“Quanten-Wunderwelt” und Einführung in die Quantensensorik

Peter Burgholzer

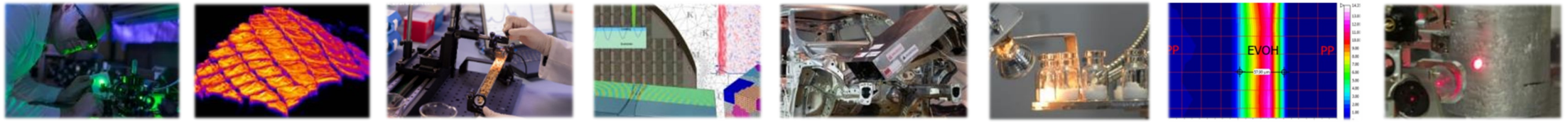
Altenberger Straße 69, 4040 Linz, Austria

www.recendt.at

RECENDT
RESEARCH CENTER NON DESTRUCTIVE TESTING

upper austria

Member of UAR INNOVATION NETWORK



RECENDT - REsearch CEnter for Non-Destructive Testing





Science Park @ Johannes Kepler University
Linz, Austria

upper austria

Member of UAR INNOVATION NETWORK

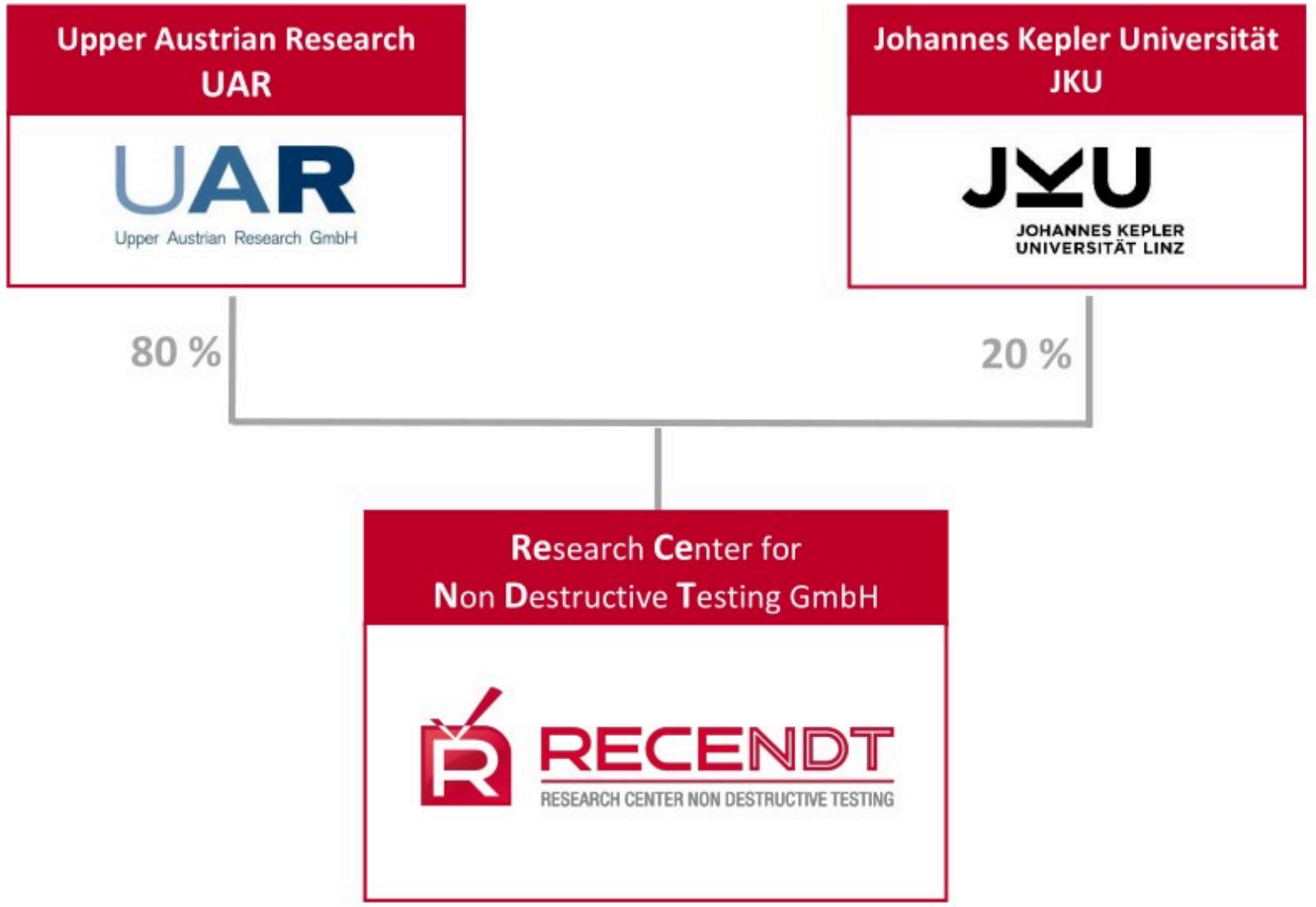
- Gegründet 2009 aus der Sensorikabteilung der UAR
- ~40 Forscher:innen
- Geförderte Forschungsprojekte national (FFG, FWF,…) und international HEU, …)
- Auftragsforschung



7 Research Groups	**IR-Raman** Infrared & Raman Spectroscopy	**QS** Quantum Sensing	**LUS** Laser-Ultrasound
OCT Optical Coherence Tomography	**THz** Terahertz Technology	**PA** Photoacoustics	**PCA** Physical & Computational Acoustics

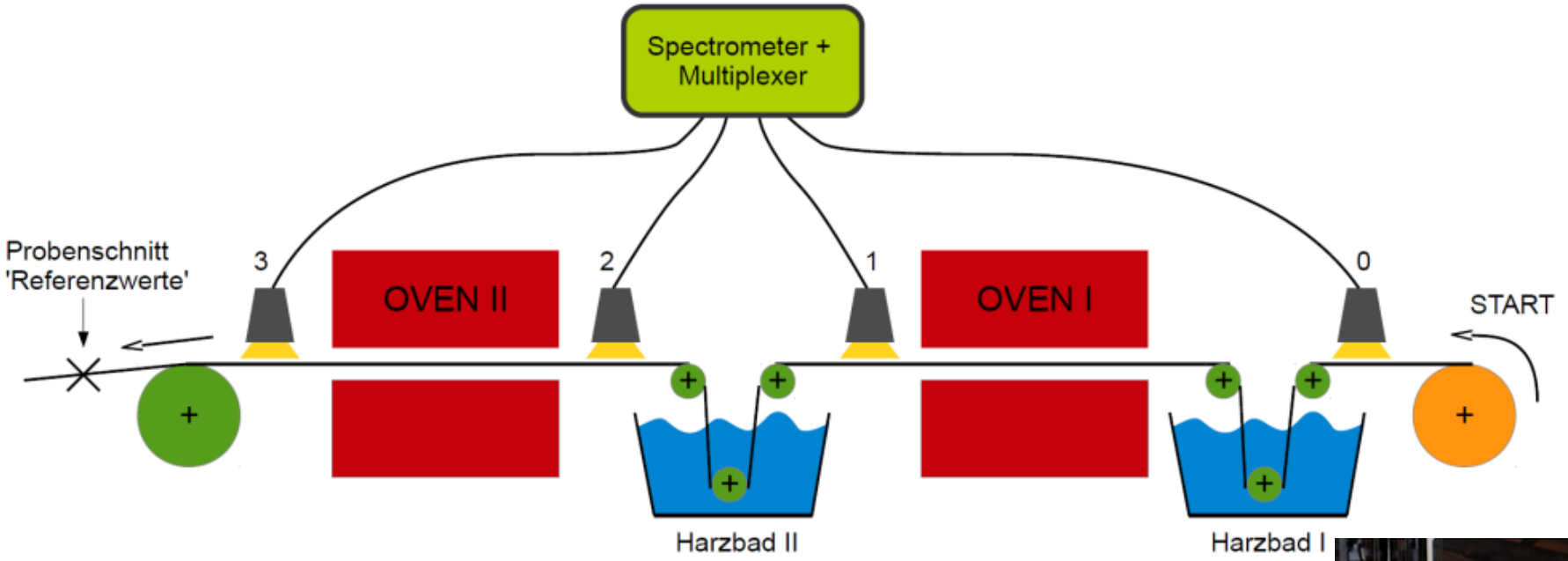


About RECENDT



upper austria

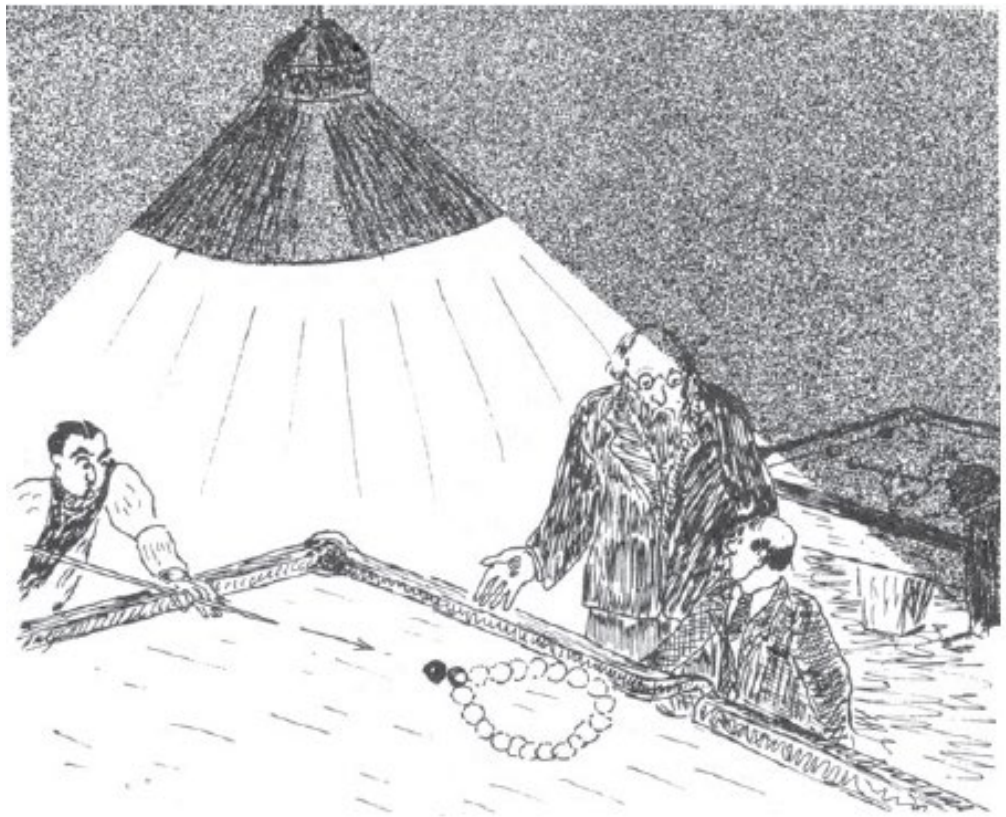
In-Line Prozess- und Qualitätskontrolle





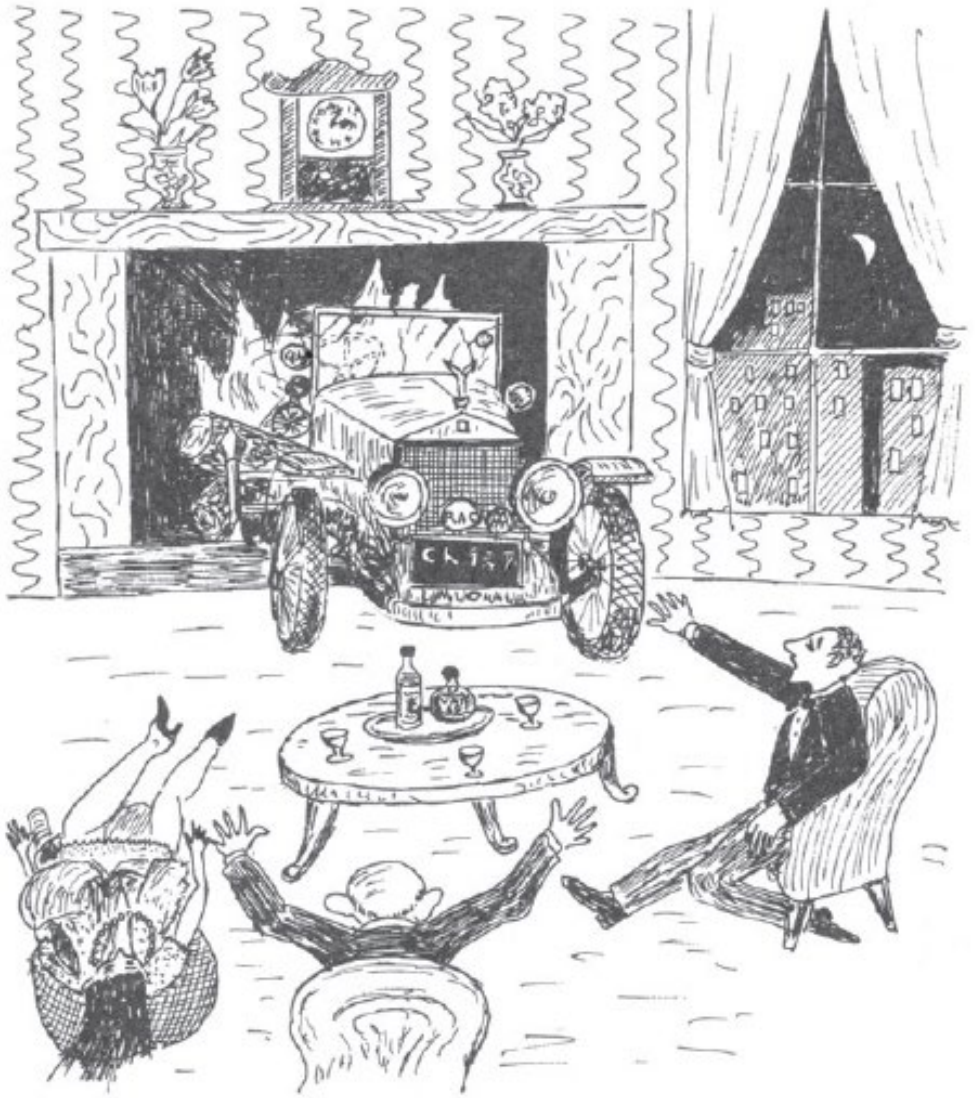


Quanten-”Wunderwelt”: Unschärfe und Zufall



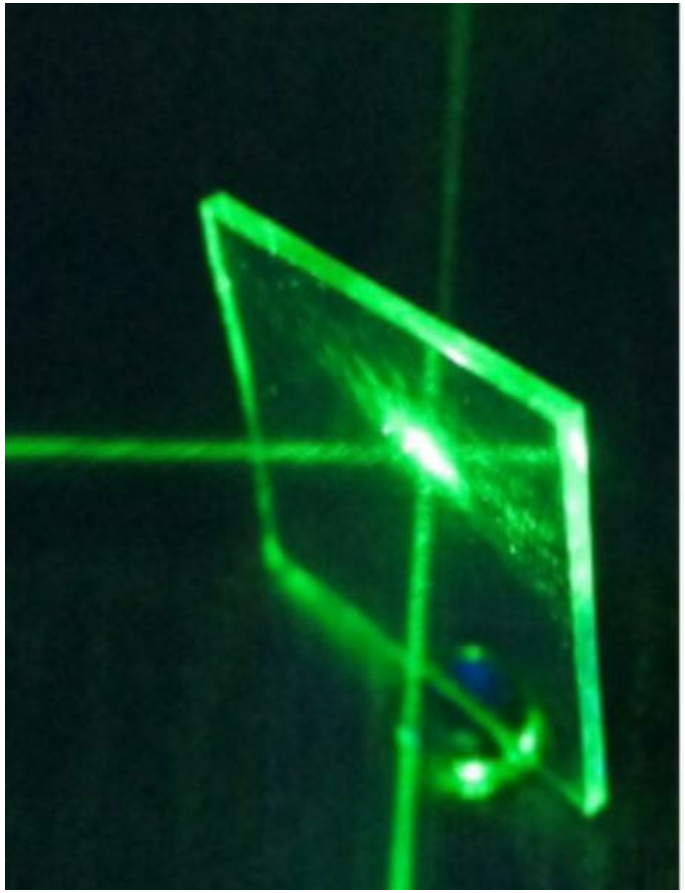
Der weiße Ball rollt in alle Richtungen.

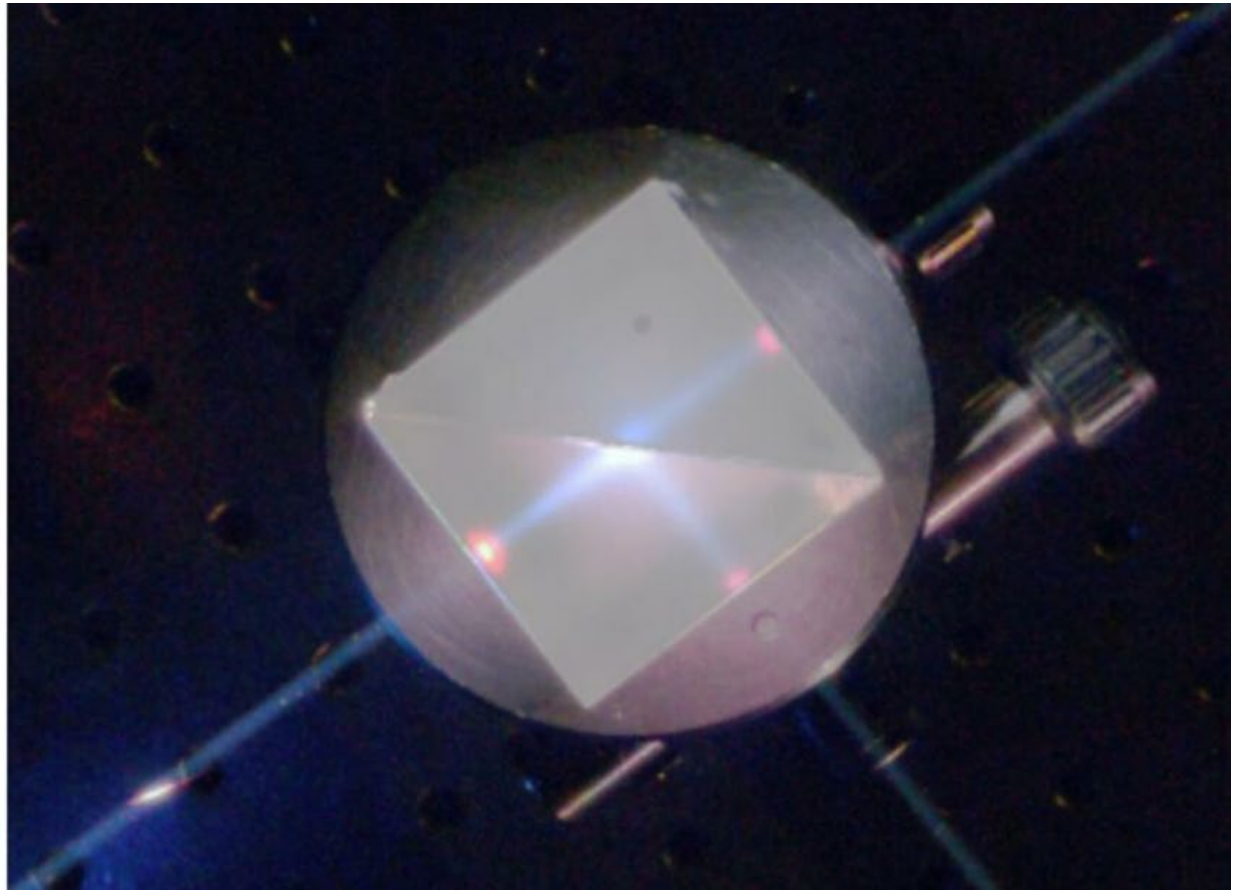
M[iste)r Tompkins seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos/George Gamov. Wiesbaden: Vieweg, 1980.



Das Auto erschien wie ein Geist aus dem Mittelalter.

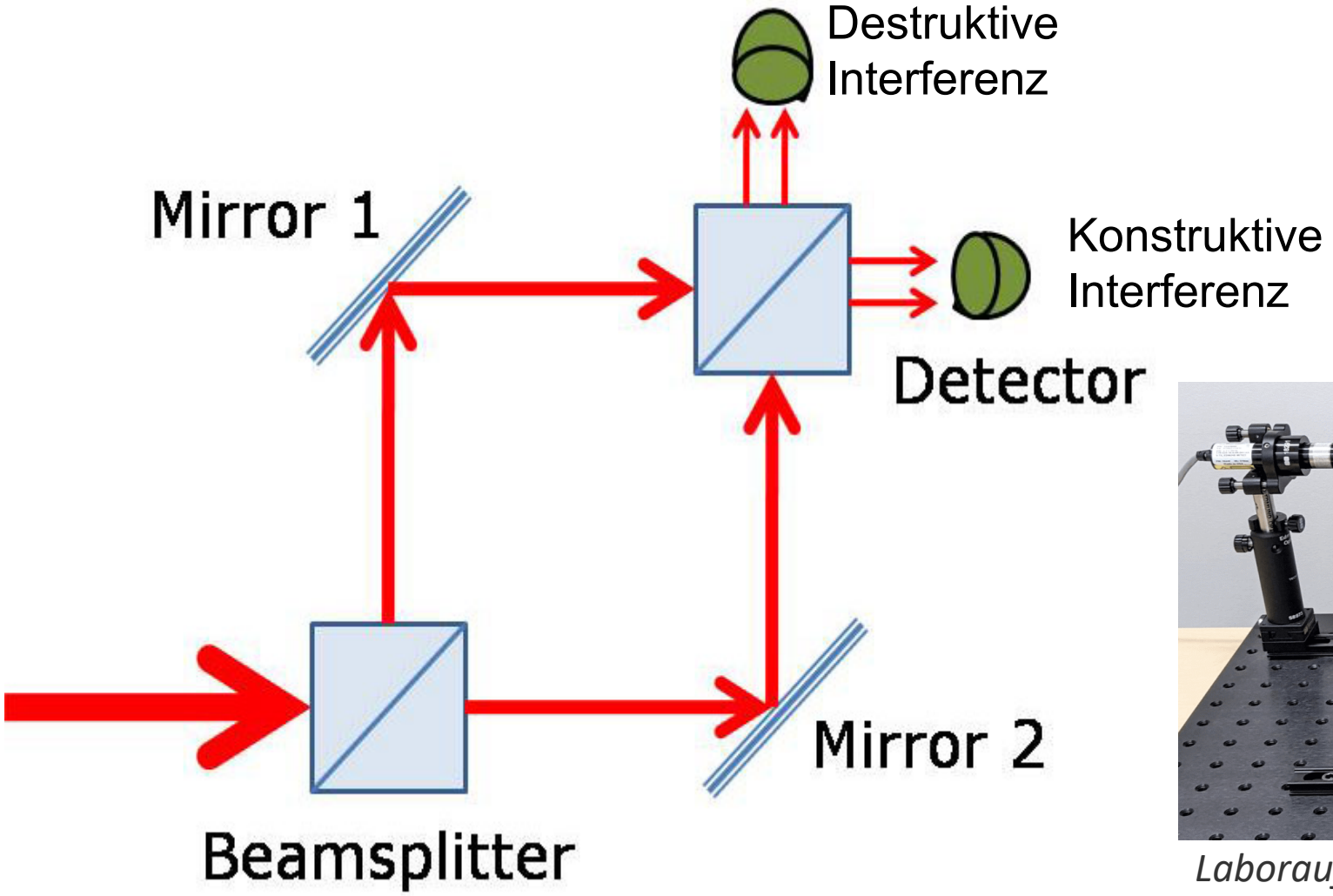
Strahlteilerplatte und –würfel (Beamsplitter)



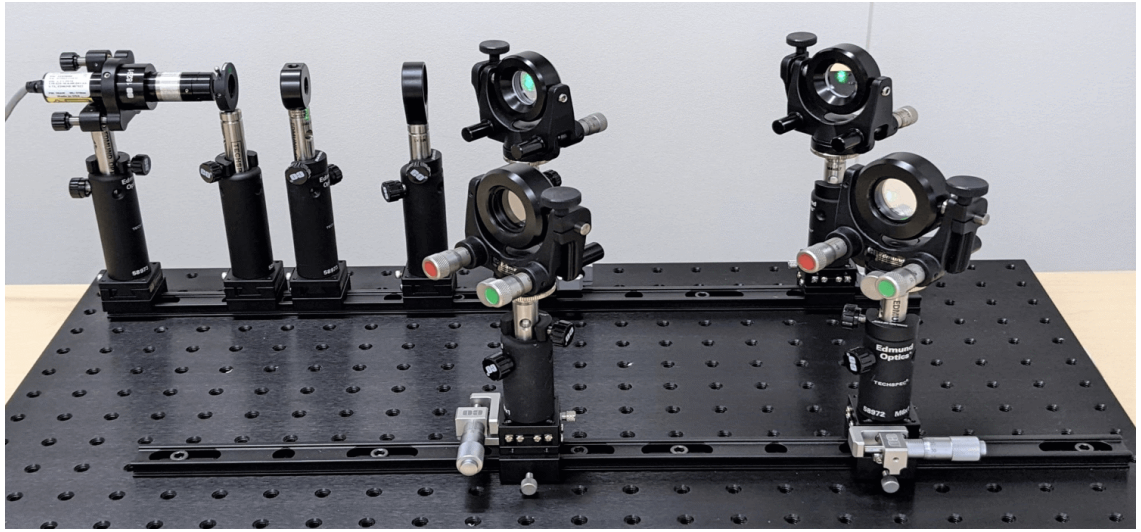


Müller, Rainer; Greinert, Franziska. Quantentechnologien (De Gruyter Studium)

Mach-Zehnder-Interferometer

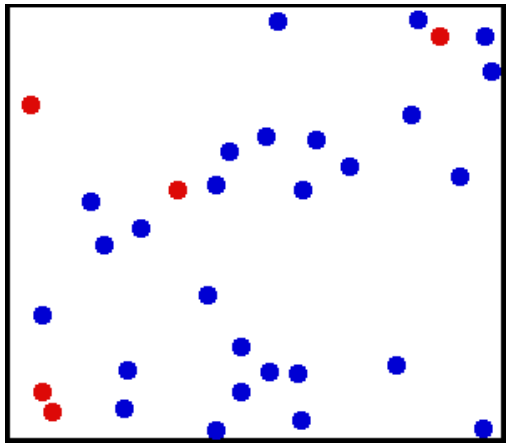


- Quanten – Optik: makroskopische Ausbreitung von Wahrscheinlichkeitswellen



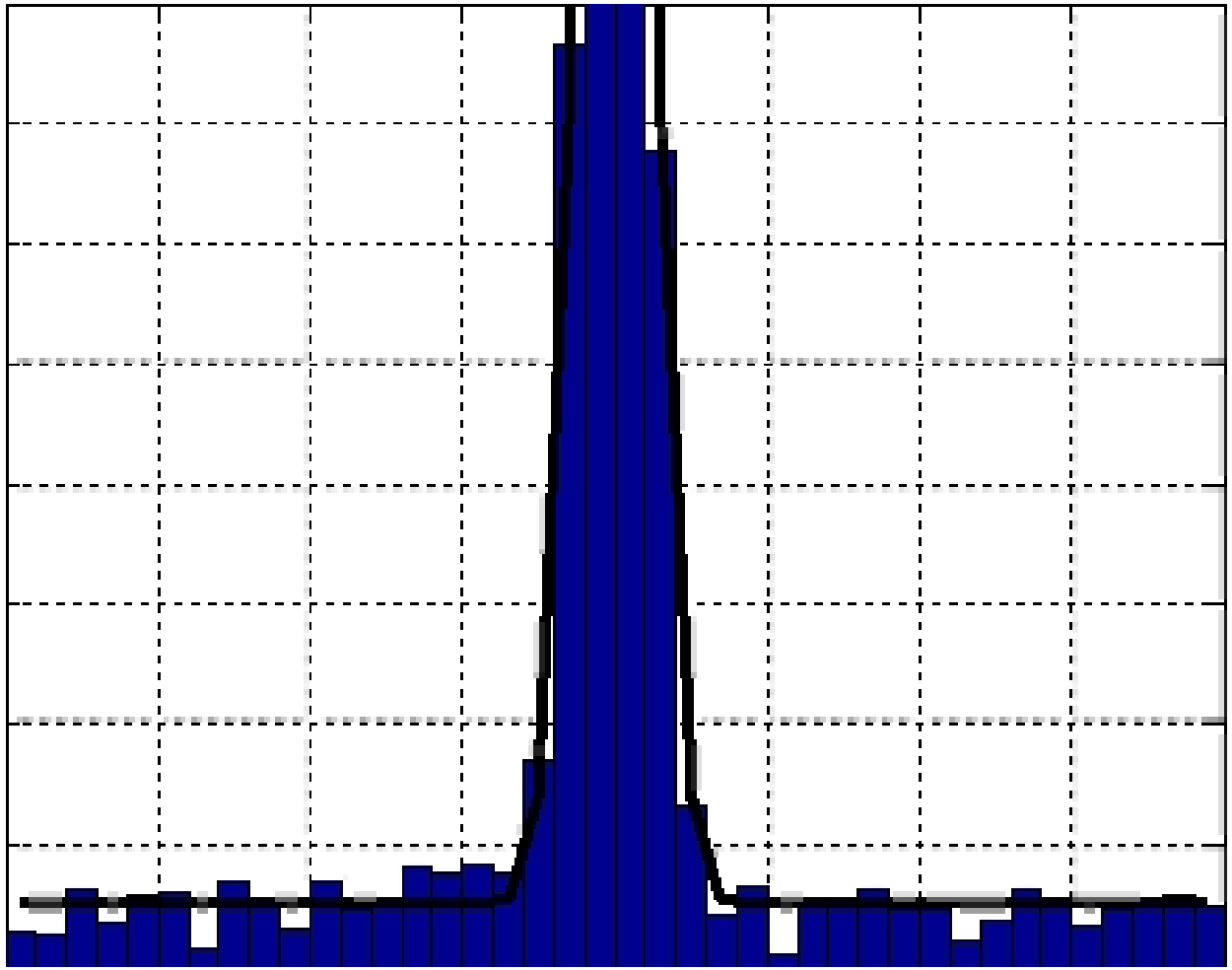
Laboraufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers mit Standardkomponenten von Edmund Optics®

Bewegung der Teilchen ist
mikroskopisch zeitinvariant



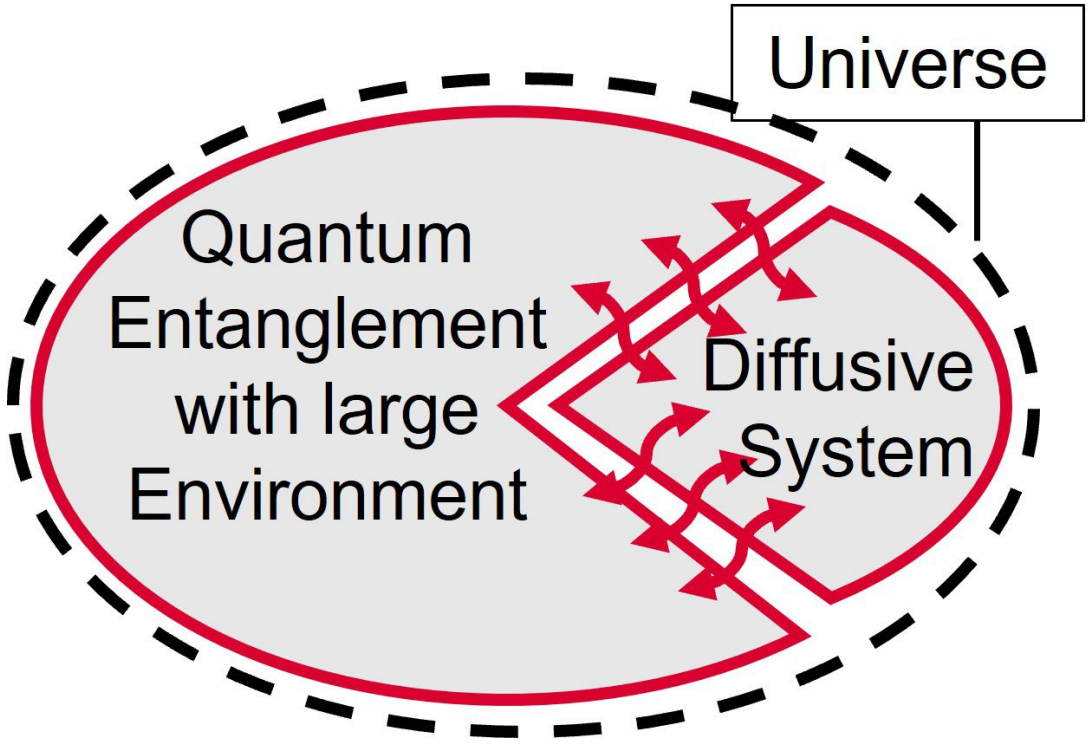
Makroskopisch vermischen sich die Teilchen





grünbeck

Deterministische mechanische Gleichungen! Wie kommt die Wahrscheinlichkeit für die Diffusion ins Spiel?



Quantenverschränkung mit der Umgebung erklärt, wie Wahrscheinlichkeit ins Spiel kommt (drei Publikation aus 2006):

- Wahrscheinlichkeiten sind ein intrinsischer und unausweichlicher Teil der Quantenmechanik.
- Die Wahrscheinlichkeiten, die die Unsicherheit (oder Unwissenheit) im Diffusionsprozess beschreibt, resultieren daraus, dass die durch Verschränkung in die Umwelt "transportierte" Information verloren geht.

S. Lloyd, “Excuse our ignorance,” Nat. Phys. 2, 727–728 (2006).
S. Popescu, A. Short, “, and A. Winter, “Entanglement and the foundations of statistical mechanics,” Nat. Phys. 2, 754–758 (2006).
S. Goldstein, J. L. Lebowitz, R. Tumulka, and N. Zanghì, “Canonical typicality,”Phys. Rev. Lett. 96, 050403 (2006).

Quanten-Sensorik

- Quantensensorik ist neu
  - Aber die Konzepte sind schon lange bekannt (Quantenmechanik, hochauflösende Spektroskopie)
  - “New”
    - Quantensystem auf Einzelatomebene untersucht
    - Einsatz von Verschränkung zur Erhöhung der Empfindlichkeit
    - Quantensysteme wurden speziell für Sensorik-Anwendungen entwickelt
- Quantensensoren haben mindestens eine der folgenden Eigenschaften
  - Verwenden Quantenobjekte (z.B. mit diskreten Energieniveaus oder Zuständen), um physikalische Größen zu messen
  - Verwenden Quantenkohärenz zur Messung physikalischer Eigenschaften
  - Verwendung von Quantenverschränkung zur Verbesserung der Empfindlichkeit oder Präzision über die klassischen Grenzen hinaus

Degen, C. L., Reinhard, F. & Cappellaro, P. (2017-07). Quantum sensing. *Rev. Mod. Phys.*, *89*(3), 35002. https://doi.org/10.1103/revmodphys.89.035002

Quanten-Sensorik-”Use cases”

Mit diesen **höheren Empfindlichkeiten** und zusätzlichen Vorteilen wie Miniaturisierbarkeit, Reproduzierbarkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit sind **Quantensensoren attraktiv für verschiedene Einsatzgebiete** („use cases“):

- **1. Medizin:** zum Nachweis **von magnetischen Feldern**, die von den **elektrischen Aktivitäten im Gehirn und im Herzmuskel** herrühren→ bildgebende Verfahren, z.B. zur schnellen Diagnose bei Schlaganfallpatienten.

- **2. Biologie:** -> bildgebende Verfahren für lebende Zellen und mikroskopische Lebewesen Videoaufnahmen, dynamische Prozesse.

- **3. Bauwesen:** empfindliche Gravimeter: Untergrundstrukturen und verborgene Hohlräume sichtbar machen und vorhandene Infrastruktur kontrollieren.

Müller, Rainer; Greinert, Franziska. Quantentechnologien (De Gruyter Studium)

Quanten-Sensorik-”Use cases”

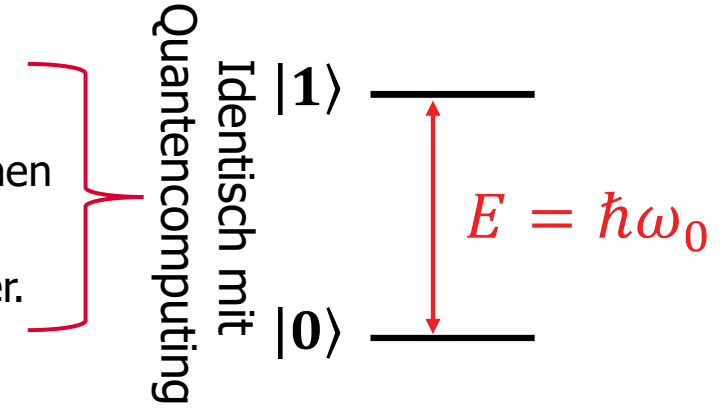
- **4. Erdüberwachung und Bodenschätze:** Gravimeter und Gradiometer (die den Gradienten des **Gravitationsfeldes** messen): Aufspüren von Grundwasservorräten und Bodenschätzen oder das Monitoring von Erdbeben und Vulkanen.
  Sensoren können an der Erdoberfläche, in Satelliten oder in Flugzeugen eingesetzt werden.

- **5. Industrielle Prozesse und Telekommunikation**: **Inline Prozess- und Qualitätskontrolle** sowie **hochpräzise Zeitmessung** im Telekommunikationsbereich.
  Herausforderung: Zeitinformation mit hoher Genauigkeit an einen anderen Ort zu übertragen. Dazu sind Netzwerke synchronisierter Uhren nötig.

- **6. Detektion von Teilchen und Gasen:** spektroskopischen Methoden z.B. für die Lecksuche in Gasleitungen oder den Einsatz bei der Umweltüberwachung.

Müller, Rainer; Greinert, Franziska. Quantentechnologien (De Gruyter Studium)

- Eigenschaften eines Quantensystems, um als Quantensensor zu fungieren
  1. Diskrete, auflösbare Energieniveaus oder Zustände
  2. Es ist möglich, das System in einen bekannten Zustand zu initialisieren und seinen Zustand auszulesen
  3. Kohärente Manipulation des Systems, typischerweise durch zeitabhängige Felder.
  4. Das Quantensystem wechselwirkt mit der relevanten physikalischen Größe V(t): Verschiebung des Energieniveaus oder Übergang zwischen Energieniveaus



- Merkmale der Realisierung
  - Spin-basierte Systeme, die empfindlich auf Magnetfeld reagieren
  - Geladene Systeme, wie gefangene Ionen, sondieren das elektrische Feld

Degen, C. L., Reinhard, F. & Cappellaro, P. (2017-07). Quantum sensing. *Rev. Mod. Phys.*, *89*(3), 35002. https://doi.org/10.1103/revmodphys.89.035002

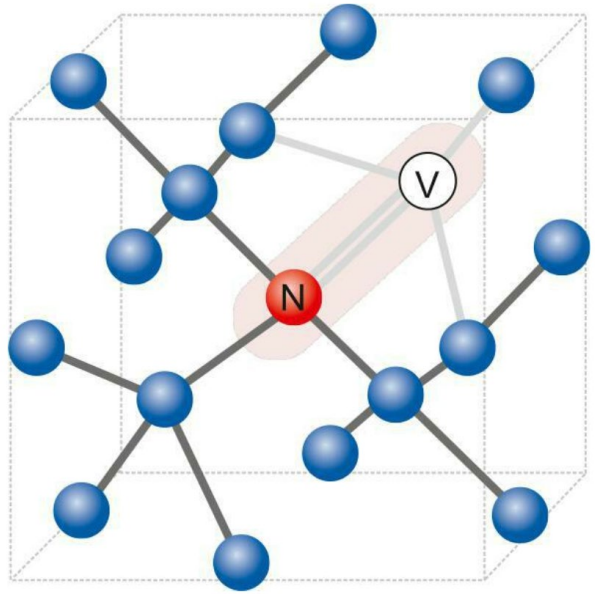
Gravimetrie mit Atomuhren



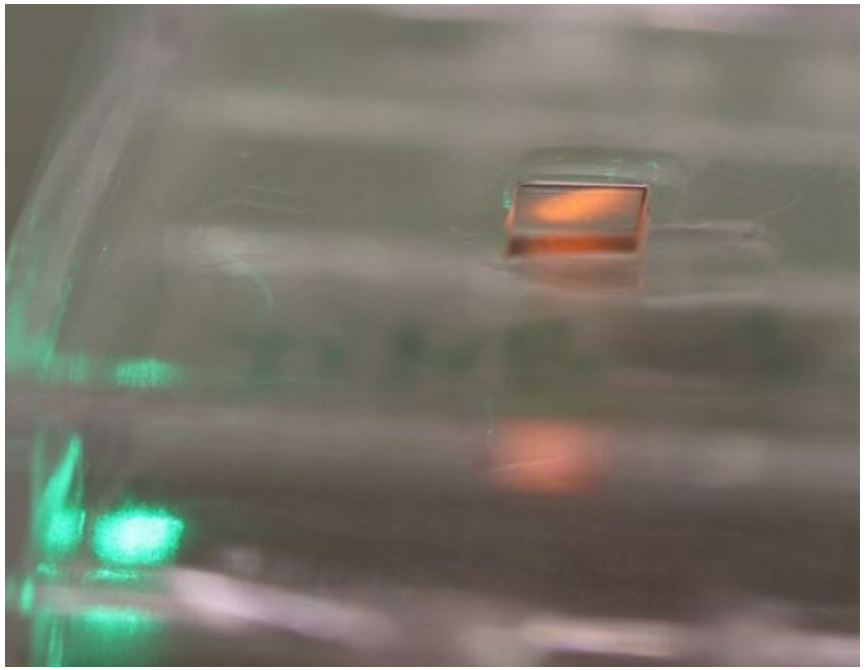
Die vier primären Atomuhren an der PTB.

Müller, Rainer; Greinert, Franziska. Quantentechnologien (De Gruyter Studium)

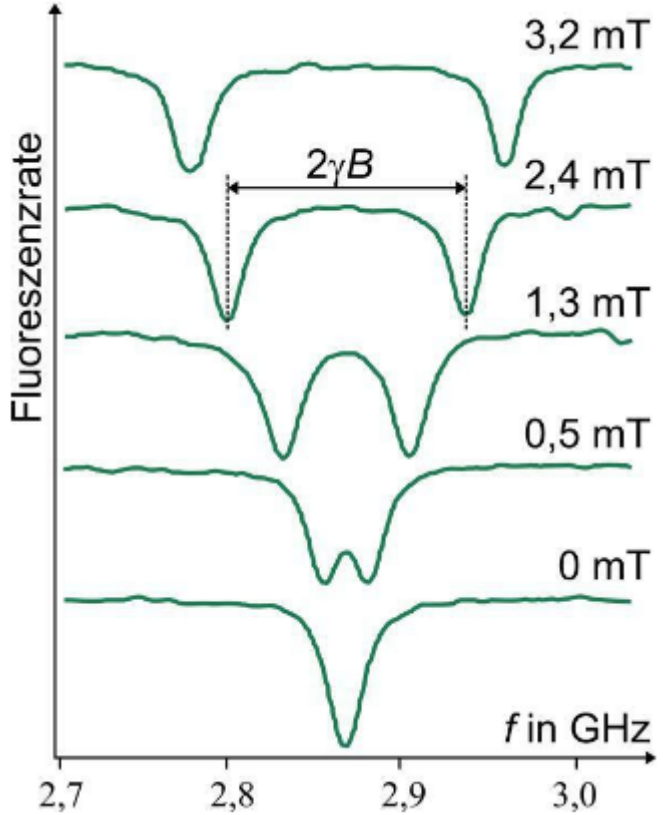
NV-Zentren in Diamant



Gitterstruktur eines NV-Zentrum in Diamant
mit Stickstoffatom (N) und Vakanz (V)



Optically Detected Magnetic Resonance (ODMR)



Die am Abstand der Minima in der Fluoreszenzrate ablesbare Aufspaltung der Energieniveaus in Abhängigkeit vom Magnetfeld erlaubt die Messung des Magnetfelds (Daten: QZabre).

Müller, Rainer; Greinert, Franziska. Quantentechnologien (De Gruyter Studium)

Quanten-Sensorik



- SQUID-MEG der PTB Berlin mit Liege – flüssiges He bei 4 Kelvin
- Kappen für OPMs (optisch gepumpte Magnetometer) bei Raumtemperatur.

Atome als Gas in einer Zelle (meist Alkalimetalle wie Kalium, Rubidium oder Cäsium).
Die Atome werden mit einem Laser in ein Energieniveau mit bestimmten Spineigenschaften gebracht. In Anwesenheit eines Magnetfelds zeigt der Spin eine magnetfeld-abhängige Präzession, die sich im optischen Absorptionsverhalten der Atome widerspiegelt. Dadurch kann das Magnetfeld ausgemessen werden.

Müller, Rainer; Greinert, Franziska. Quantentechnologien (De Gruyter Studium)

- OCT -Technologie:
  - In Medizin seit den 1990er Jahren (Fercher; Fujimoto und andere)
  - Augenheilkunde, Dermatologie,….
  - →NDT

- Quantum OCT (Q-OCT)
  - Verschiedene Konzepte (Koinzidenz/Korrelation Analyse, NL-Optik Ansätze,…)
  - Generell: Ausnützung von Interferenz/Wechselwirkungs-Eigenschaften von verschränkten (Entangled) Photonen-Paaren, wofür man eine nicht-klassische Lichtquelle braucht (NL-Effekte zur Erzeugung)
  - Verschränkung: durch Polarisation oder Drehimpuls (orbital angular momentum) …
  - Vorteil: Geringere theoretische Rausch-Schwelle erzielbar; Dispersionsfrei,…→ sensitiver (weak effects detectable) bzw. einsetzbar (tunable) in geeigneten Spektralbereichen (NL-Kristall: pump, idler, signal beam)
  - Nachteil: Kompliziertere Auswertung oder optischer Aufbau

Q-OCT (1)

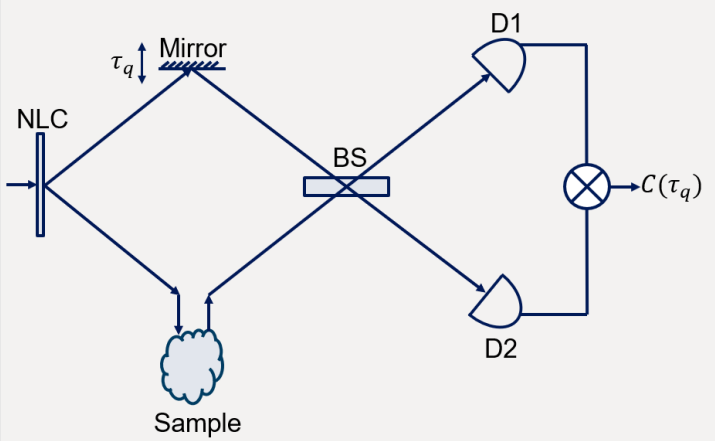


Bild- Quelle: Wikipedia

- Nicht-klassische Lichtquelle (verschränktes Photon-Paar); Hong-Ou-Mandel Interferometer
- Koinzidenz / Korrelation - Analysis zwischen „Events" an Detektoren D1 und D2
- Event: Signal-Dip bei destruktiver Interferenz

Q-OCT (2)

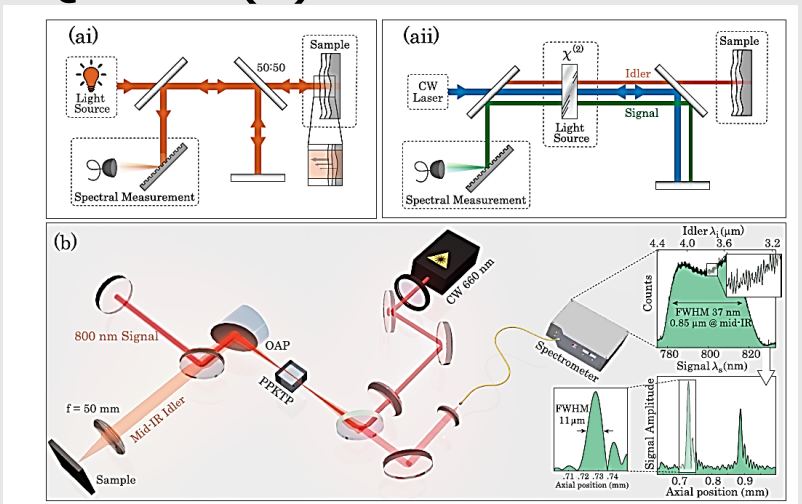
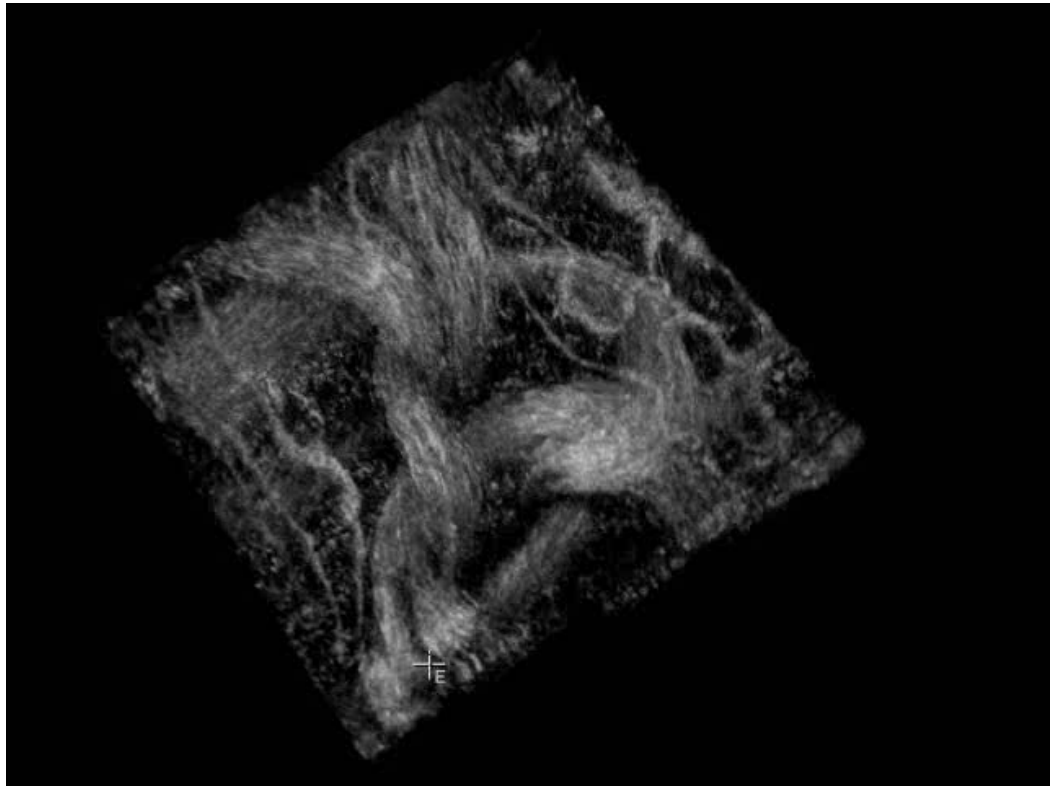


Bild- Quelle: Vanselow et al.
https://doi.org/10.1364/OPTICA.400128

- (ai) klassisch-; (aii) quantum-Ansatz; (b) Optischer Aufbau: NL-Interferometer für QOCT
- Idler beam trifft auf Probe, (nur) Signal beam wird detektiert („un-detected MIR photons")
- Vorteil: Sensitiv in geeignetem Spektralbereich

Ausblick: Quanten-Imaging z.B. von Faserverbund oder Blutgefäße im Gewebe





RECENDT

Journal of Biomedical Optics, Vol. 24, Issue 2, 026003 (2019)

RECENDT
RESEARCH CENTER NON DESTRUCTIVE TESTING

Prospective Sensing

This is a COMET Project/Center for complex metrological problems for which there are no standard solutions yet. The focus is particularly on the research and development of photonic measurement technology that can be used along the process or directly inline. Customized physics- and data-based methods are intended to extract extended information from measurement data and make it available for industrial production processes as a building block of a closed loop. Findings from applications that have already been developed are transferred to other challenges and sectors, such as medical imaging and analytics, through method transfer. As part of continuous technology screening, new trends in basic research are analyzed, taken up where appropriate and further developed for future, emerging measurement requirements.

Areas

1. Advanced Sensing

Addressing sensing challenges of the industry with new (photonic) methods.

- Metal production and processing
- Chemical production
- Electronics and thin films
- Sustainable production
- Lightweight and new materials

CP:
…

SP:
JKU (IAP, IME, ZONA, IMT, IEM), AIT, UAP-Wels, TU Graz, MUL, RISC, ÖGZfP

Total Budget:
2 M€ pa

(Funding 50% ->
1 M€ cash+inkind from CP)

2. Information Extraction

Developing novel algorithms and methods to move from raw data to process control.

- Data processing
- Machine/Deep Learning
- Physical Modelling
- Simulation
- Visualization

CP:
…

SP:
RISC, JKU (IML, ISP), SAL, IT:U

Total Budget:
1.5 M€ pa

(Funding 50% ->
0.75 M€ cash+inkind from CP)

3. Transfer Sensing

Transferring successful methods and knowhow to other applications.

- Green industries
- Medical imaging and analytics
- Extreme conditions
- Space

CP:
…

SP:
RISC, UAP-Wels, JKU (IAP, ZONA, ZMF)

Total Budget:
0.5 M€ pa

(Funding 50% ->
0.25 M€ cash+inkind from CP)

4. Prospective Technologies

Monitoring basic research and future needs to identify and test novelties early.

- Quantum Sensing
- …

CP:
…

SP:
JKU (ISSSP, IAP, IME), HU Berlin, FH-Wels, TU Graz, TU/Uni Wien, SAL, ETH

Total Budget:
1 M€ pa

(Funding 50% ->
0.5 M€ cash+inkind from CP)

We are RECENDT GmbH

RECENDT
RESEARCH CENTER NON DESTRUCTIVE TESTING



Contact



- Dr. Ivan Zorin
  - Quanten-Sensorik
  - ivan.zorin@recendt.at
  - +43 732 2468 4654



- Dr. Markus Brandstetter
  - Gruppenleitung Infrarot- & Raman-Spektroskopie
  - markus.brandstetter@recendt.at
  - +43 732 2468 4620



- Dr. Peter Burgholzer
  - Geschäftsführung
  - peter.burgholzer@recendt.at
  - +43 732 2468 4601



- Dr. Bettina Heise
  - Gruppenleitung OCT
  - bettina.heise@recendt.at
  - +43 732 2468 4666

- www.recendt.at
- A – 4040 Linz, Altenberger Straße 69, Science Park 2

© RECENDT, Slide #22

All rights reserved, especially the rights to copy, distribute or translate contents of this document. No parts of this document (theses slides) may be reproduced, copied or distributed without the written permission from Research Center for Non Destructive Testing GmbH (RECENDT).