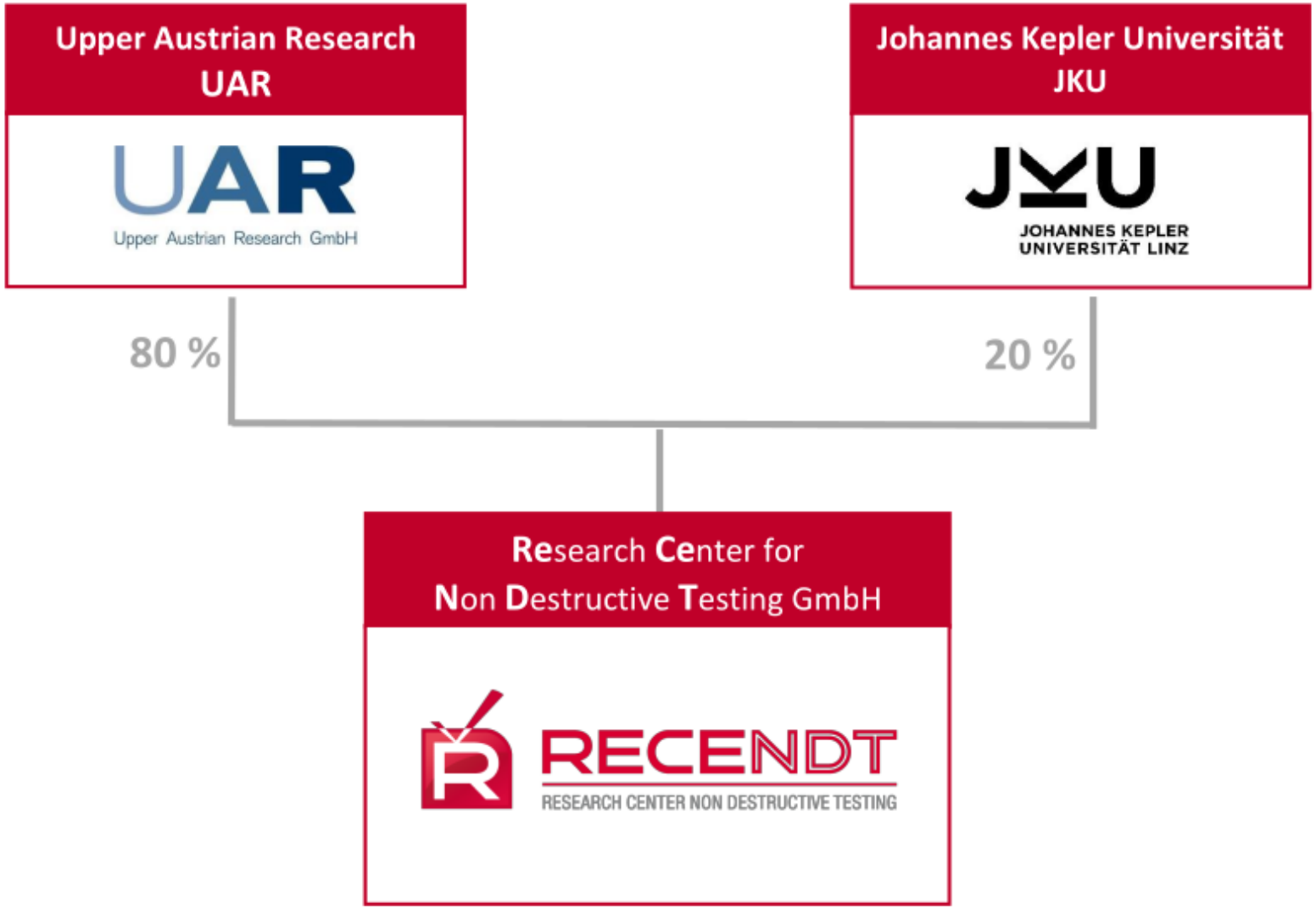
Quanten-Sensorik

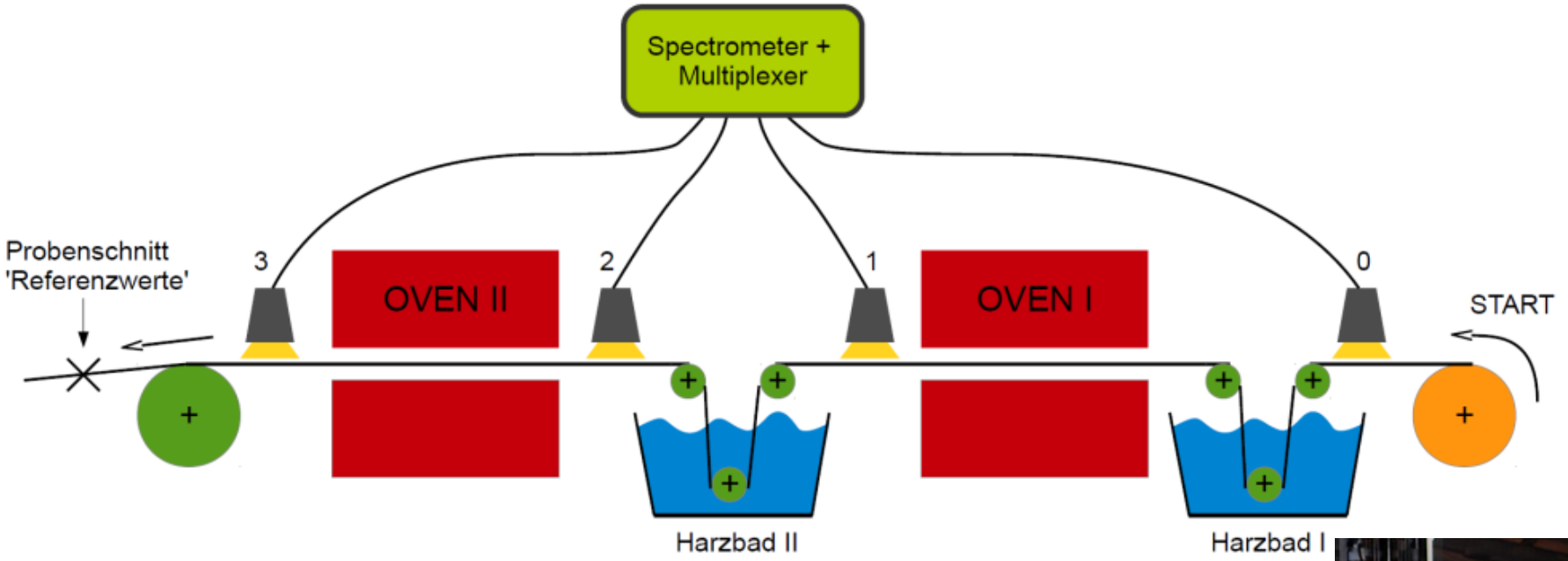
P. Burgholzer[1,2]
e-mail: peter.burgholzer@recendt.at
https://www.recendt.at

[1]Research Center for Non Destructive Testing (RECENDT), Linz, Austria
[2]Institut für Werkstoffwissenschaften, TU Wien, Austria

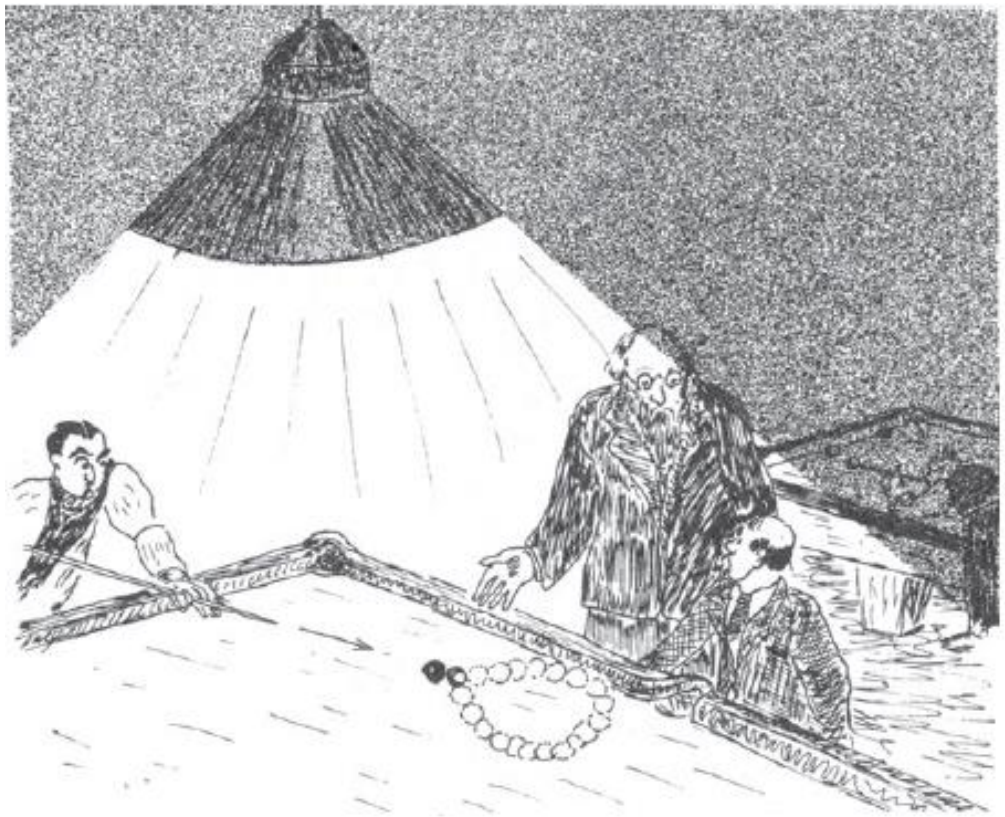


upper austria

Process-integrated quality control

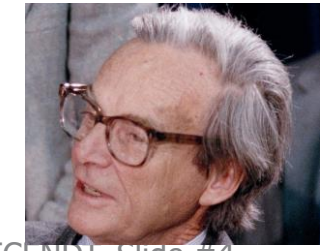


Quanten-”Wunderwelt”: Unschärfe und Zufall

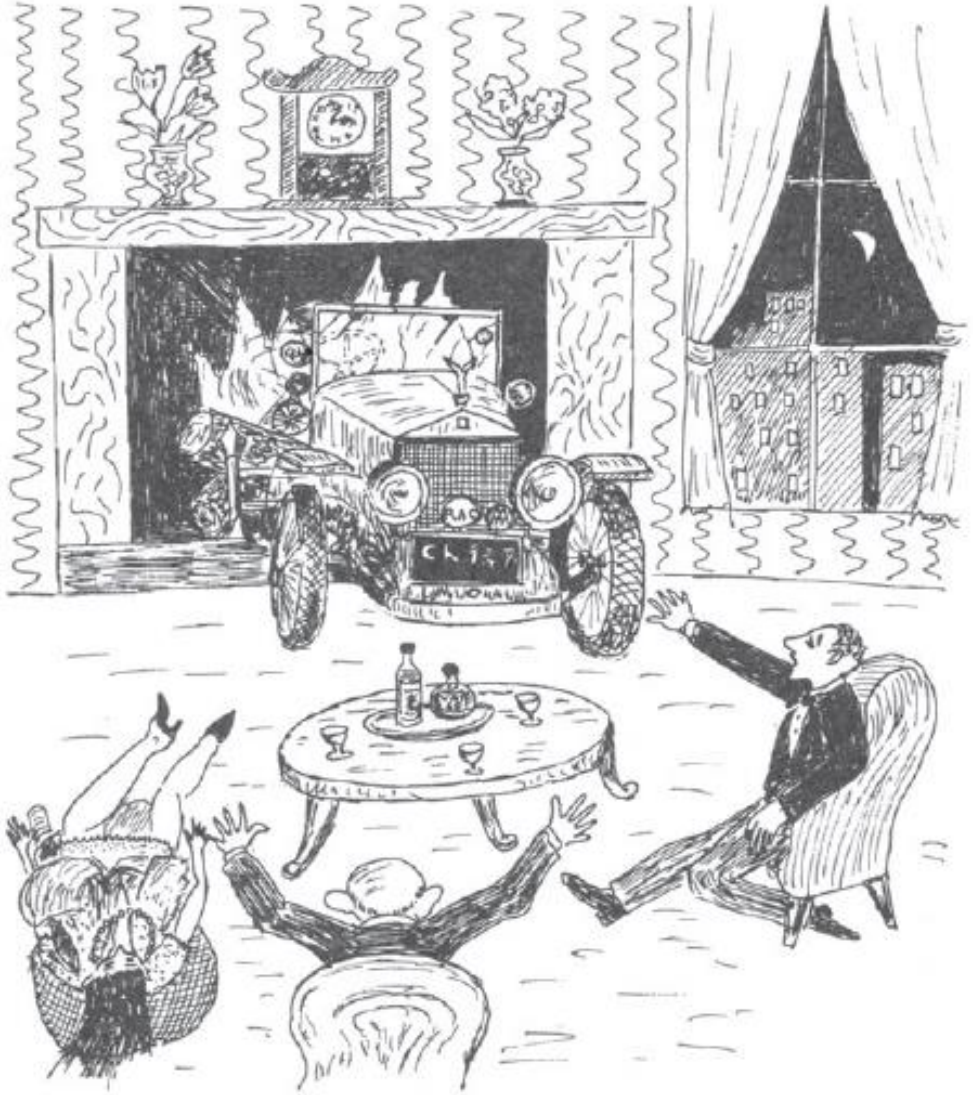


Der weiße Ball rollt in alle Richtungen.

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

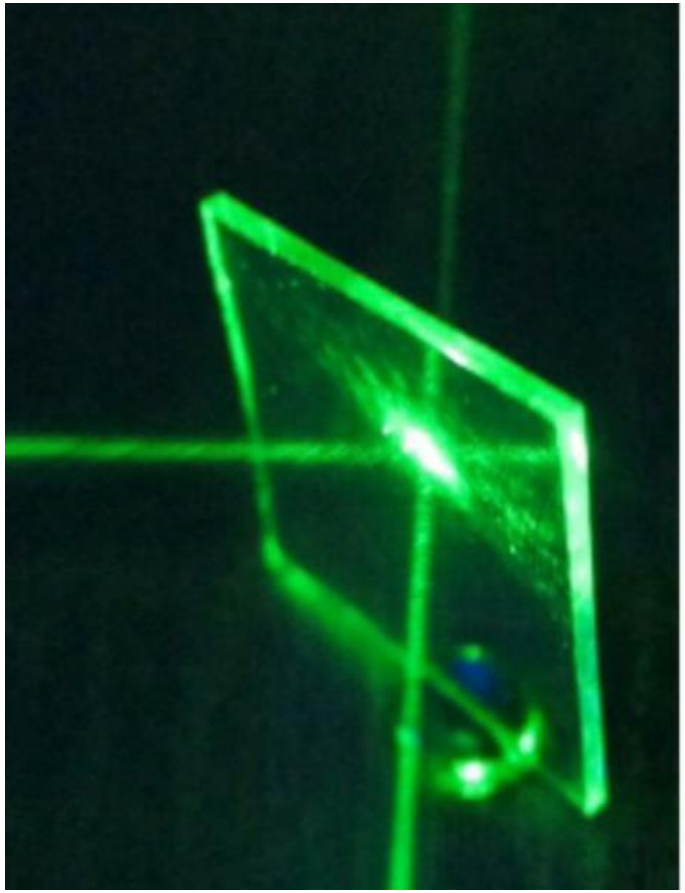


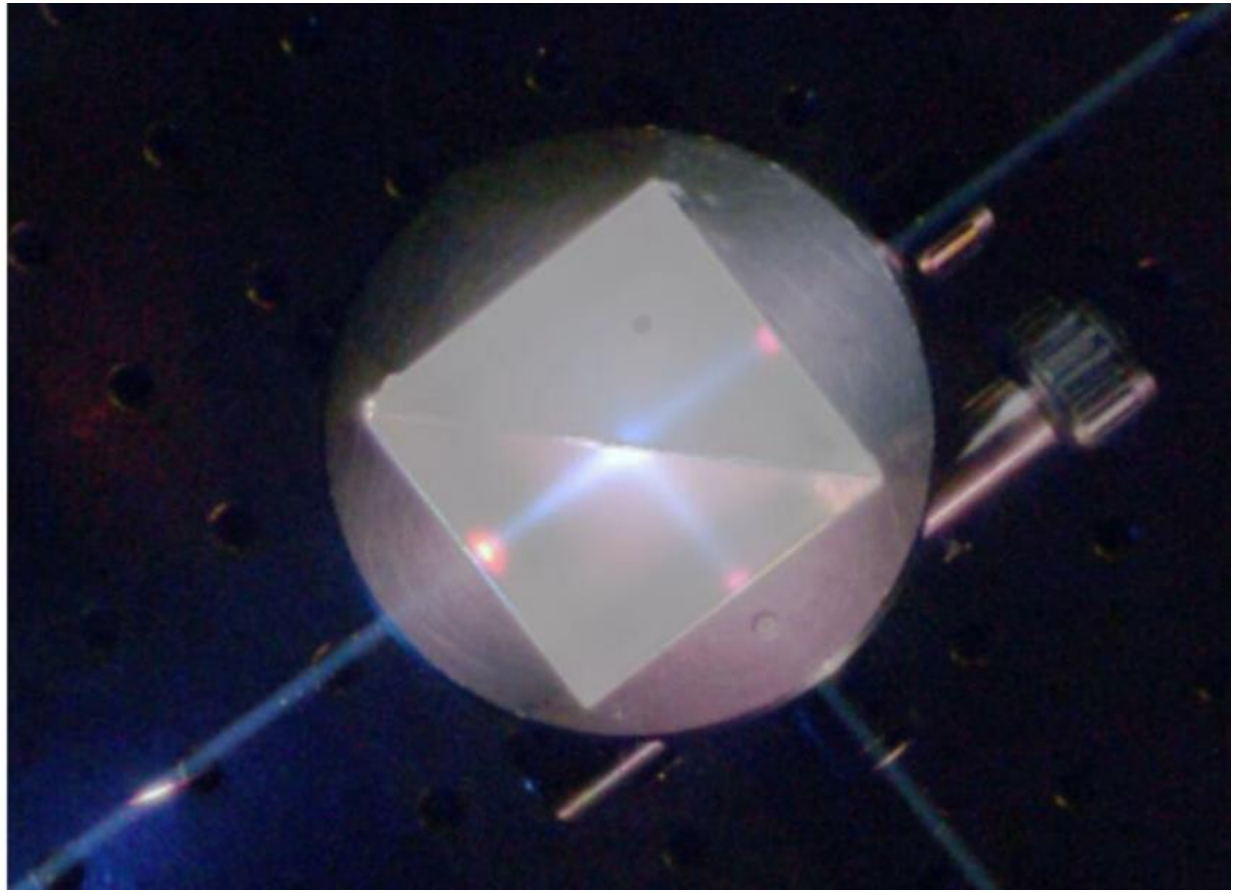
Richard Feynman: "Wissenschaft ist wie Sex - manchmal kommt etwas Nützliches dabei heraus, aber das ist nicht der Grund, weshalb wir es betreiben".



Das Auto erschien wie ein Geist aus dem Mittelalter.

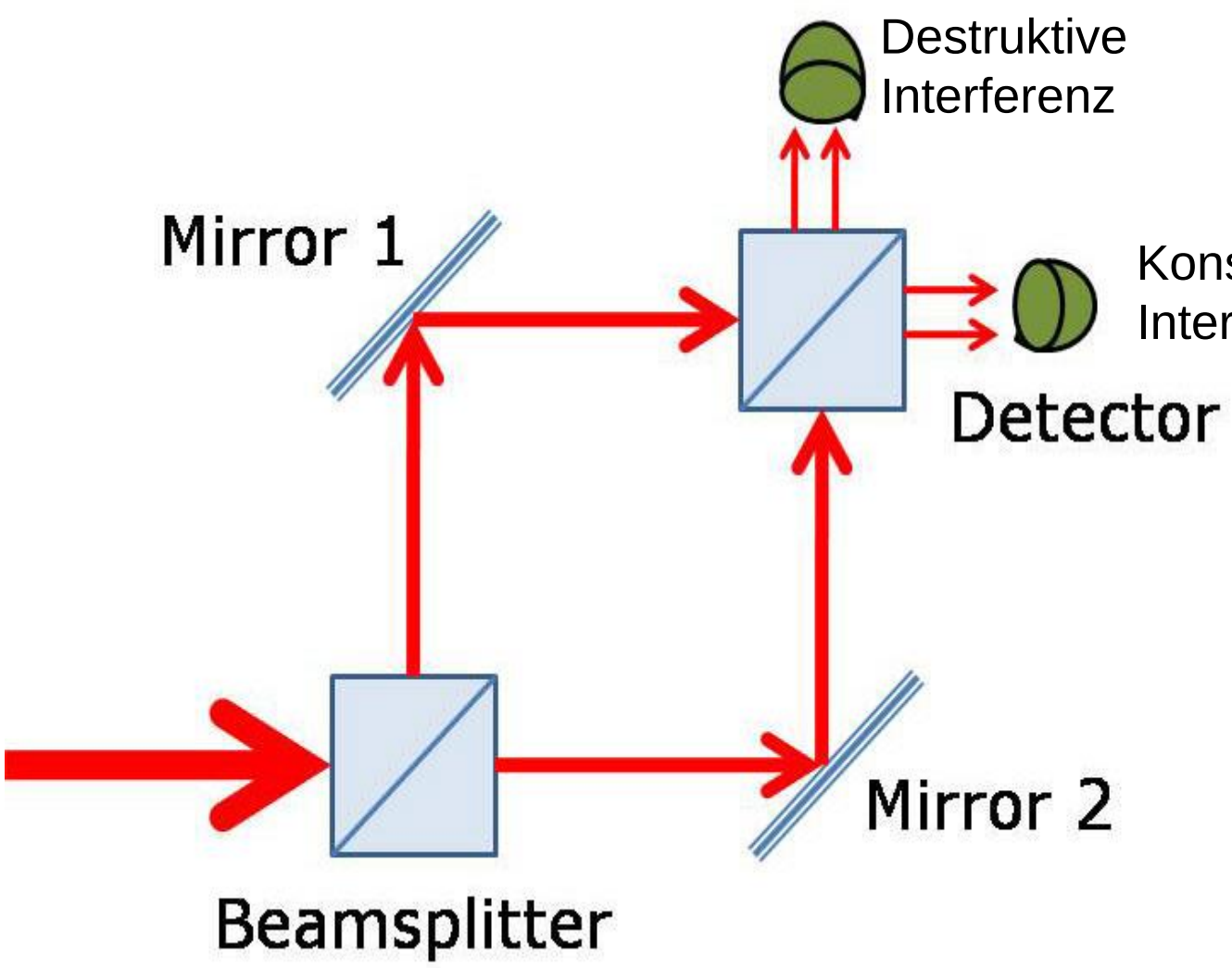
Strahlteilerplatte und –würfel (Beamsplitter)



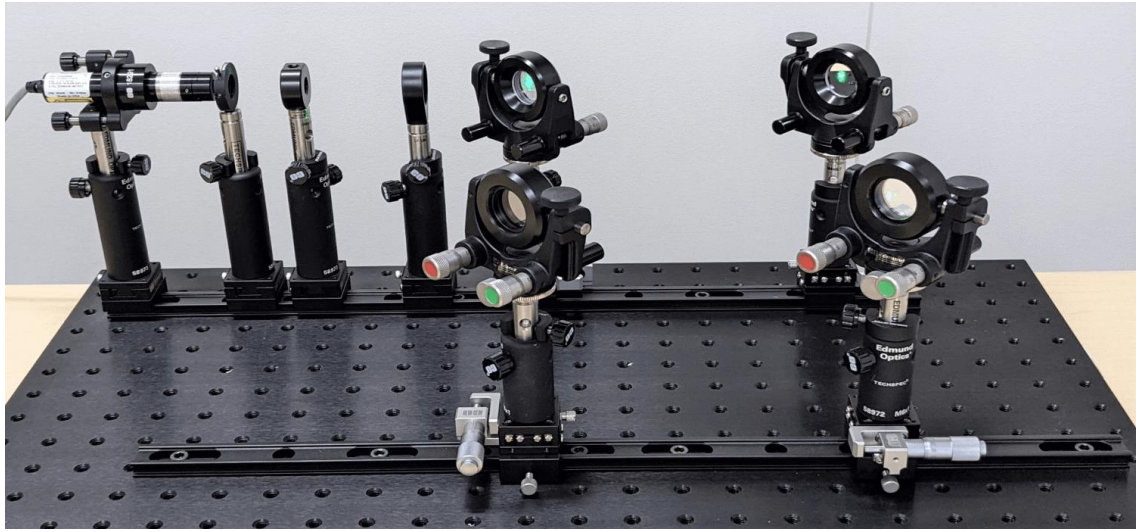


Müller, Rainer; Greinert, Franziska. Quantentechnologien (De Gruyter Studium)

Mach-Zehnder-Interferometer

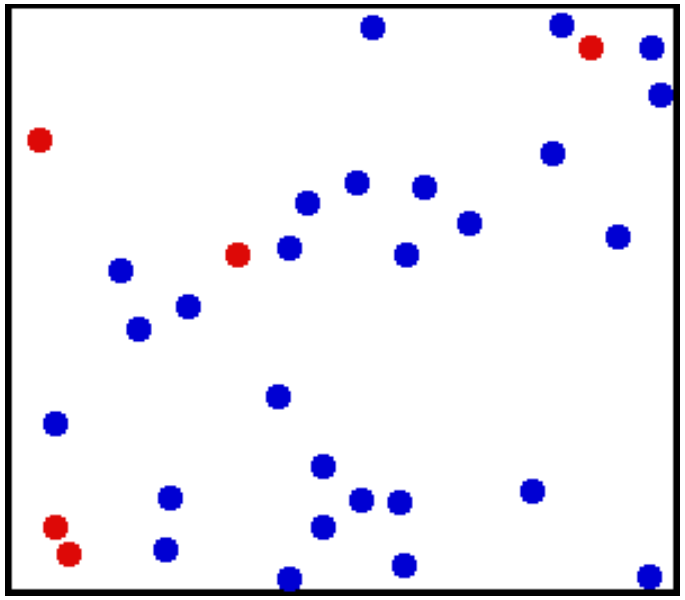


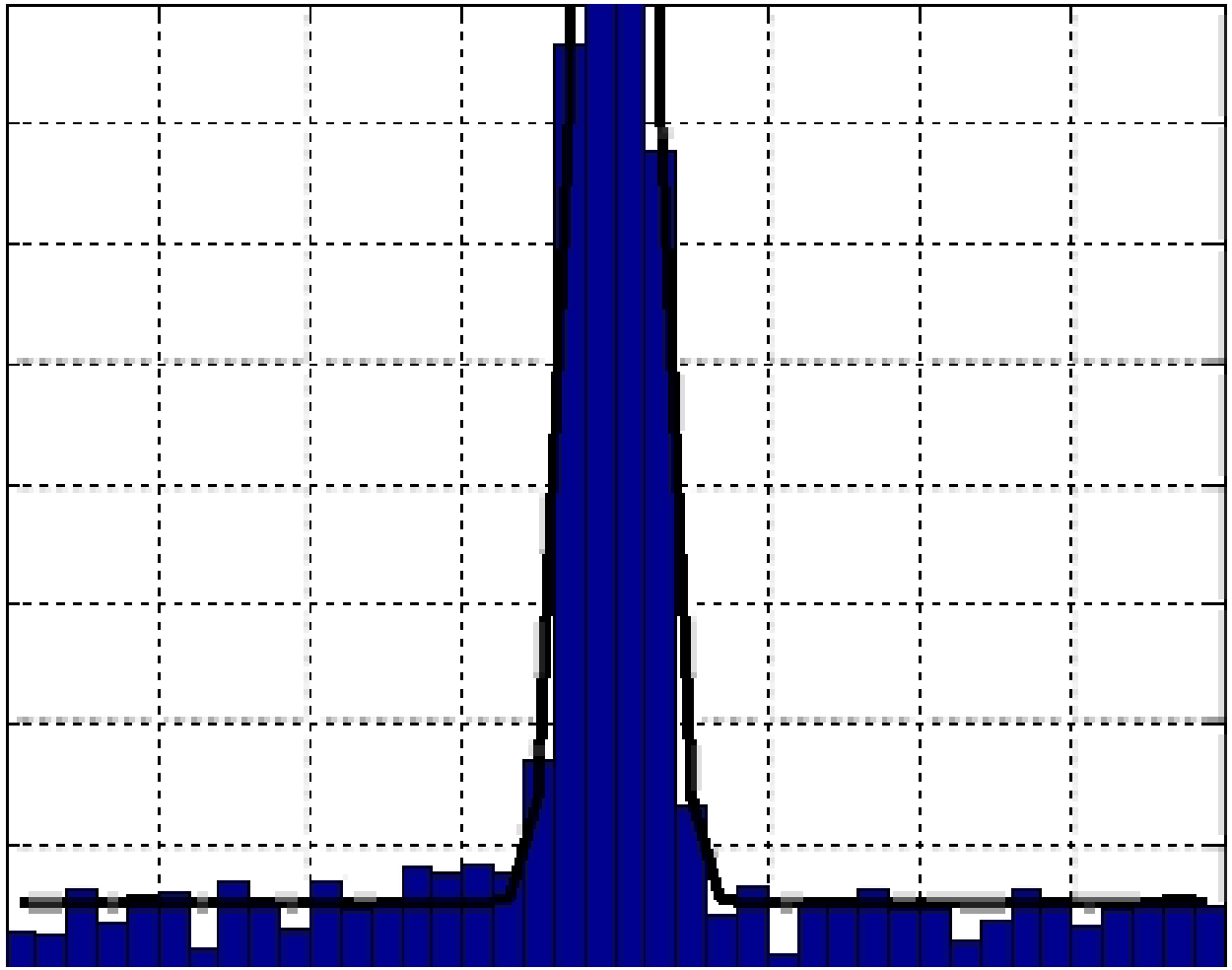
- Quanten – Optik: makroskopische Ausbreitung von Wahrscheinlichkeitswellen



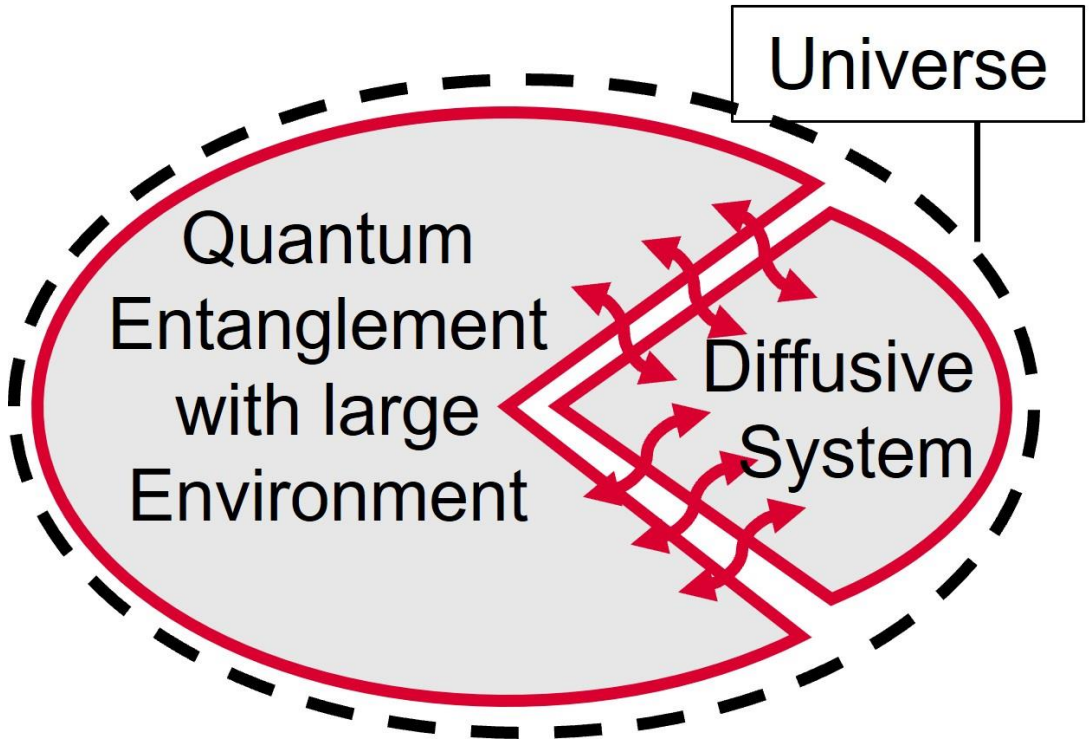
Laboraufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers mit Standardkomponenten von Edmund Optics®

Diffusion: Bewegung der Teilchen ist mikroskopisch zeitinvariant
Makroskopisch vermischen sich die Teilchen





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 (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 (diskrete Energieniveaus), 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:** In der medizinischen Diagnostik können Quantensensoren zum Nachweis von magnetischen Feldern genutzt werden, die von den elektrischen Aktivitäten im Gehirn und im Herzmuskel herrühren. Dabei werden auch bildgebende Verfahren entwickelt. Magnetfeldmessungen können ebenfalls in der Medizin eingesetzt werden, etwa zur schnellen Diagnose bei Schlaganfallpatienten.
- **2. Biologie:** Lebende Zellen und mikroskopische Lebewesen können mit bildgebenden optischen Techniken berührungsfrei und sogar wechselwirkungsfrei abgebildet werden. Schon heute geschieht das so schnell, dass Videoaufnahmen möglich sind und dynamische Prozesse abgebildet werden können.
- **3. Bauwesen:** Mit empfindlichen Gravimetern können Untergrundstrukturen und verborgene Hohlräume sichtbar gemacht und vorhandene Infrastruktur kontrolliert werden.

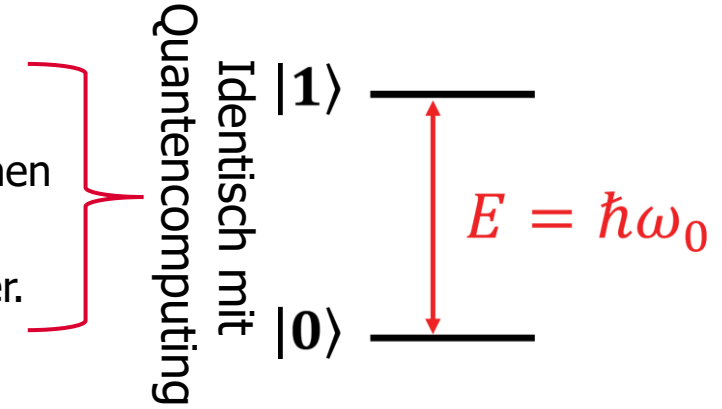
Müller, Rainer; Greinert, Franziska. Quantentechnologien (De Gruyter Studium)

Quanten-Sensorik-”Use cases”

- **4. Erdüberwachung und Bodenschätze:** Gravimeter und Gradiometer (die den Gradienten des Gravitationsfeldes messen) erlauben das Aufspüren von Grundwasservorräten und Bodenschätzen oder das Monitoring von Erdbeben und Vulkanen. Entsprechende 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. Die Herausforderung besteht nicht nur in der präzisen Zeitmessung an einem Ort, sondern in der Fähigkeit, die Zeitinformation mit hoher Genauigkeit an einen anderen Ort zu übertragen. Dazu sind Netzwerke synchronisierter Uhren nötig.
- **6. Detektion von Teilchen und Gasen:** Quantensensoren lassen sich als sehr empfindliche Detektoren für Gase einsetzen. Die Gase können dabei mit spektroskopischen Methoden identifiziert werden. Das ermöglicht zum Beispiel die Lecksuche in Gasleitungen oder den Einsatz bei der Umweltüberwachung.

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

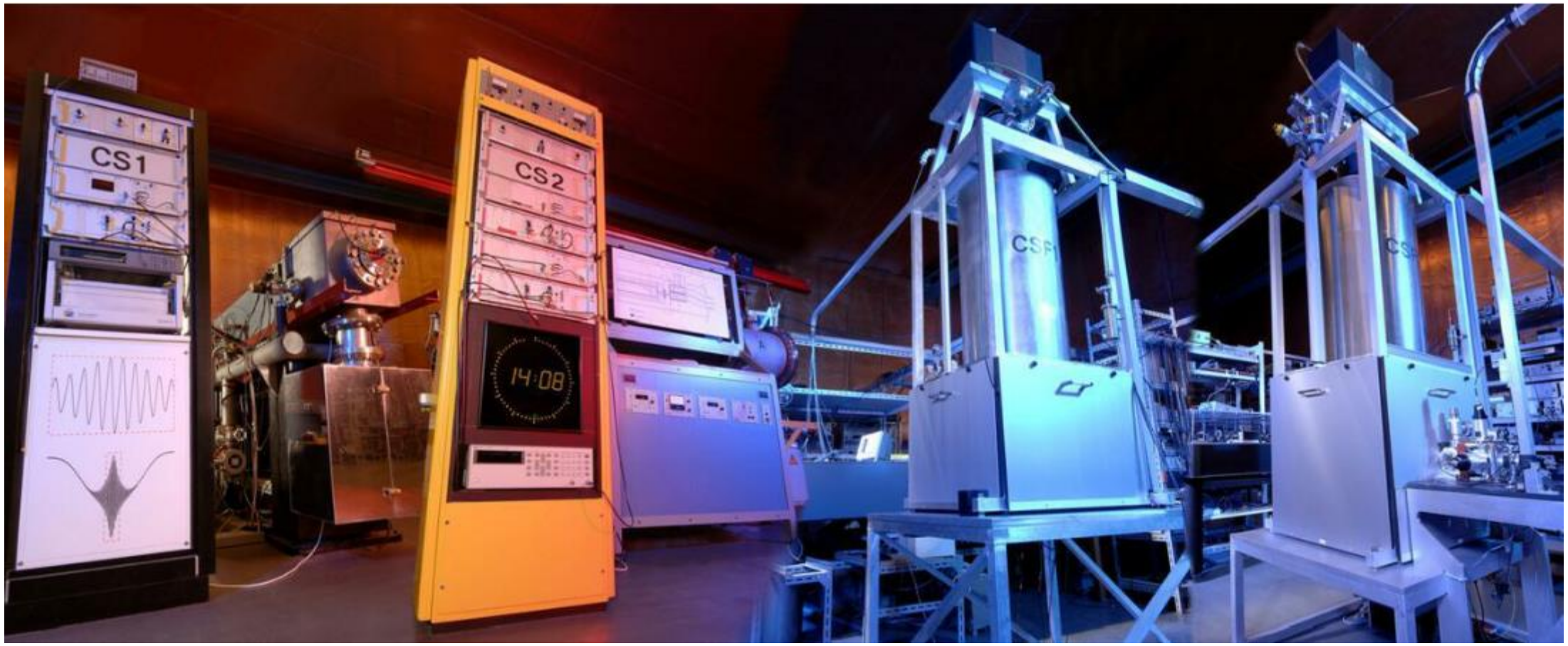
- Eigenschaften eines Quantensystems, um als Quantensensor zu fungieren
  1. Diskrete, auflösbare Energieniveaus
  2. Es ist möglich, das System in einen bekannten Zustand zu initialisieren und seinen Zustand auszulesen
  3. Kohärente Manipulation des Systems, typischerweise durch zeitabhängige Felder.
  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

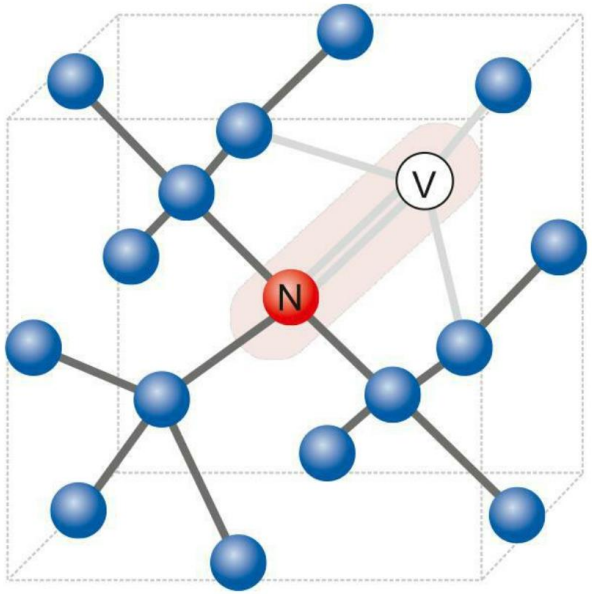
Gravimetrie mit Atomuhren



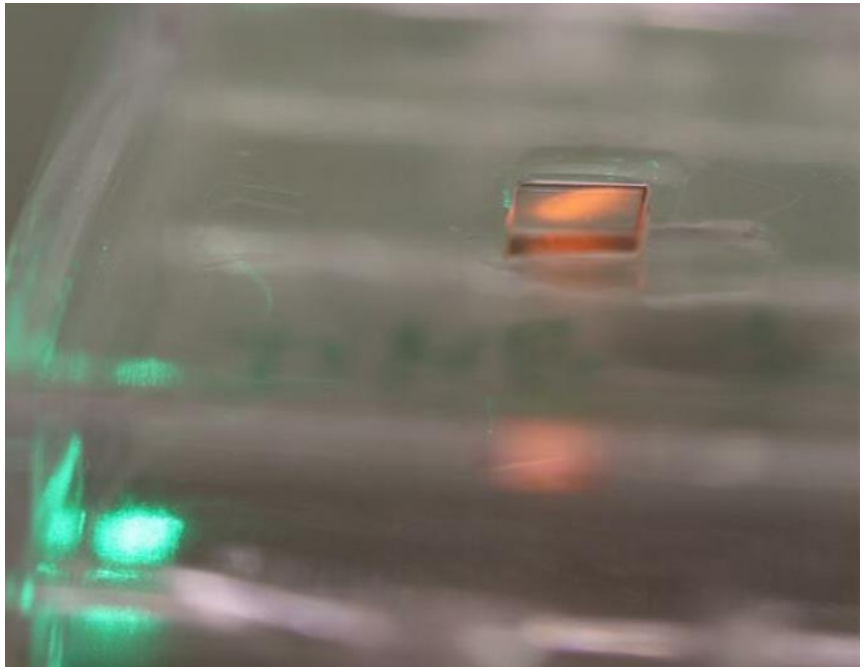
Die vier primären Atomuhren an der PTB.

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

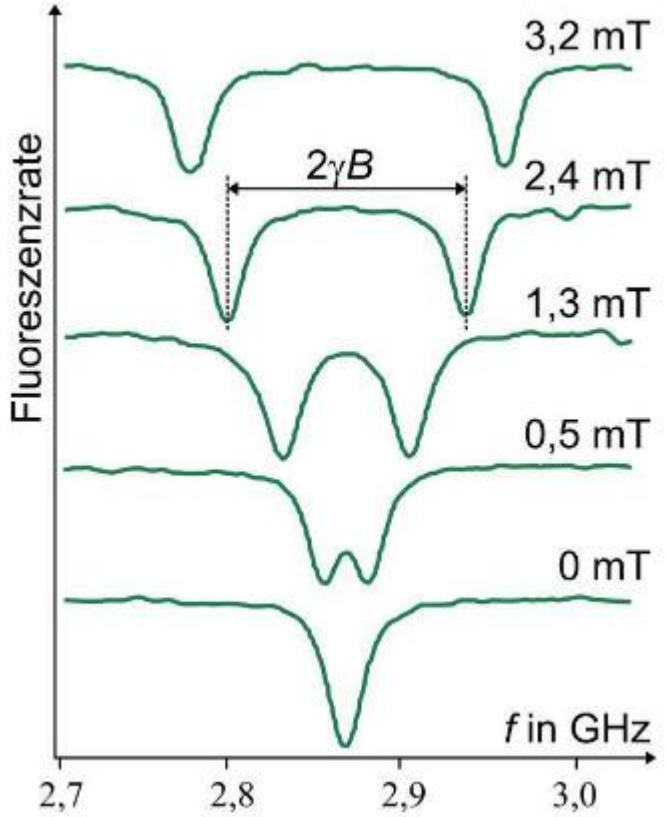
NV-Zentren in Diamant



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)

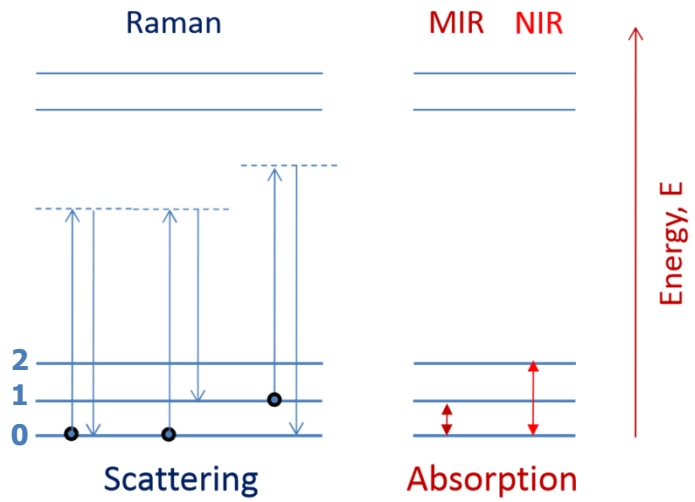
Quanten-Sensorik

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

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

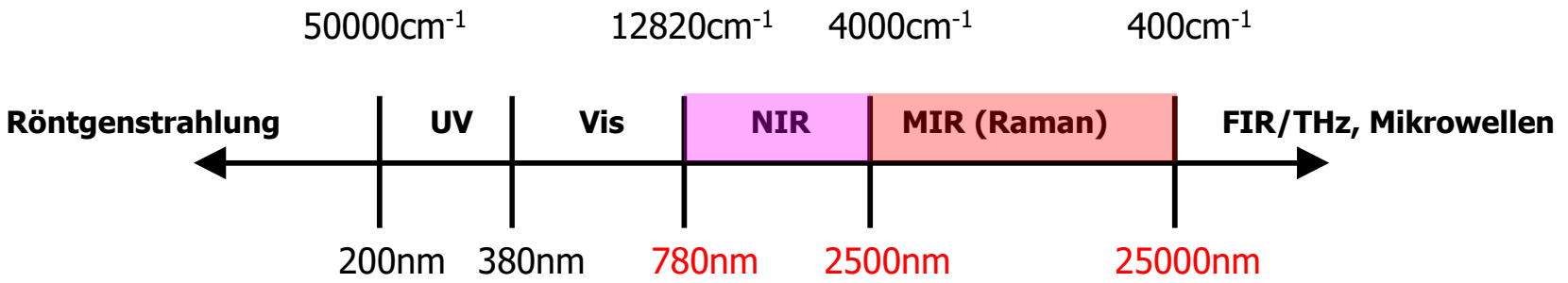
Müller, Rainer; Greinert, Franziska. Quantentechnologien (De Gruyter Studium)

Im wesentlichen 2 Effekte beobachtbar: Streuung & Absorption

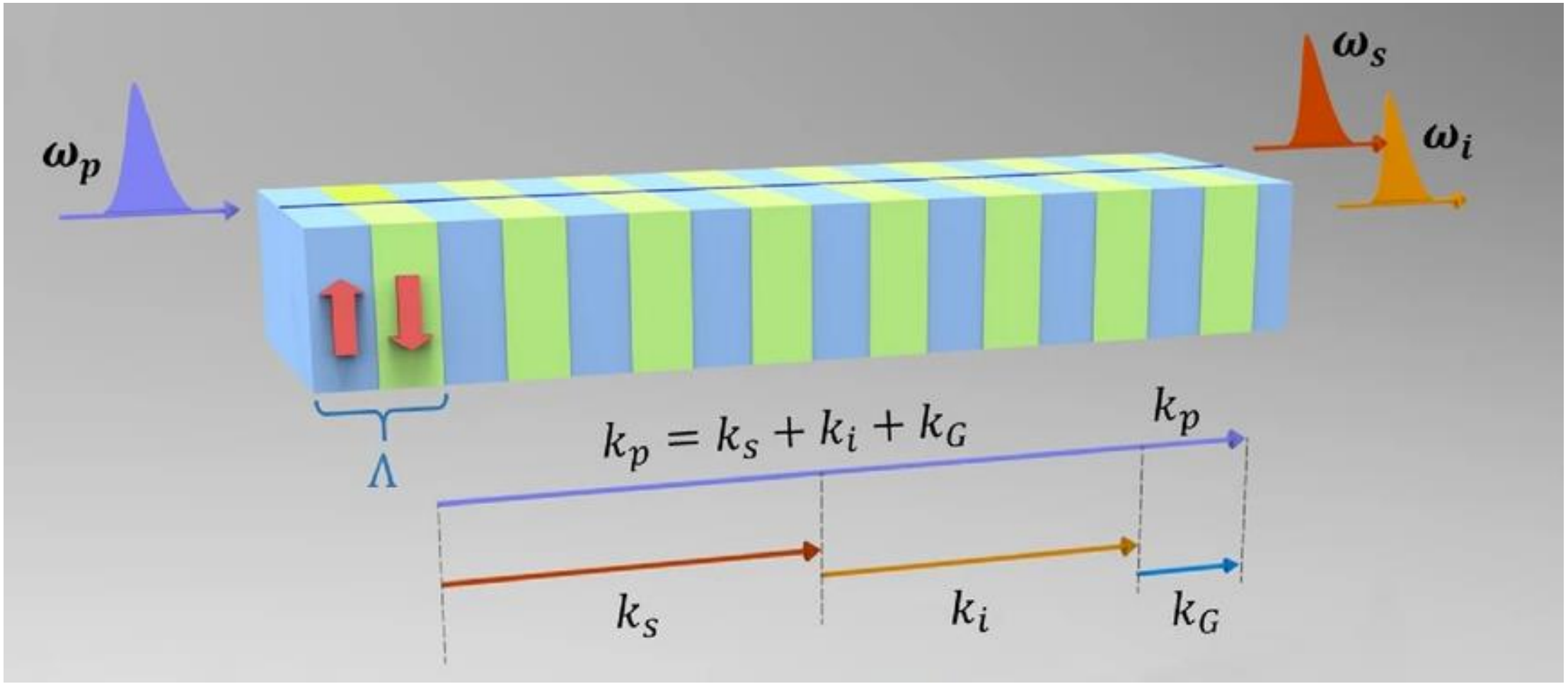


Mittleres Infrarot (MIR) & Raman:
Molekulare Grundschwingungen

Nahes Infrarot (NIR):
Obertöne und Kombinationen des IR



Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC)



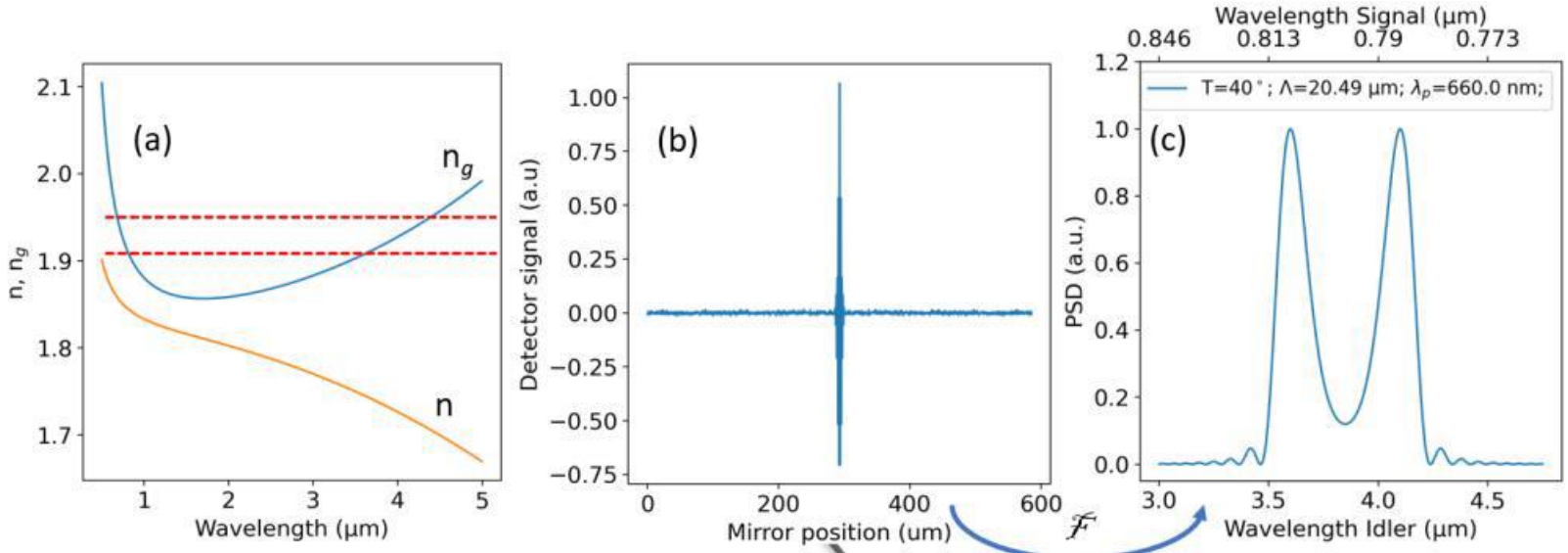
Energy conservation (non-degenerate): $\omega_p = \omega_i + \omega_s$

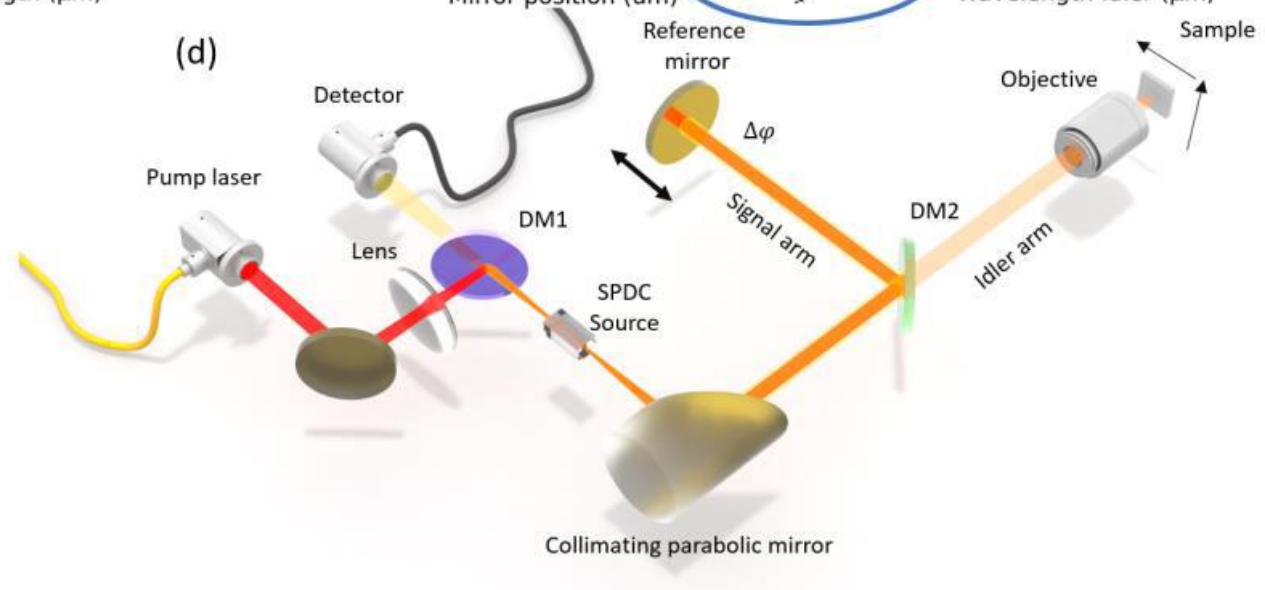
Phase mismatch to be minimized: $\Delta k = k_p - k_s - k_i - \frac{2\pi}{\Lambda}$

$$\Lambda = c \cdot (n_p(\omega_p)\omega_p - n_s(\omega_s)\omega_s - n_i(\omega_i)\omega_i)^{-1}$$

Y.-C. Liu et al. Observation of frequency-uncorrelated photon pairs generated by counter-propagating spontaneous parametric down-conversion. Sci. Rep. 2021. 11(1): 12628.

Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC)





- 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)

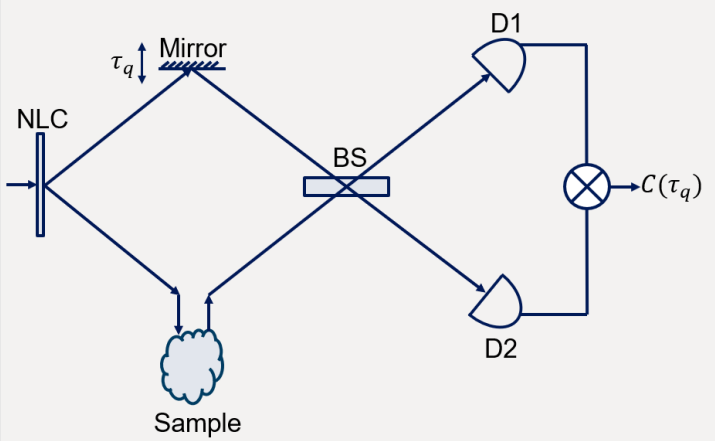


Bild- Quelle: Wikipedia

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

Q-OCT (2)

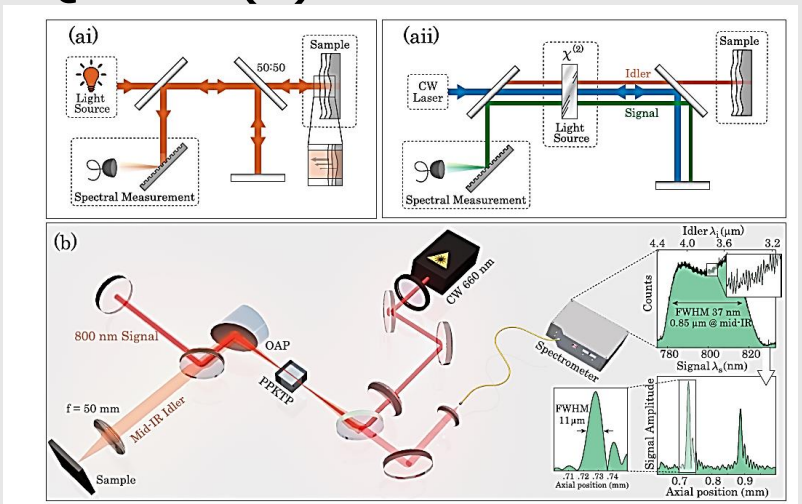


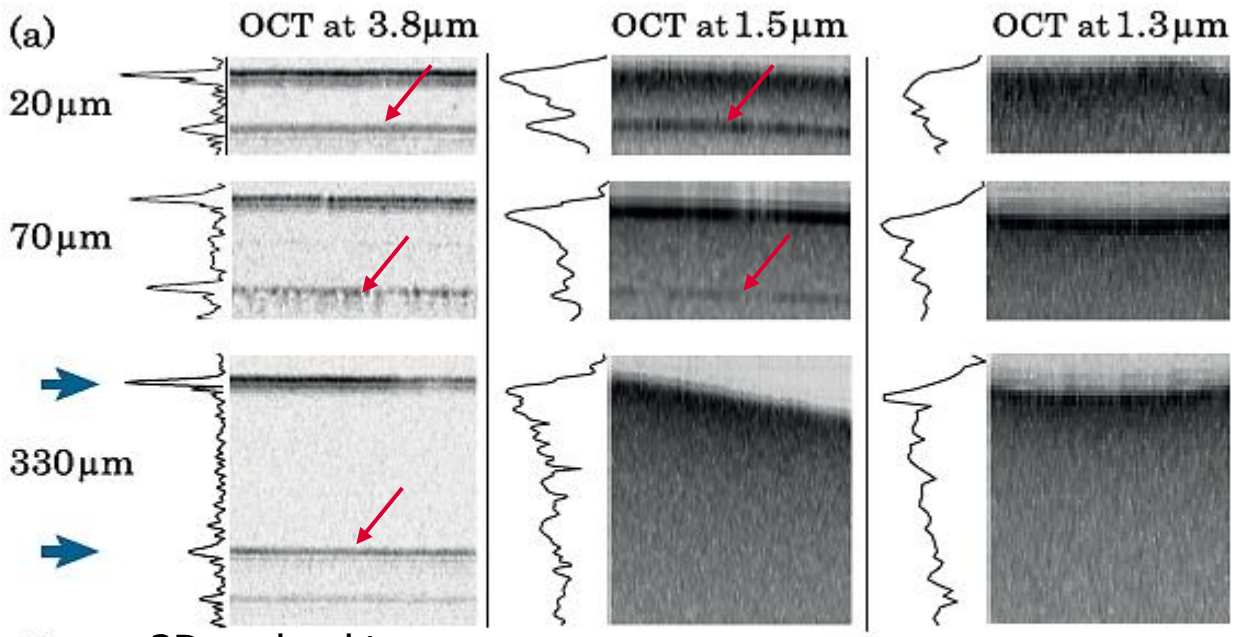
Bild- Quelle: Vanselow et al.
https://doi.org/10.1364/OPTICA.400128

- (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

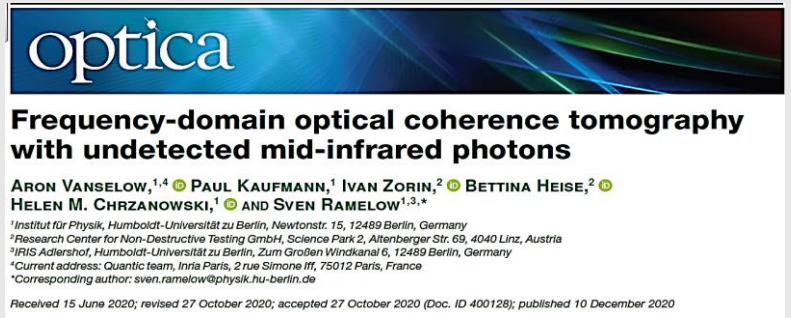
MIR – OCT
Quantum (q)

NIR – OCT
Klassisch (k)

NIR – OCT
Klassisch (k)



- **Test:** Detektierbarkeit des Interfaces zwischen Alumina-Keramik zu Zellulose-Acetat mit zunehmender Dicke des Keils
- **Sichtbar** in MIR-qOCT: bis ca. 330µm
- **Sichtbar** in NIR-kOCT: bis ca. 70µm
- **Nicht sichtbar** in NIR-kOCT

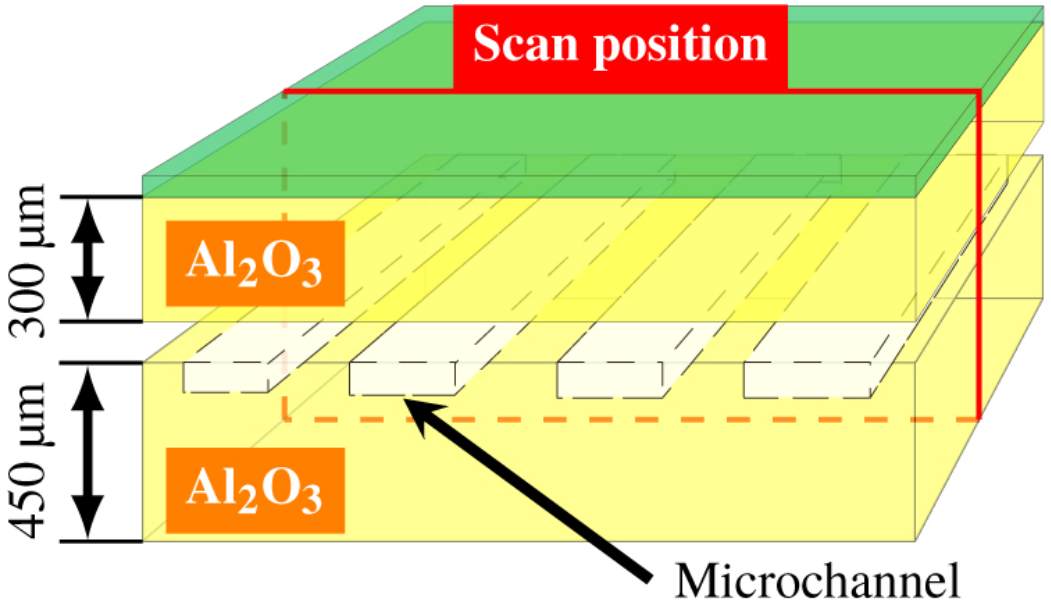

optica

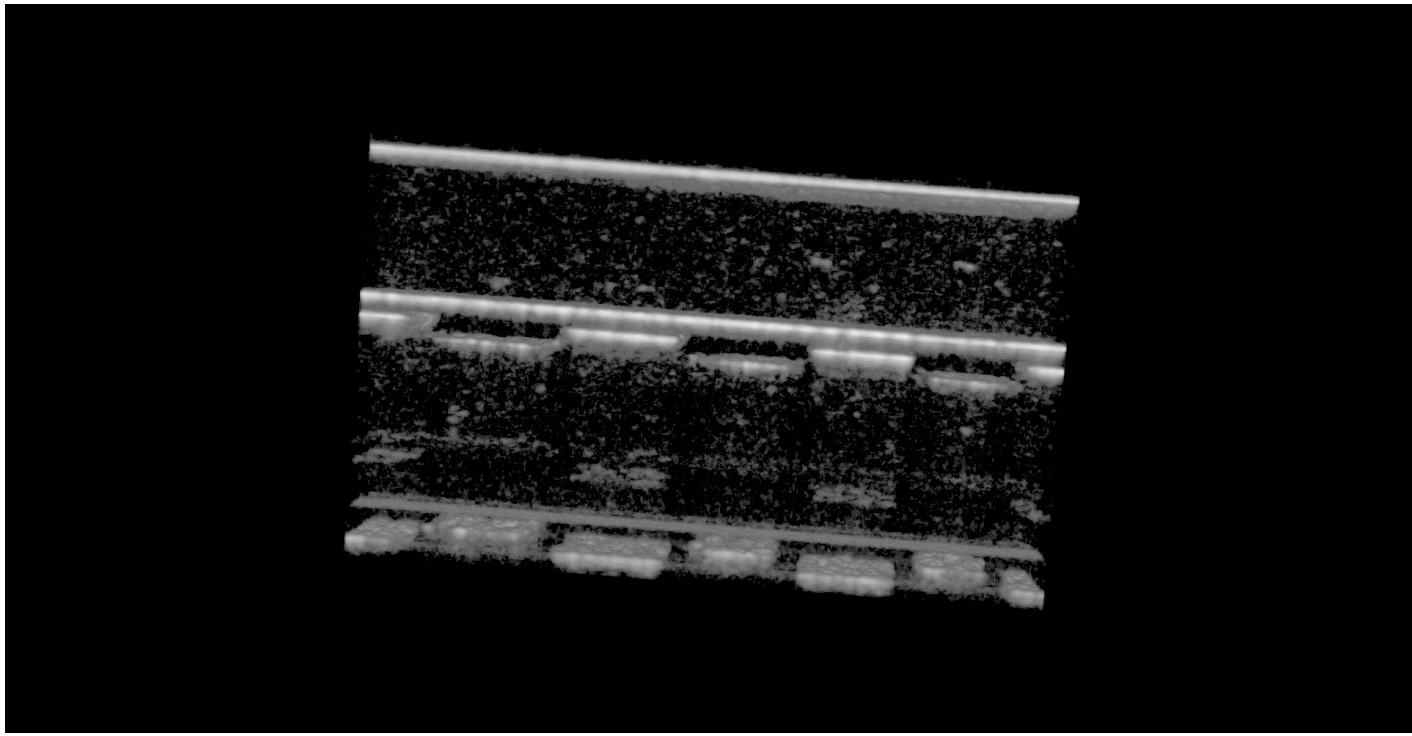
Frequency-domain optical coherence tomography with undetected mid-infrared photons

Aron Vanselow,[1,4] Paul Kaufmann,[1] Ivan Zorin,[2] Bettina Heise,[2] Helen M. Chrzanowski,[1] and Sven Ramelow[1,3,*]

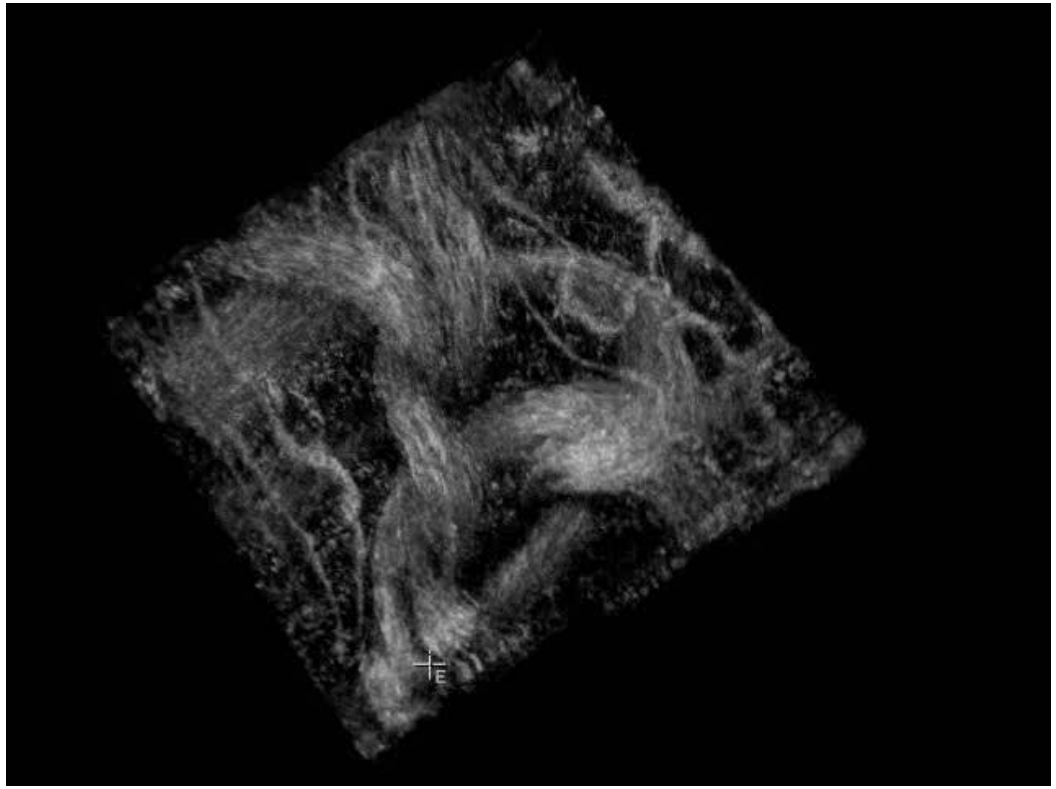
[1]Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin, Newtonstr. 15, 12489 Berlin, Germany
[2]Research Center for Non-Destructive Testing GmbH, Science Park 2, Altenberger Str. 69, 4040 Linz, Austria
[3]IRIS Adlershof, Humboldt-Universität zu Berlin, Zum Großen Windkanal 6, 12489 Berlin, Germany
[4]Current address: Quantic team, Inria Paris, 2 rue Simone Iff, 75012 Paris, France
*Corresponding author: sven.ramelow@physik.hu-berlin.de

Received 15 June 2020; revised 27 October 2020; accepted 27 October 2020 (Doc. ID 400128); published 10 December 2020


Scan position
300 µm
Al_2O_3
450 µm
Al_2O_3
Microchannel



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

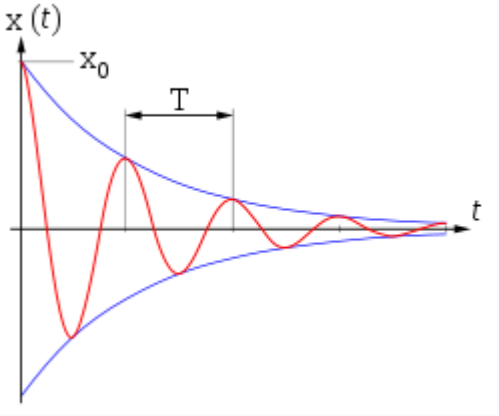


RECENDT

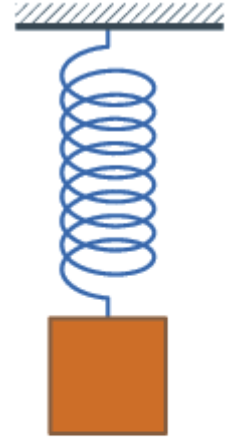
Journal of Biomedical Optics, Vol. 24, Issue 2, 026003 (2019)

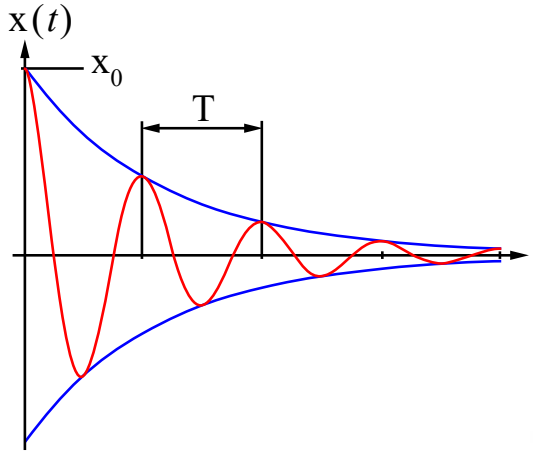
We are RECENDT

RECENDT
RESEARCH CENTER NON DESTRUCTIVE TESTING



Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Größe bei einer freien gedämpften Schwingung.



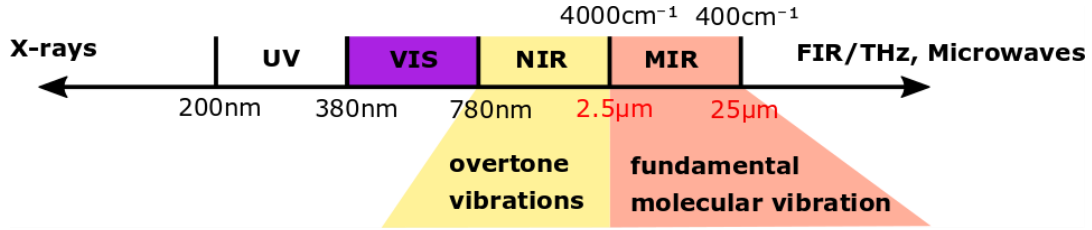


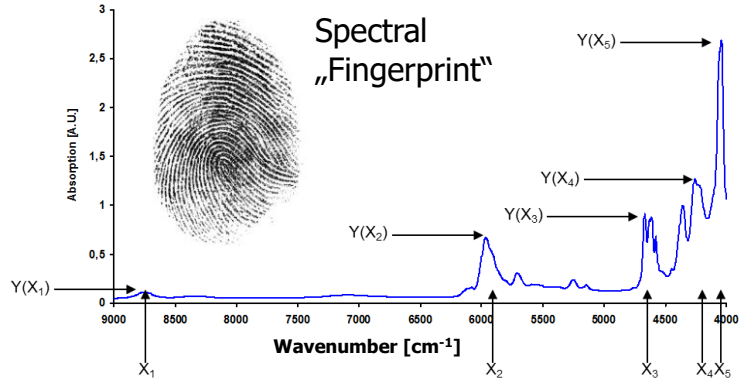
Von Jahobr - Eigenes Werk, Gemeinfrei, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4469984

Von Oleg Alexandrov - self-made with Matlab. Converted to gif animation with the ImageMagick convert tool,Gemeinfrei, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2292452

Measurement of molecular vibrations (solid, liquid, gas)

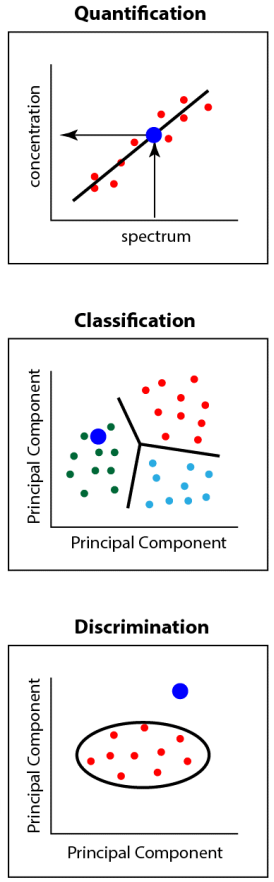
Information about chemical functional groups (e.g., CH_2 group)



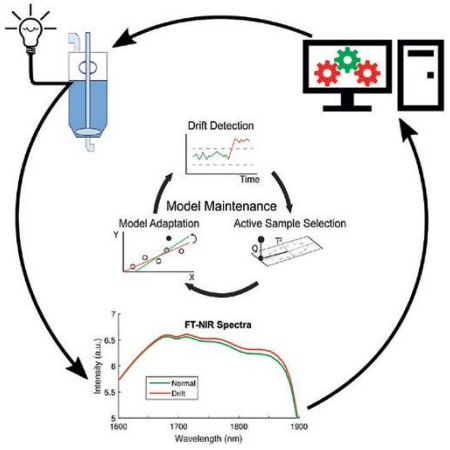


Spectral data are multidimensional:

- Application of multivariate data analysis tools
- Modelling of spectral information into chemical information
- NEW: implementation of machine learning concepts



Current topics

Model life cycle management

Chemometrics as a Service - ChemSaaS