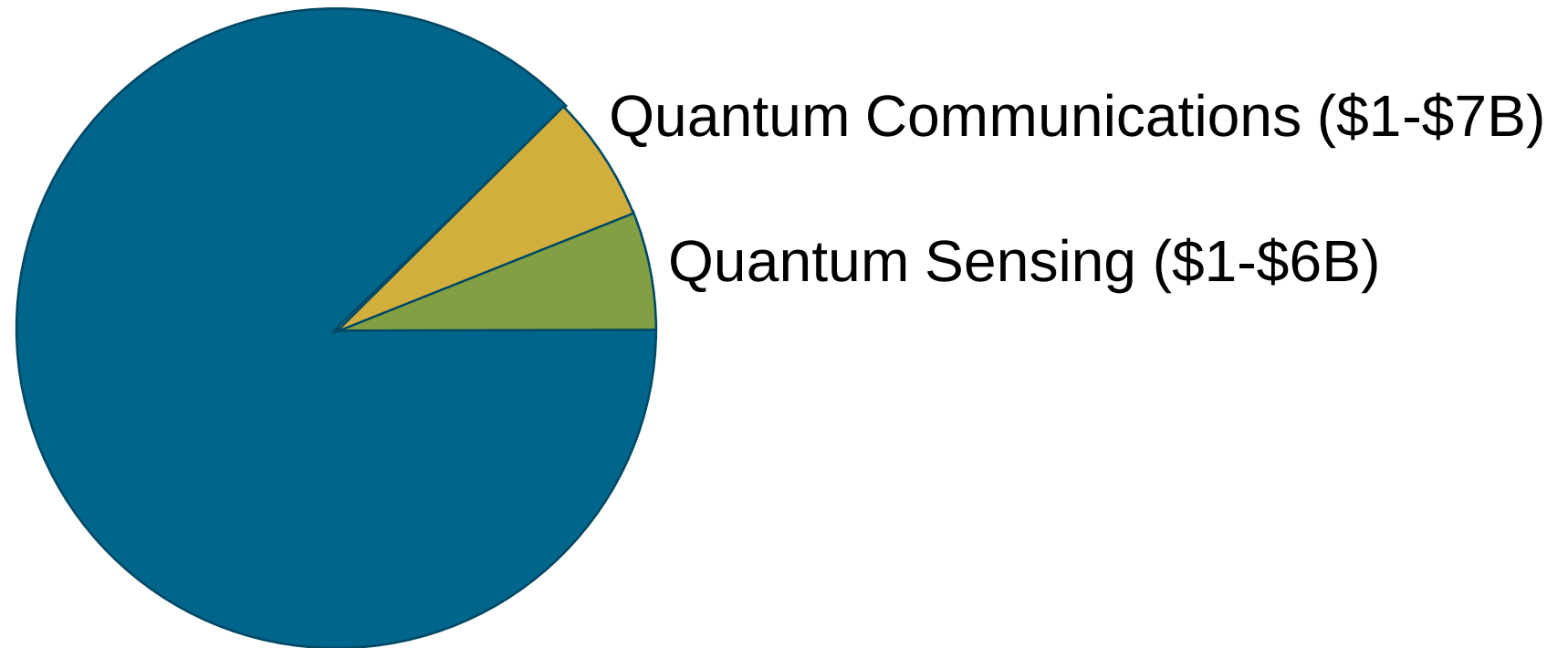
DLR in Ulm



- Institut für Quantentechnologien (DLR QT) – Quantentechnologie zum Einsatz bringen
- Institut für Künstliche Intelligenz (DLR KI) – Anwendungen und Sicherheit
- Institut für Technische Thermodynamik (DLR TT) – Batterieforschung und Brennstoffzellen
- Quantencomputing-Initiative (DLR QCI) – Industrieraufträge Quantencomputer und -anwendungen

Market estimates in 2040 (source: McKinsey Quantum Technology Monitor, 2023)

Quantum Computing (\$9-\$93B)



Overall economic impact much larger (e.g. estimate for QC in 2035: \$620B-\$1270B)

Womit müssen Sie rechnen?

- Quantencomputer lösen **bestimmte** ungelöste Probleme (Logistik, chemische Reaktionen, Datenbanksuche,...)
- Quantencomputer knacken gängige Verschlüsselungsverfahren (→ Post-Quantum Kryptographie **JETZT**)
- Quantennetzwerke bieten physikalisch garantierte Sicherheit
- Quantensensoren eröffnen neue hochwertige Datenquellen
- Quantenuhren sichern die „Ressource Zeit“ für eine innovative Wirtschaft (Kommunikation, Industrie 4.0, Autonomie, energieeffiziente Rechenzentren)

Quantentechnologie – wie es begann

1900: Beschreibung der Strahlung heißer Objekte



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

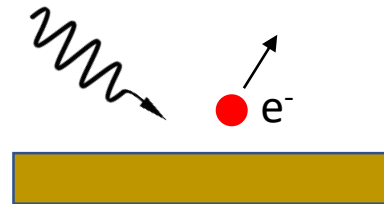
$$E = h \nu$$

Quantentechnologie – wie es begann

1900: Beschreibung der Strahlung heißer Objekte



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



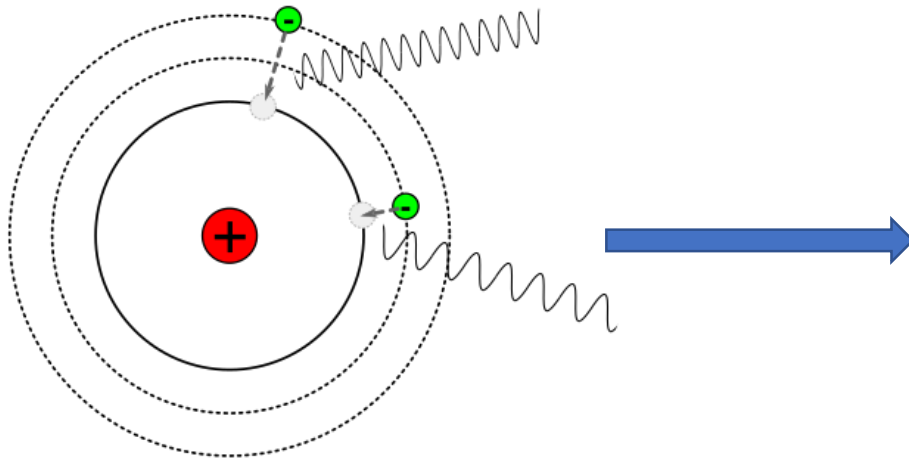
→ Nobelpreis 1921

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

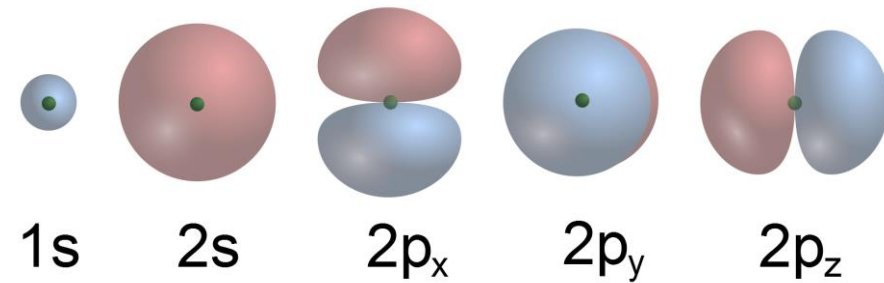
$$E = h \nu$$

Quantenwellen

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



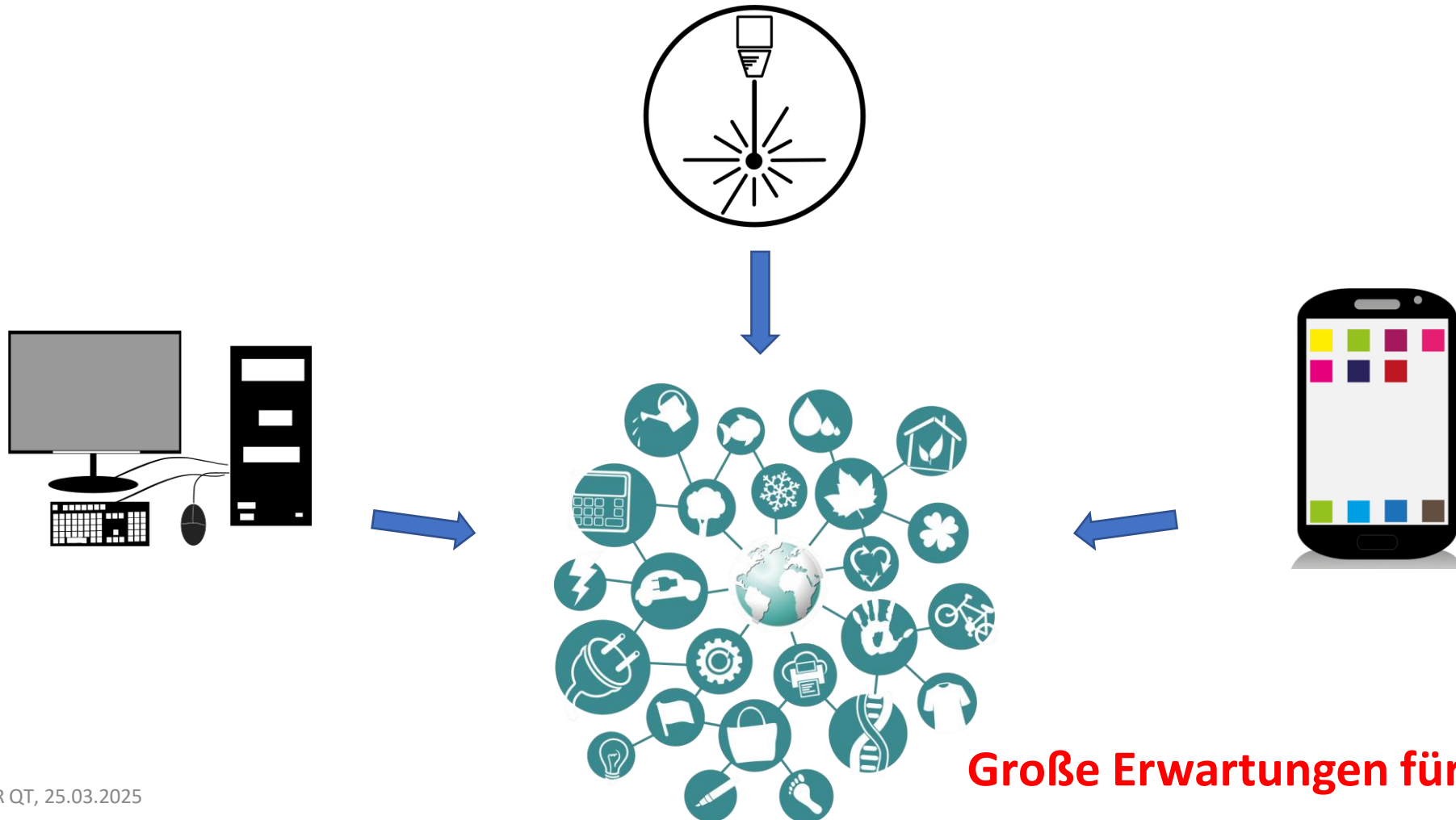
Bohr's Atommodell



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

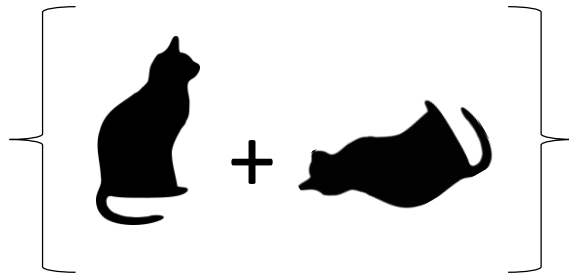


Große Erwartungen für Quantum 2.0

Quantum 2.0

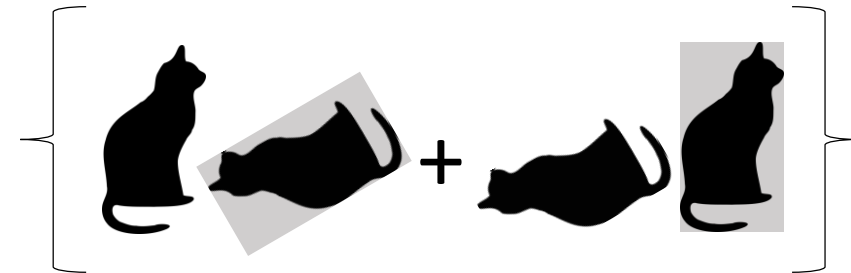
Superposition und Verschränkung

Superposition



Teilchen gleichzeitig in mehreren Zuständen
→ Schrödinger's Katze

Verschränkung

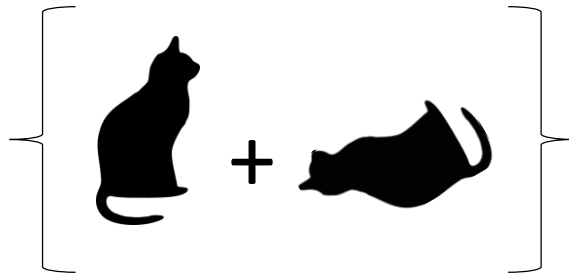


„Verschränkung über mehrere Teilchen hinweg“

Quantum 2.0

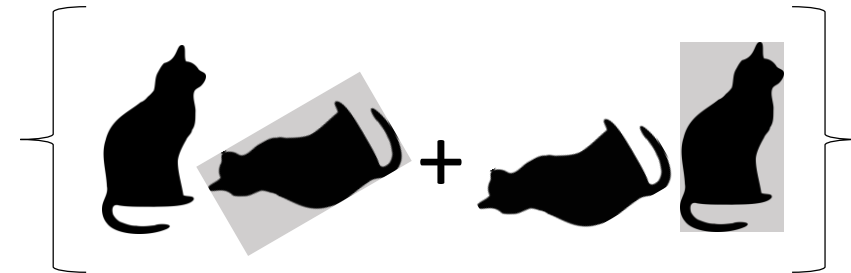
Superposition und Verschränkung

Superposition



Teilchen gleichzeitig in mehreren Zuständen
→ Schrödinger's Katze

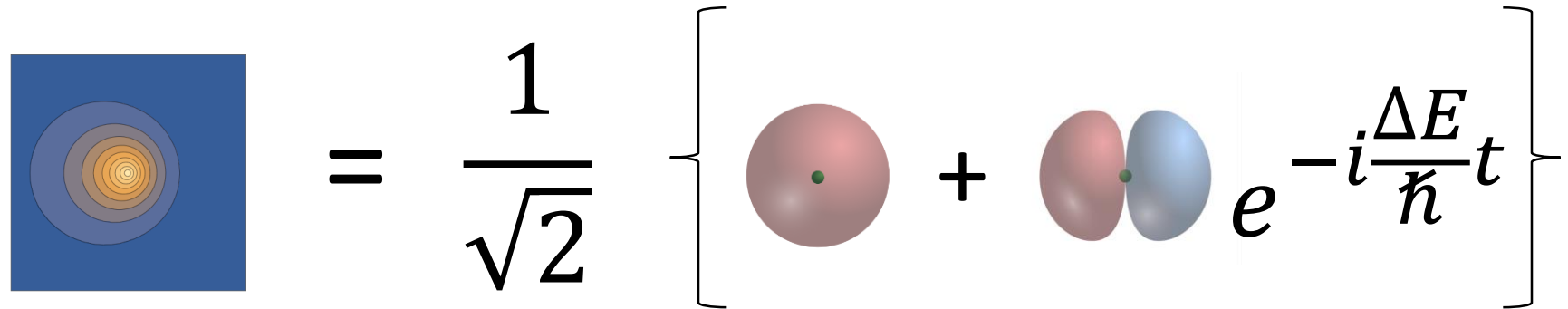
Verschränkung



„Superposition über mehrere Teilchen hinweg“

Beispiel: Superposition in einem Atom

„Schwingende Elektronenwolke“



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

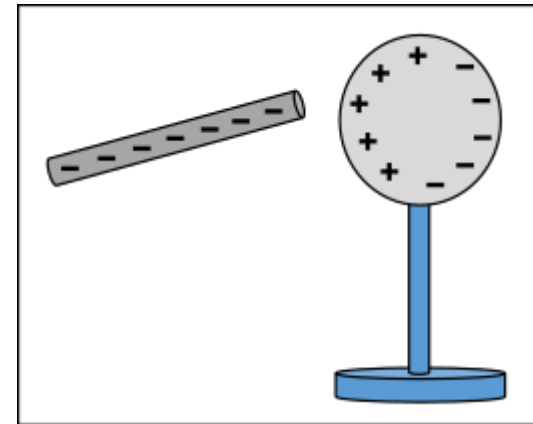
Abgewandelt von:
 By This file was made by User:Sven
 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>), CC BY-SA 2.5-2.0-1.0

Wie bringt man ein Atom zum Schwingen?

„Schubsen“ mit elektrischen Feldern



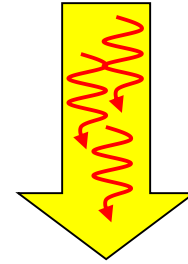
„Anschubsen“ eines klassischen Pendels



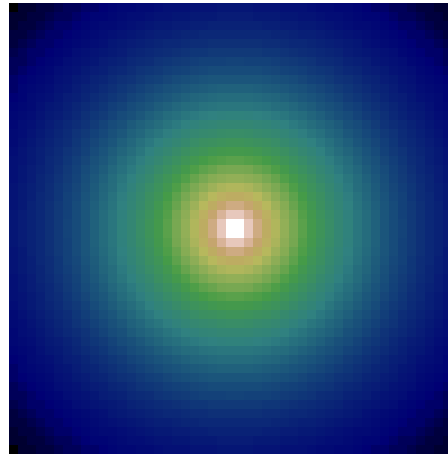
Induzierter elektrischer Dipol

Wie bringt man ein Atom zum Schwingen?

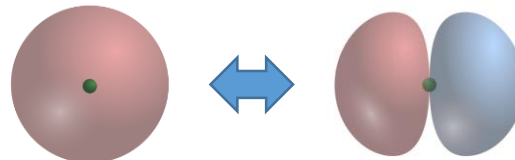
Licht-Atom-Wechselwirkung



Licht = oszillierendes elektrisches Feld
→ Periodisches „Anschubsen“



Atom = „elektrisches Pendel“



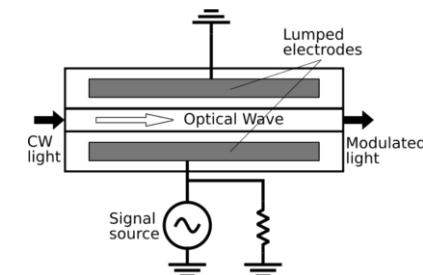
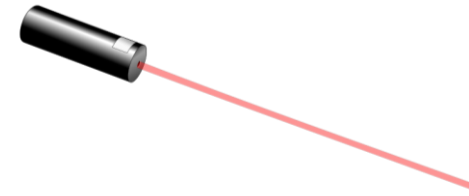
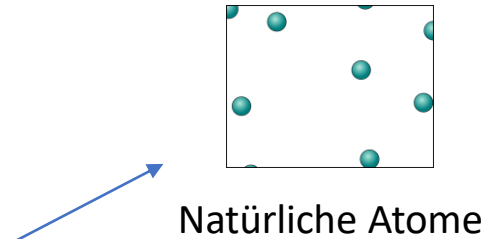
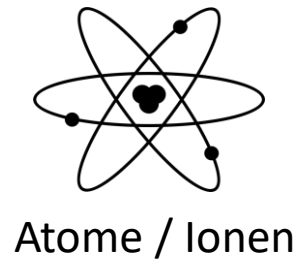
Quanteninterpretation:
Kopplung elektronischer Eigenzustände

Zutaten für die Quantentechnologie

Quantenteilchen

+

Kontrolle



Nichtlineare Kristalle
Photonische Systeme

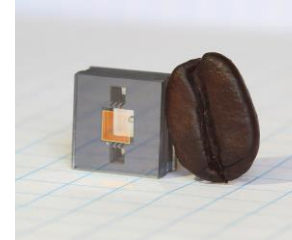
Elektronik
Software
Abschirmung
Verpackung
Nutzerschnittstelle
...

Warum sind Quantentechnologien “schwer” zu bauen?

- Kontrolle durch Radiowellen:
 - Mikrofabrikation möglich
 - **Kyrogene Umgebung notwendig**
- Photons:
 - Betrieb bei Zimmertemperatur möglich
 - **Elektro-opto-mechanische Integrationsmethoden notwendig** → Ihre Chance?

Kerntechnologien für optische QT Systeme

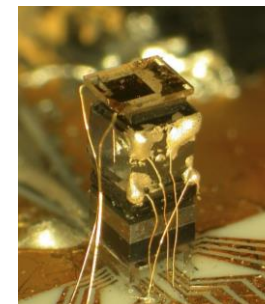
- Kompakte Vakuumzellen mit Atomen
- Leistungseffizienz: VCSEL-Laser
- Elektro-opto-mechanische Integration



NIST Chip Scale Atomic Clock
Vacuum Package



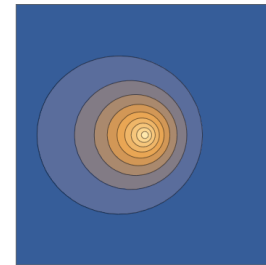
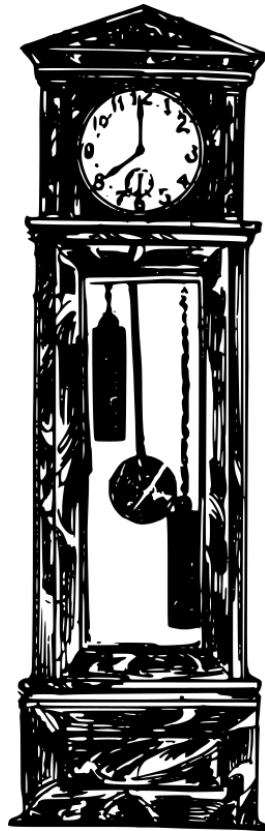
MHz Linienbreite, mW Leistung



NIST Chip Scale Atomic Clock
Physics Package

Wie funktionieren Quantenuhren?

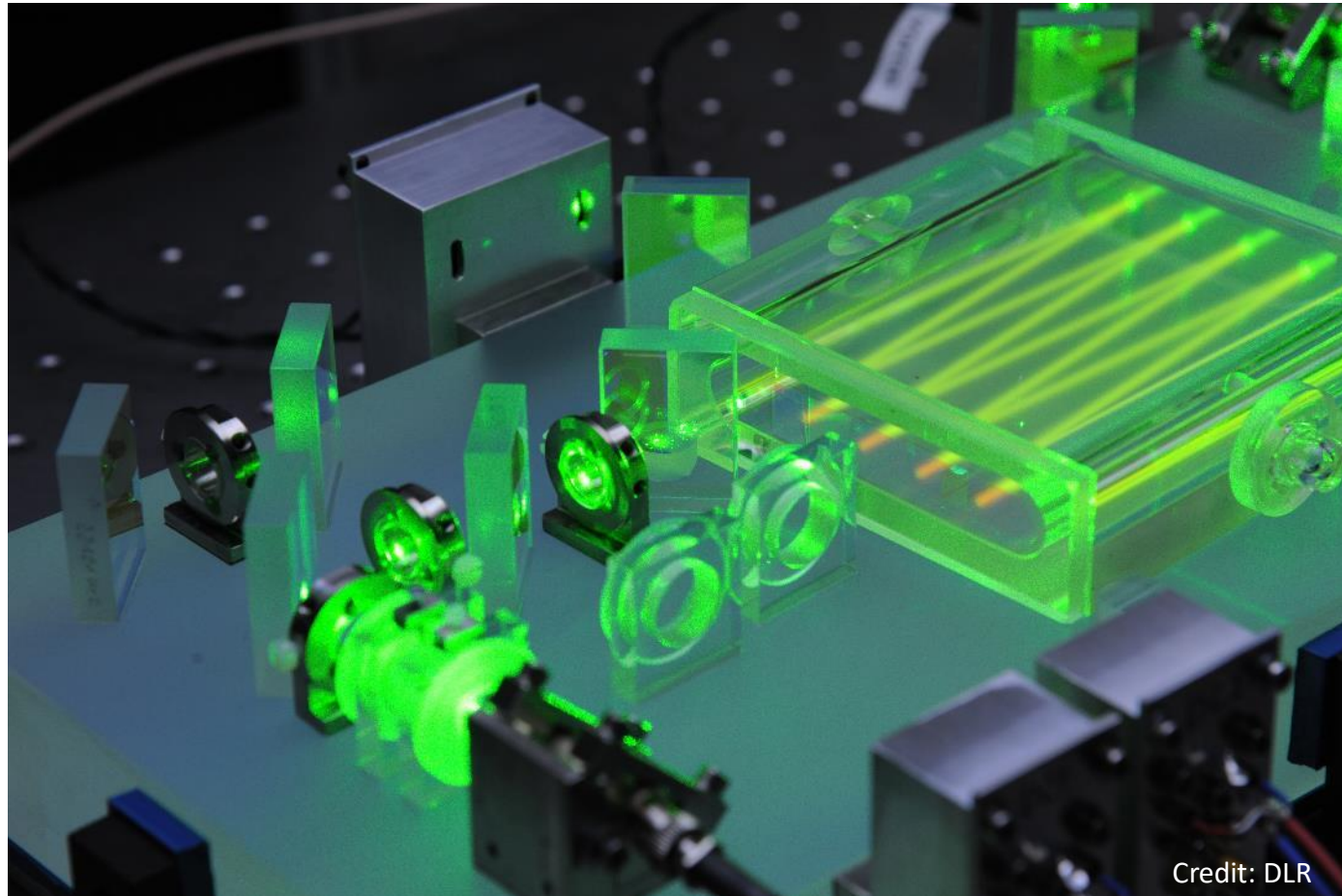
Eine Quantenuhr ersetzt den Oszillator (z.B. Pendel) einer Uhr mit einem Atom



Reproduzierbar und präzise durch Naturgesetze

So sieht es in der Praxis aus

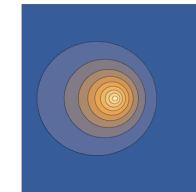
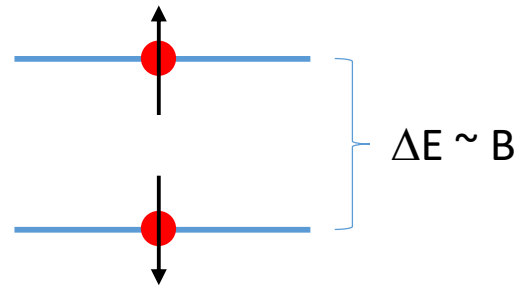
DLR JodUhr



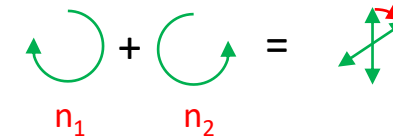
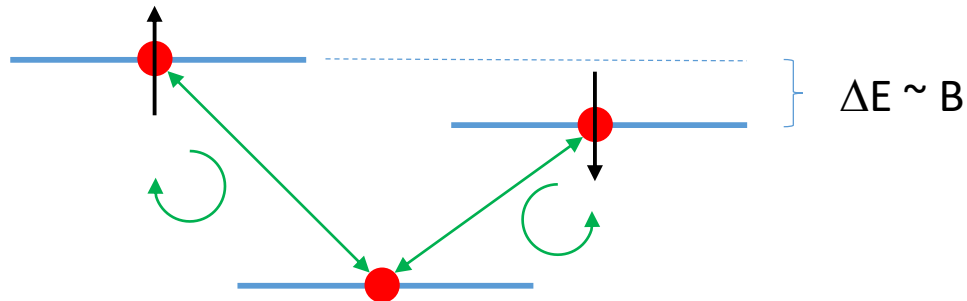
Credit: DLR

Quantum Magnetfeldsensoren

Energieniveaus abhängig vom Magnetfeld



Schwingungsfrequenz hängt vom Magnetfeld ab

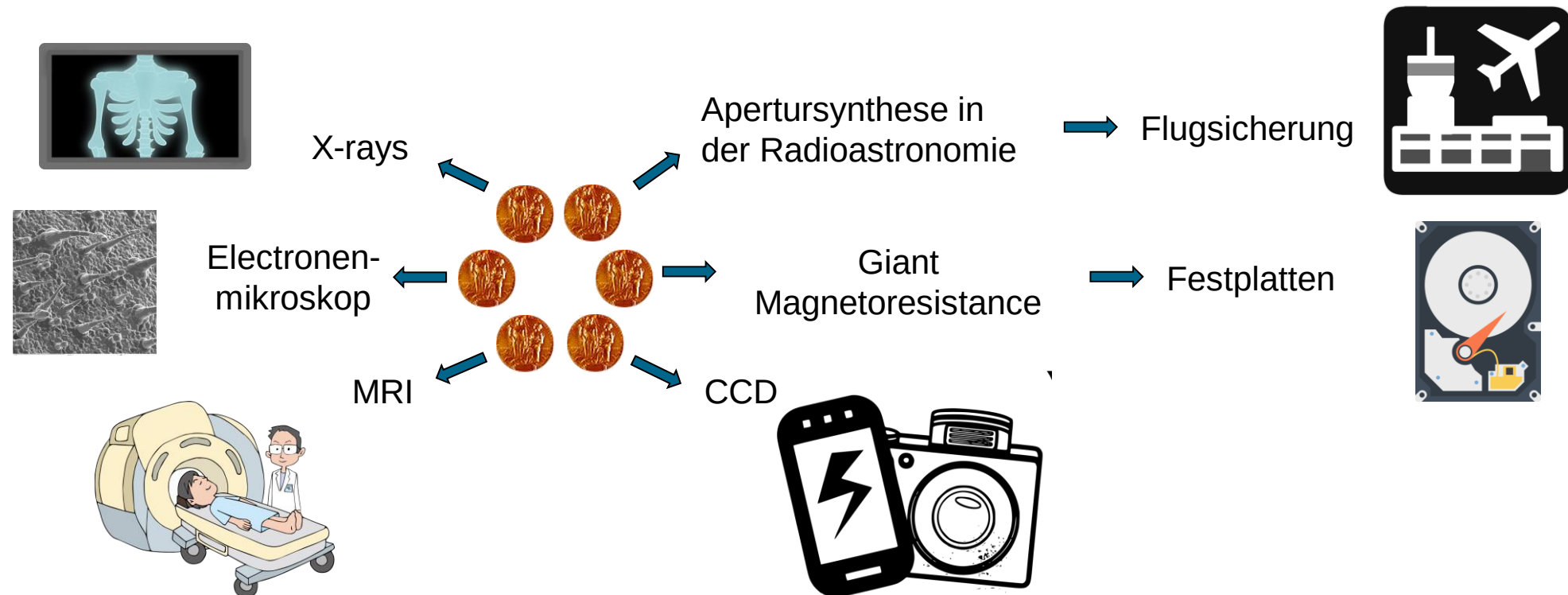


Änderung der Polarisationssebene

Chance für disruptive ErfinderInnen

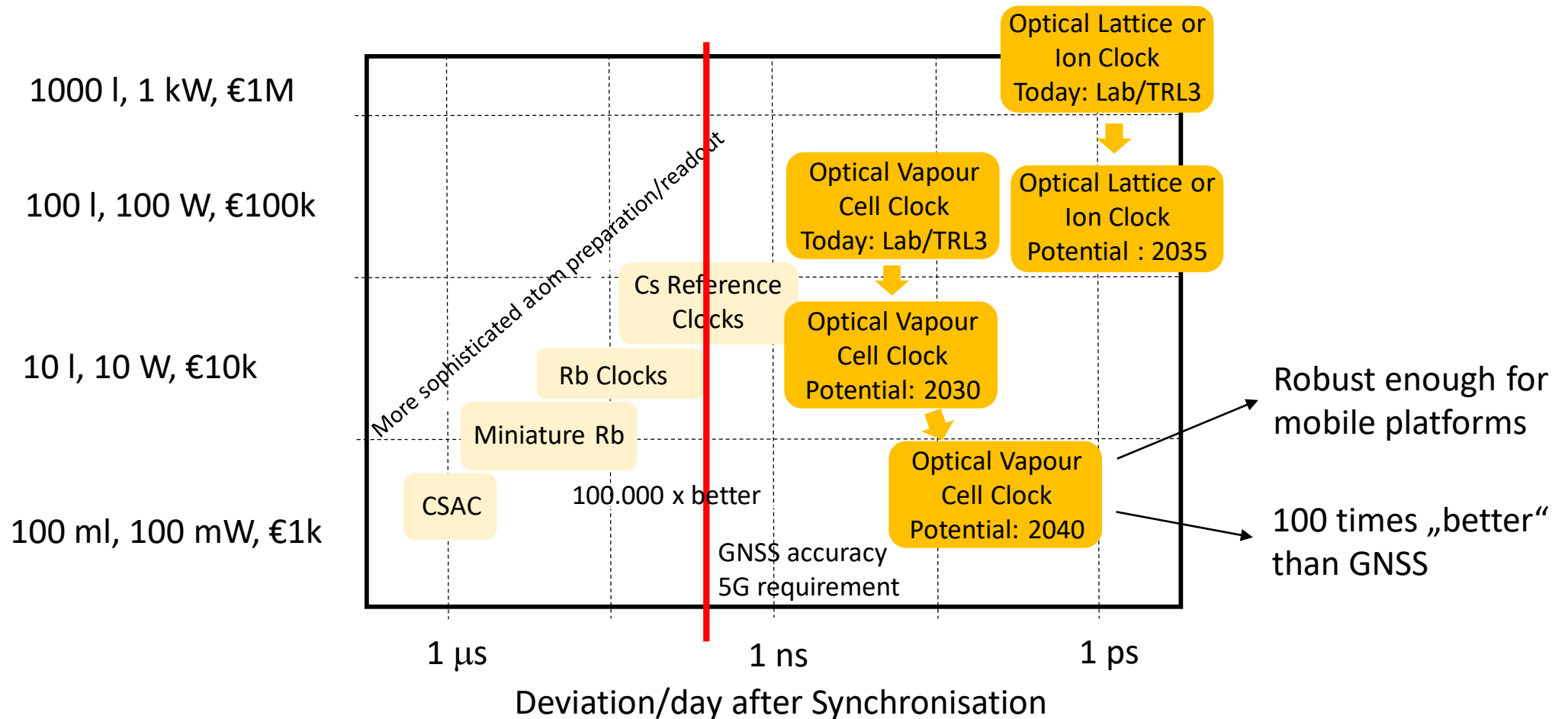
Sensoren und Uhren ermöglichen traditionell Anwendungen mit großem Impact-Potenzial

- Historische Beispiele anhand von Sensor-Nobelpreisen



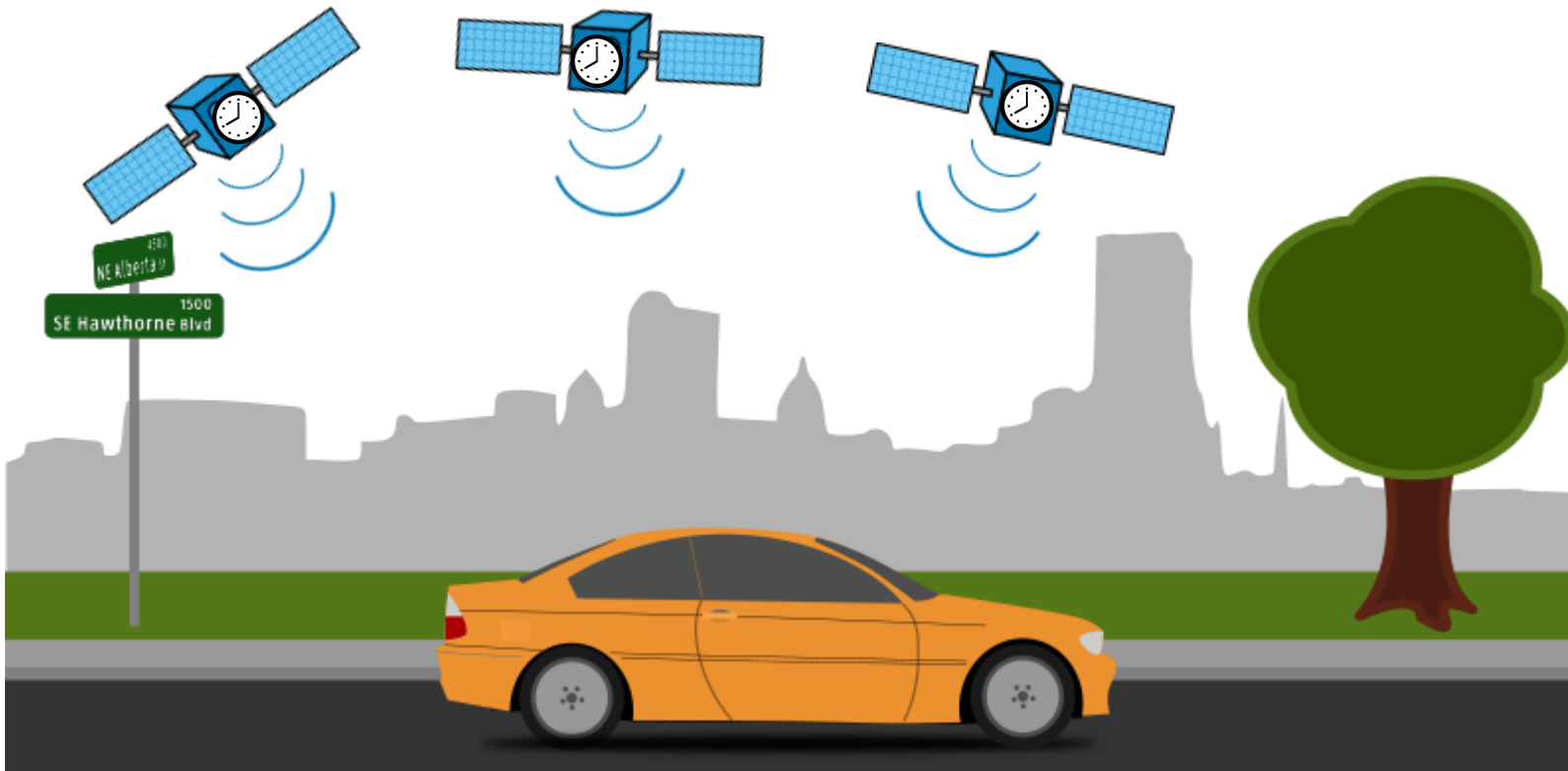
Einzigartige Eigenschaften

Quantenuhren: Genauigkeit



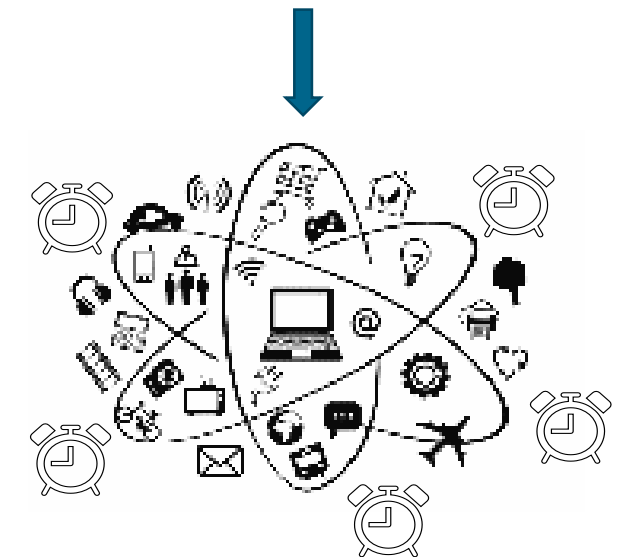
Quantenuhren für Navigation und Zeit

Quantenuhren ermöglichen Satellitennavigationssysteme



Navigation

Impact: 5-10% of GDP



Synchronisation

Zeit – die „Unsichtbare Ressource“

- Satellitennavigation
- Datennetze
- Energienetze
- Finanztransaktionen
- Verteilte Datenbanken
- Verteiltes Computing
- Internet of Things
- Industrie 4.0
- Cloud robotics
- ...

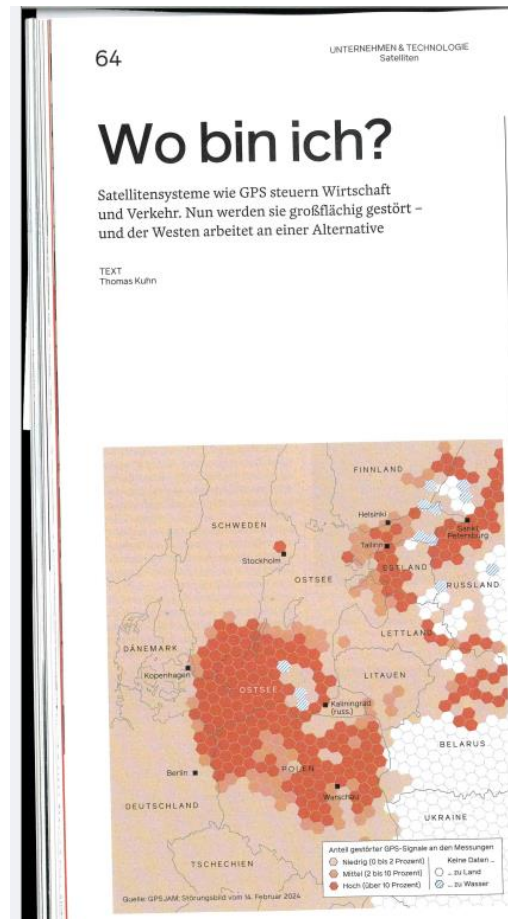
Ermöglicht durch Synchronisation

Vergleich:
kritische Materialien

GNSS kritische Abhängigkeiten

Notwendigkeit von unabhängigen Alternativen

UK Blackett
Report
2018



FEDERAL REGISTER

The Daily Journal of the United States Government

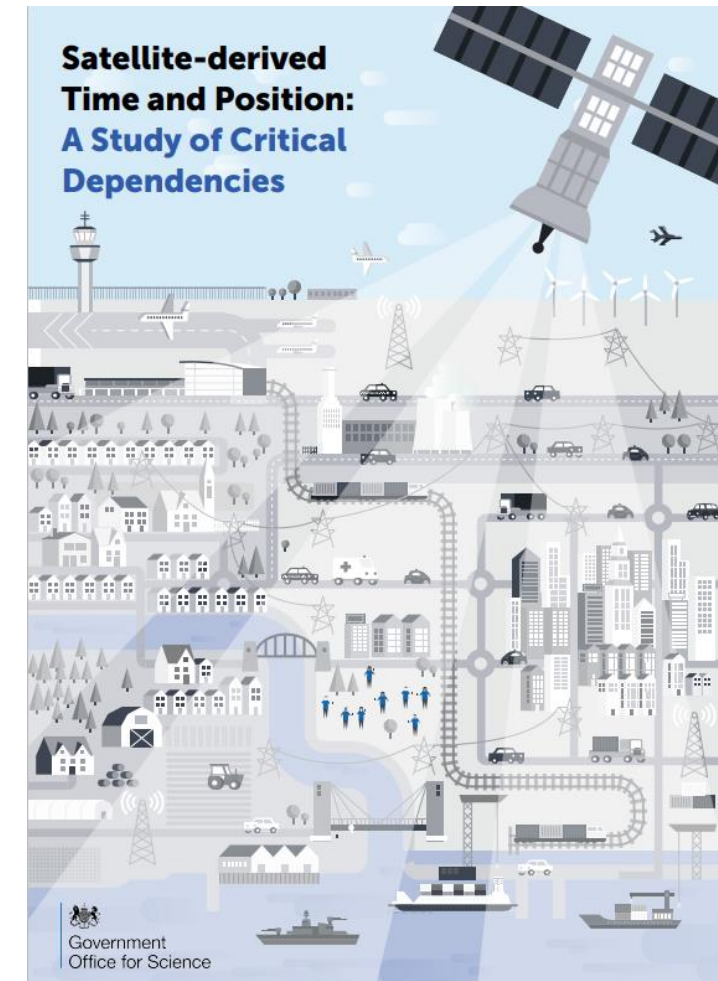


PD Presidential Document

Strengthening National Resilience Through Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing Services

A Presidential Document by the Executive Office of the President on 02/18/2020

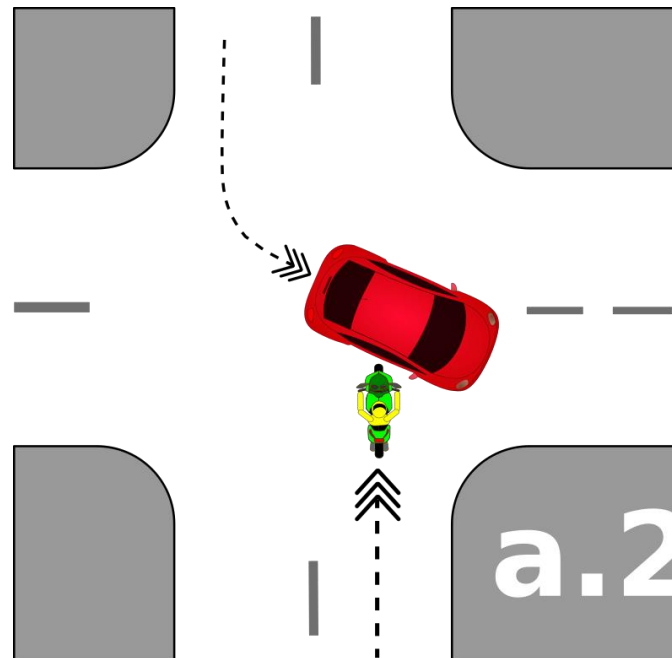
Wirtschaftswoche 10, 2024



Zukunftsanwendung Vernetzte Autonomie

Vernetzung der autonomen Fahrzeuge benötigt „Echtzeit“

„Ich bin in 300 ms an der
Kreuzung und biege links ab“



„Ich überquere die Kreuzung in 100 ms“

Innovationsideen mit Quantenuhren



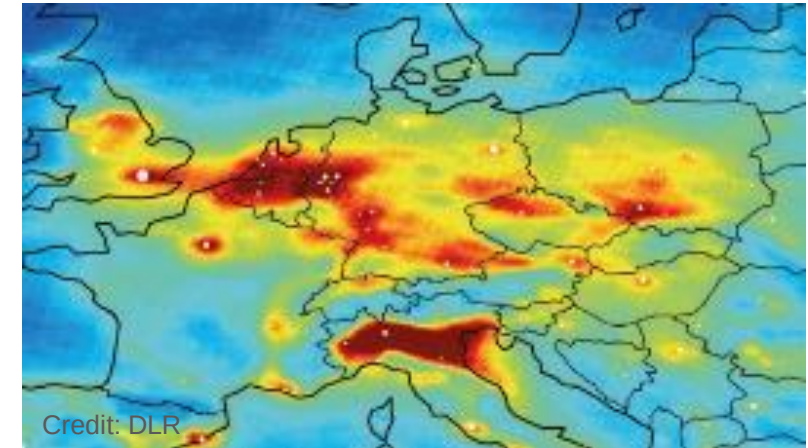
Kommunikation



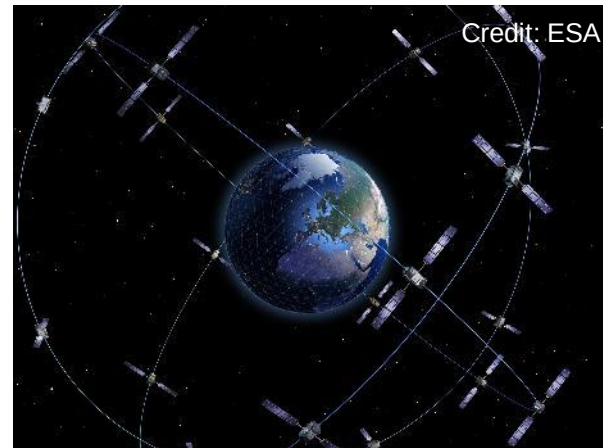
3D Radar



Urban Flight



Global Height Reference



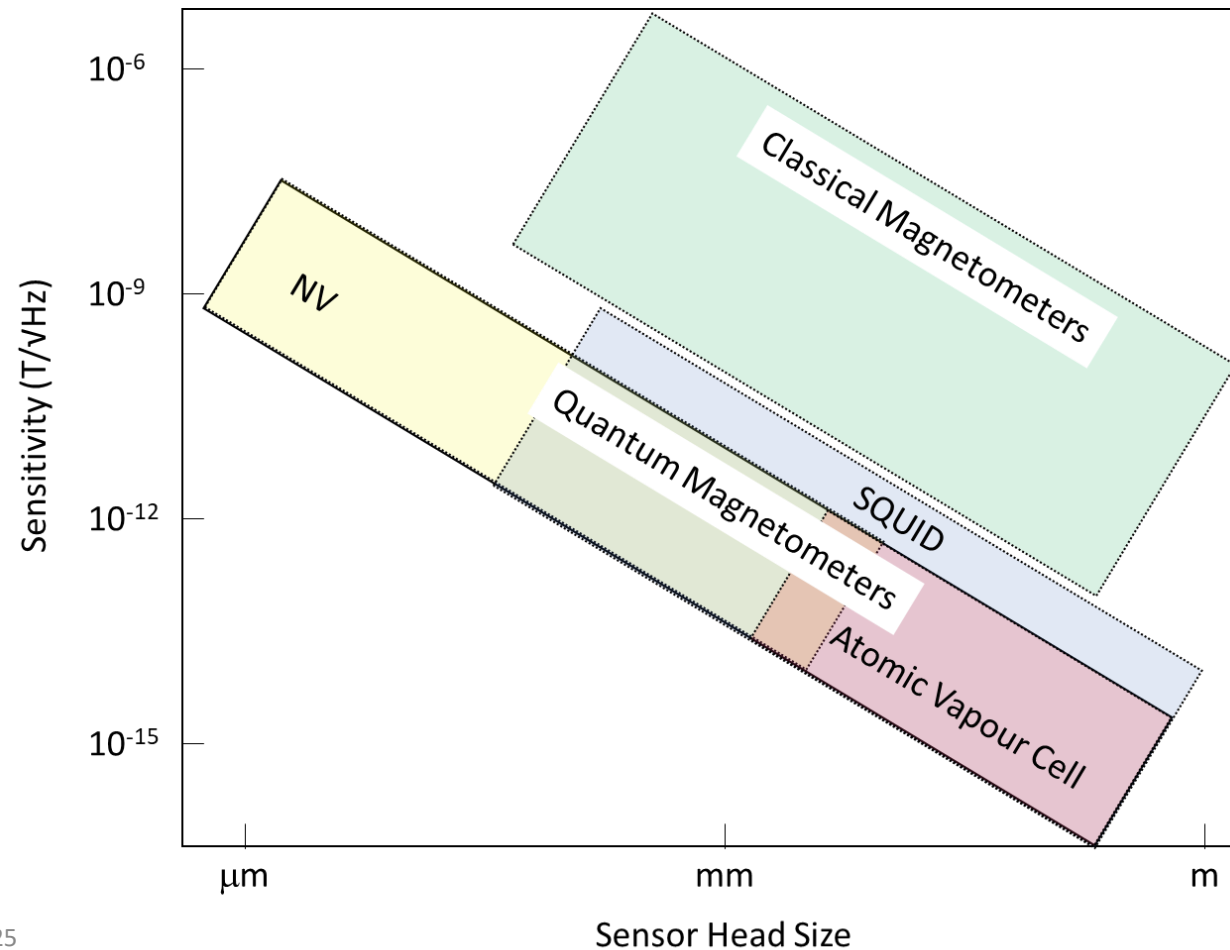
Satellitennavigation



Autonome Fahrzeuge

Einzigartige Eigenschaften

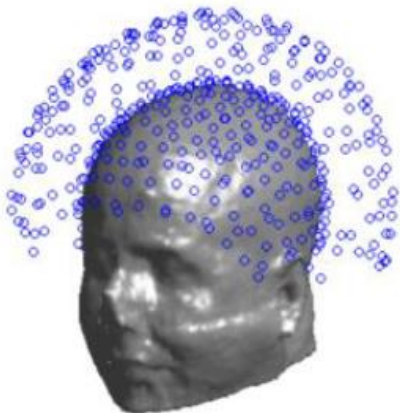
Quantenmagnetometer: Höchste Empfindlichkeit bei Raumtemperatur



OPM-MEG development – 2015 – 2019 - Adaptation to Head Size



Conventional
MEG



On scalp MEG
simulations 2016



Single channel
recording 2017



First wearable
OPM array 2018



First paediatric
helmet 2019

A new
generation of
quantum
sensors have
enabled
'wearable' brain
imaging
technology



50 channel whole
head system 2020



First simultaneous
OPM/EEG 2019

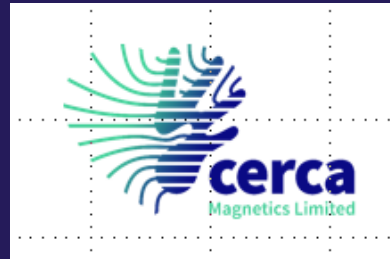
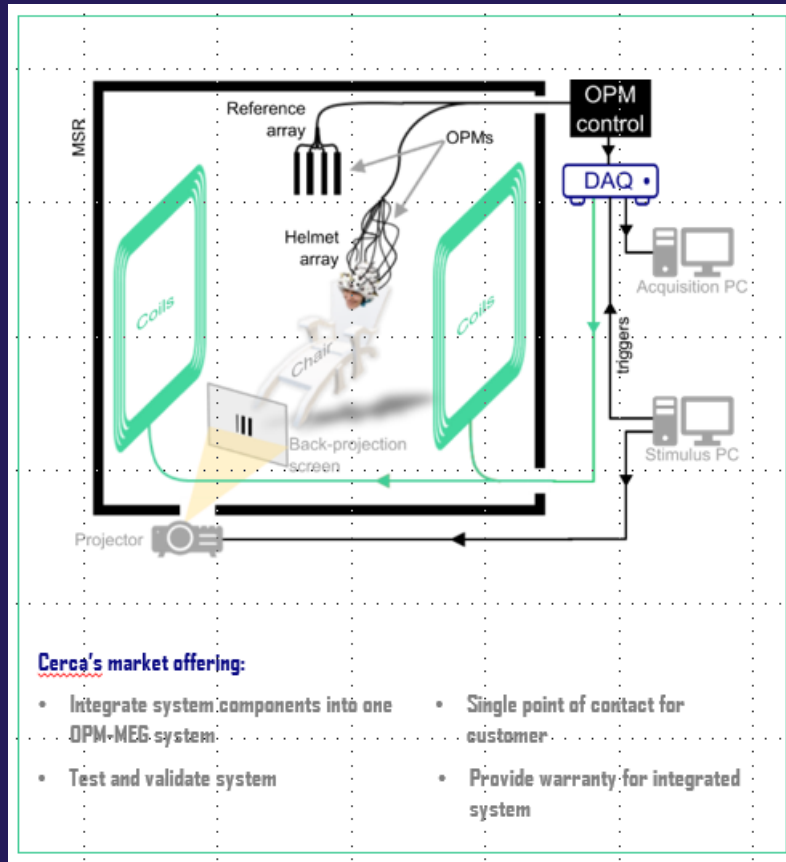


First Gen II OPM
recordings 2019

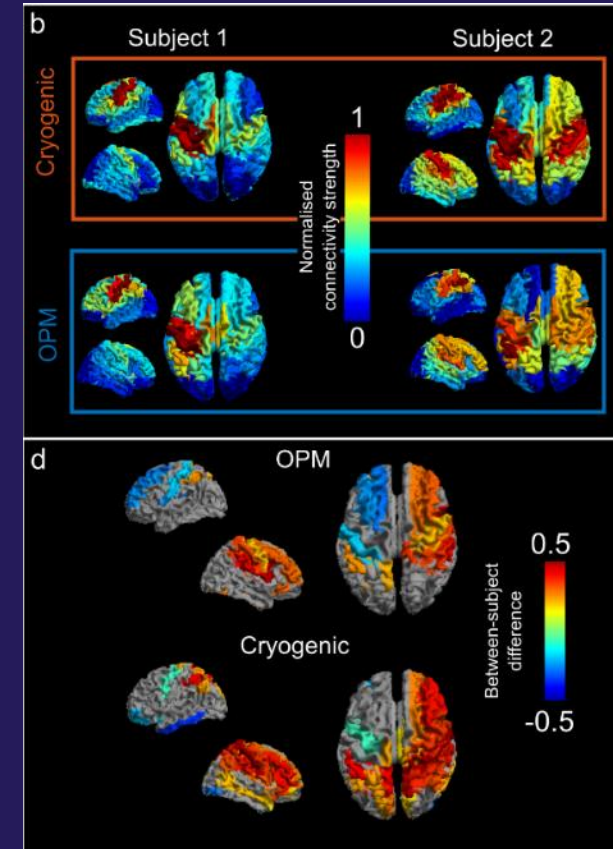


First VR-MEG
recording 2019

Its here NOW: Commercial Offering



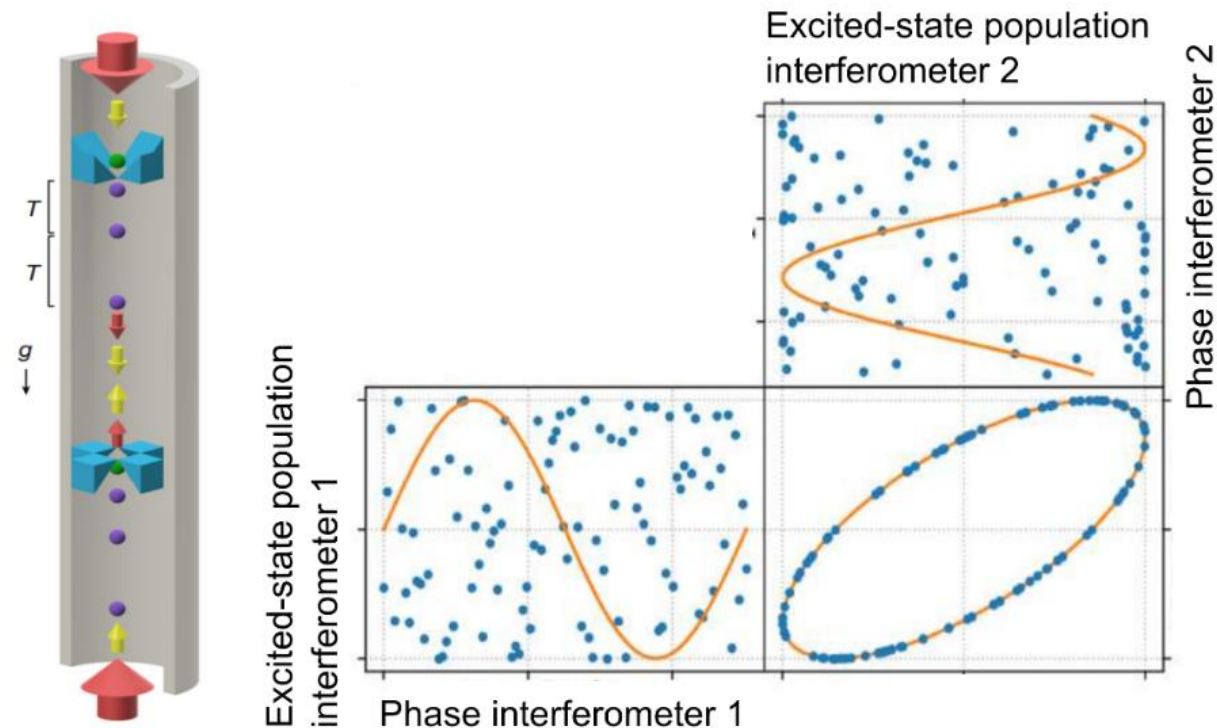
Joint venture between
University of Nottingham
and Magnetic Shields Ltd.



Einzigartige Eigenschaften

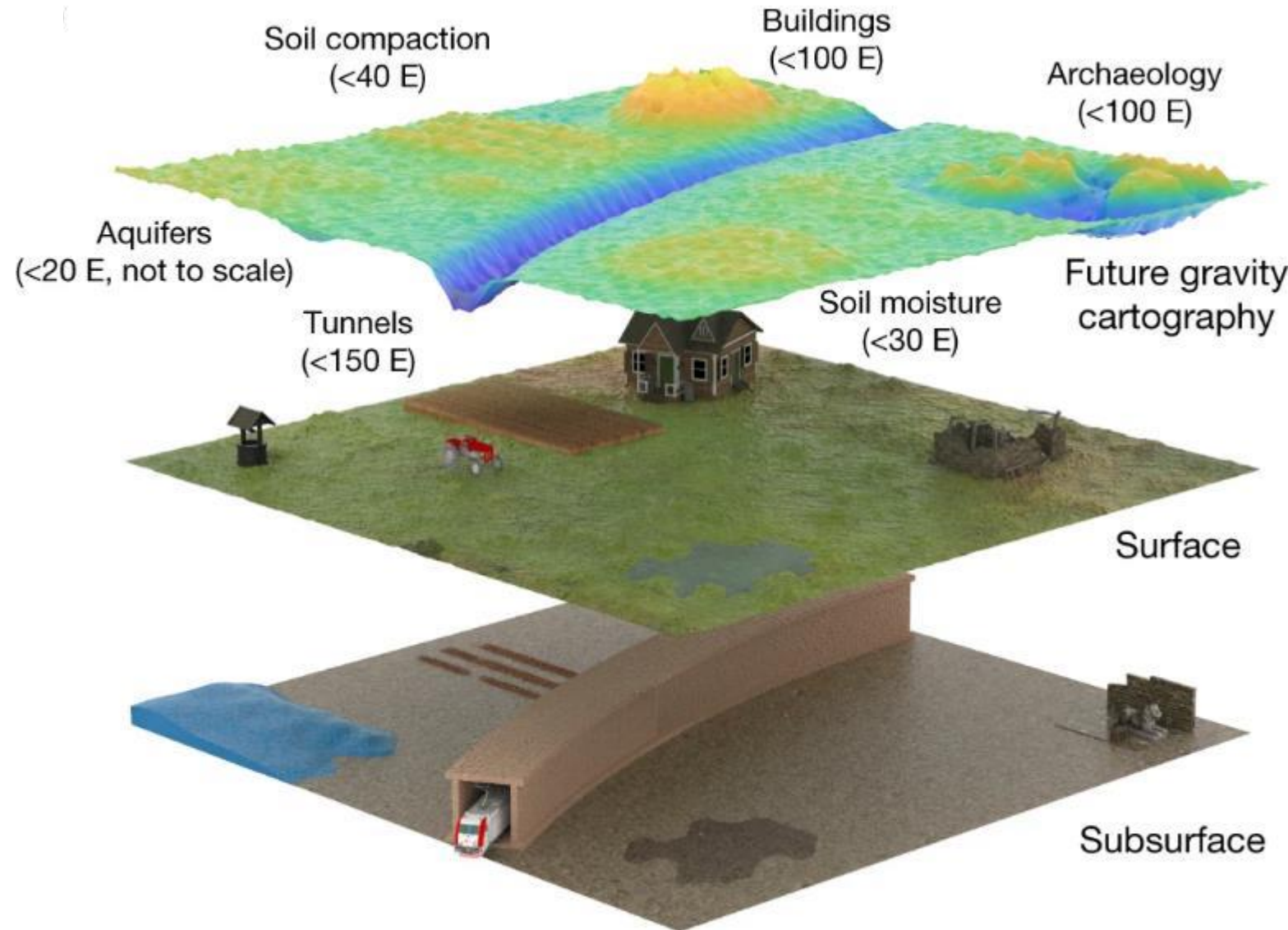
Quanteninertialsensoren: keine Drift und exakter Skalenfaktor

→ Beste Gleichtaktunterdrückung

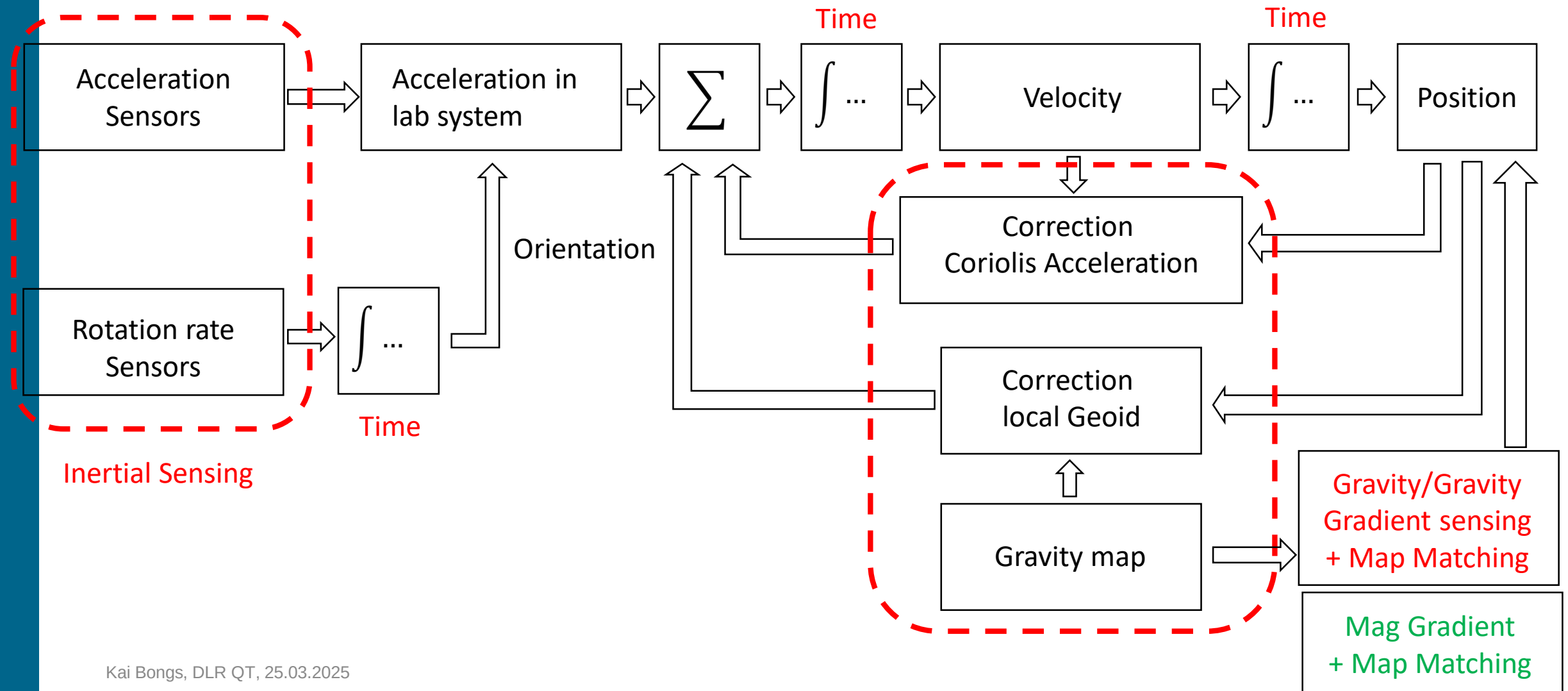


Enabling Gravity Cartography

- Relevant to a range of applications, including:
 - Water monitoring
 - Infrastructure
 - Archaeology
 - Agriculture
 - Navigation



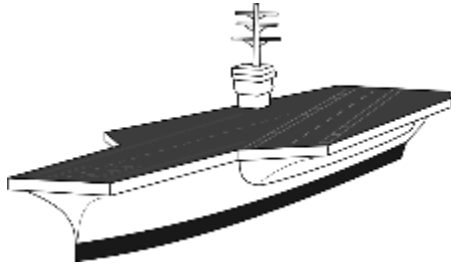
Schema: Quantennavigationssystem



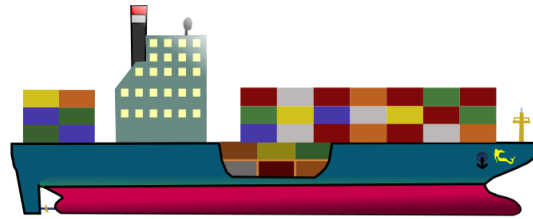
Markt Roadmap für Quantennavigation



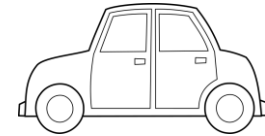
Kosten und Regulation entscheidend



Strategic platforms



Autonomous ships and
underwater vehicles



Autonomous vehicles

2030

2040

2050

Unit cost

xM€

xxxk€

xxx€

Market
volume

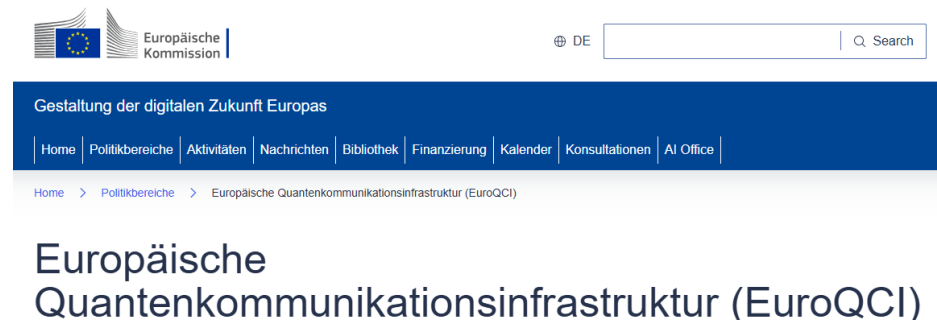
xxM€

xxxM€

xxxxxM€

- Informationsübertragung mit Qubits
→ z.B. einzelne Photonen
- „No cloning theorem“
→ Qubits können nicht vervielfältigt oder kopiert werden
- Anwendungen:
 - Sichere Informationsübertragung
 - Verteiltes und geheimes Quantencomputing
 - Quanten-Authentifizierung
 - ...

- Es passiert JETZT:



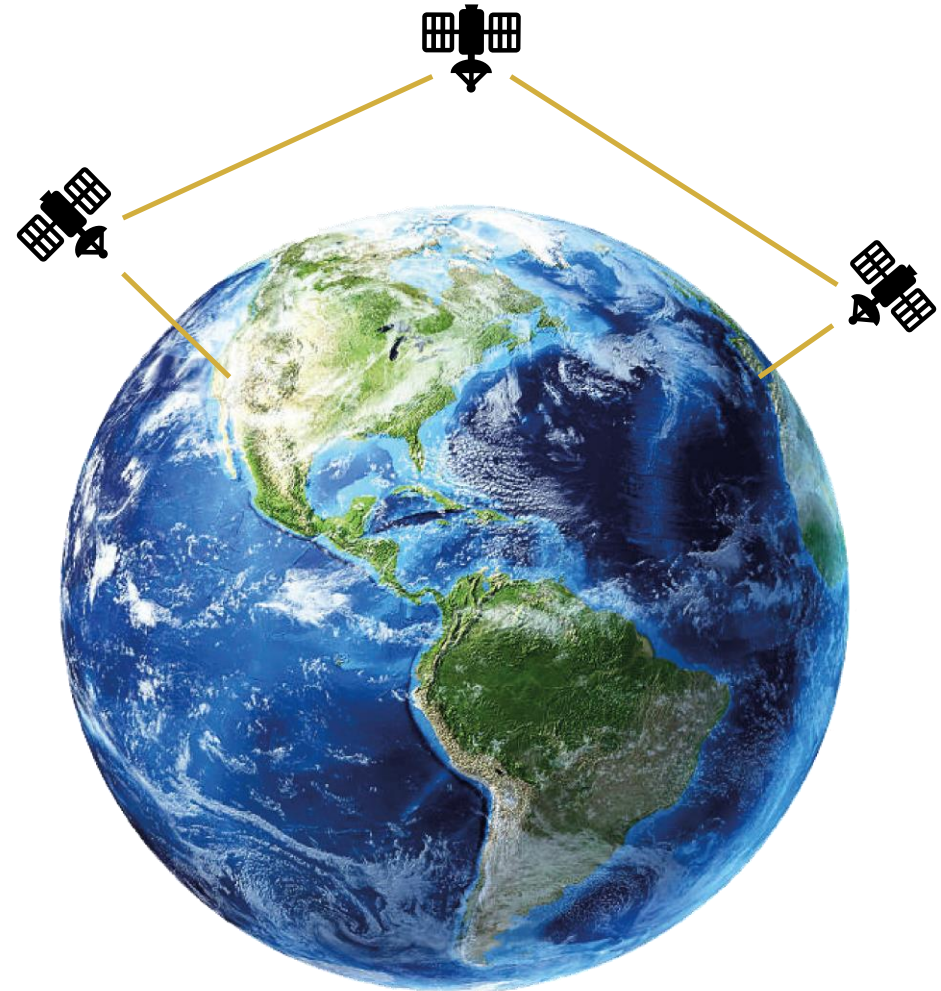
Sichere Kommunikation auf globaler Skala

Mit Glasfaserkabeln ≈ 100 km Reichweite

Globale Verschränkung über Satelliten

- Quantenkryptographie
- Geheimes Quantencomputing
- Quanten-Authentifizierung

→ Ihre Anwendungsideen sind gefragt



https://www.iotworldtoday.com/quantum/quantum-tokens-delivered-over-fiber-optics-in-world-first

Links im DLR - Institut... WebPostKorb 3.2 -... Opendclipart - Clippi... DLR IEP Global Forum on Te... Mein pers...

IOT WORLD TODAY

in f y X

Flying Vehicles ▼ Smart Cities ▼ Transportation ▼ Robotics ▼ IIoT ▼

Quantum Tokens Delivered Over Fiber Op First

Demonstration using fiber network and QKD hardware targets ultra-secure trading w

 **Berenice Baker**, Editor, Enter Quantum, co-editor AI Business
November 18, 2024 2 Min Read



QUANTINUUM VIA YOUTUBE

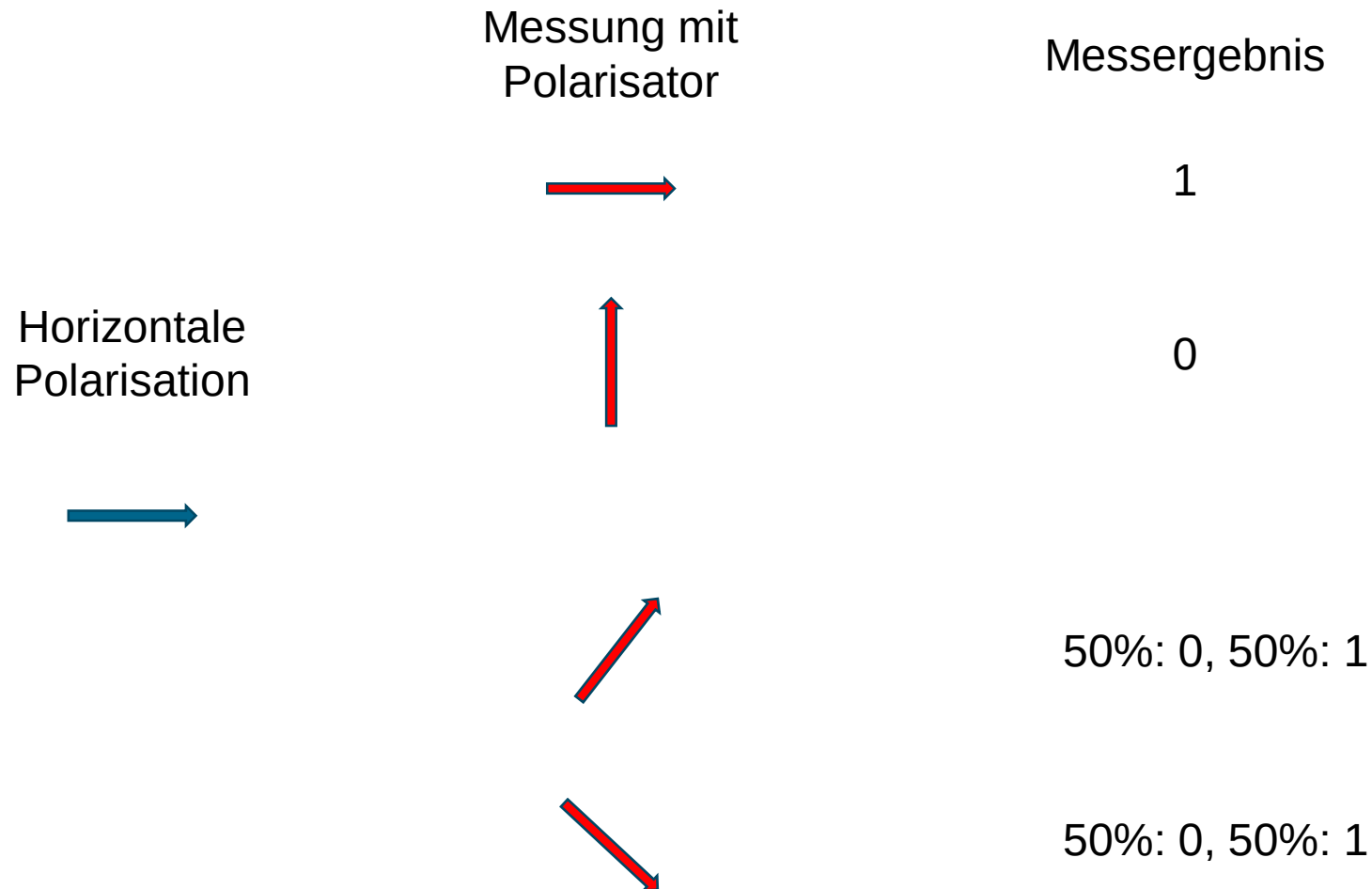
Quant
JPMorg
Adopti
Mar 24, 2
Quant

Fragen ?

- Quantentechnologie ist teilweise schon jetzt verfügbar
 - Quantenuhren ermöglichen große Teile der Wirtschaft und unterstützen kritische nationale Infrastruktur
 - Quantensensoren unterstützen neue Medizintechnik
 - Quantennetze versprechen Daten-Sicherheit
 - Quantencomputer werden bestimmte Probleme lösen
-
- Viele Anwendungen können noch entdeckt werden
→ Chancen für UnternehmerInnen

Photonen als fliegende Qubits

- Beispiel: Information kodiert im Polarisationszustand



Quanten-Schlüssel-Übertragung

BB84 Protokoll

