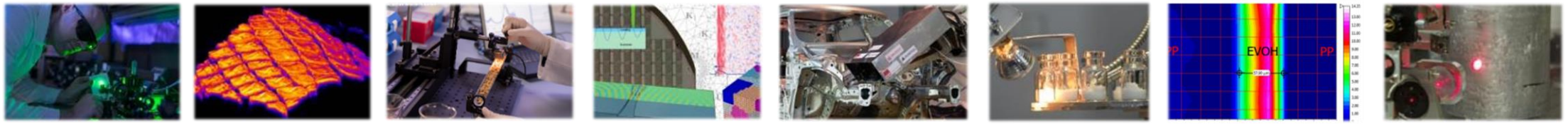
Nichtlineare Interferometrie

Infrarotspektroskopie und Optische Kohärenztomographie mit nicht-detektierten Photonen

Paul Gattinger

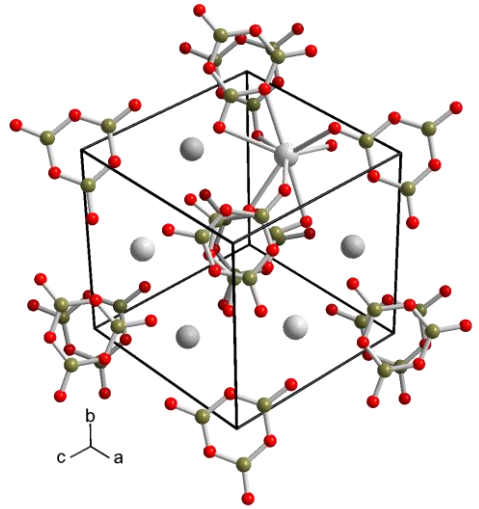
RECENDT
RESEARCH CENTER NON DESTRUCTIVE TESTING

Member of UAR INNOVATION NETWORK



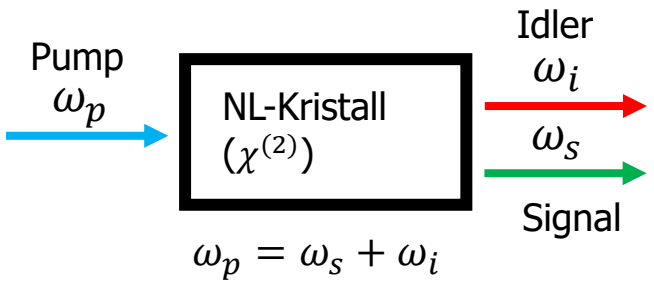
Nichtlineare Optik

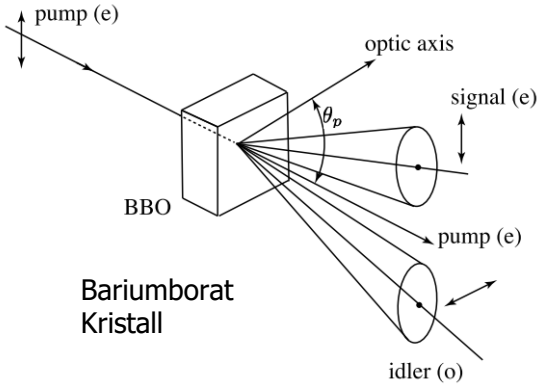
- Nichtlineare (NL) Antwort eines Materials (Polarisation) auf ein elektrisches Feld (Lichtwelle)
- Für NL-Effekte 2.Ordnung werden nichtsymmetrische Kristalle benötigt
- NL-Effekte 2. Ordnung ~10^{12}-mal schwächer als lineare Effekte



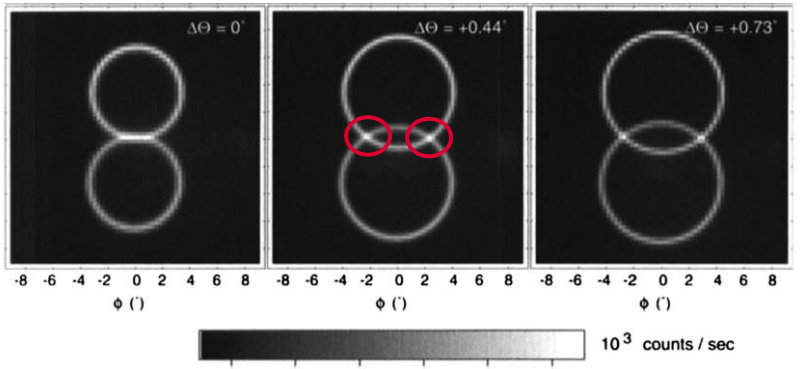
https://de.wikipedia.org/wiki/Bariumborat#/media/Datei:Unit_cell_of_barium_metaborate.png

- **SPDC** - **S**pontaneous **P**arametric **D**own-**C**onversion (Parametrische Fluoreszenz)
  - Quanteneffekt: spontane Konversion eines Photons in zwei Sekundärphotonen
  - Energie- und Impulserhaltung
  - Entstehende Photonen sind korreliert (verschränkt)





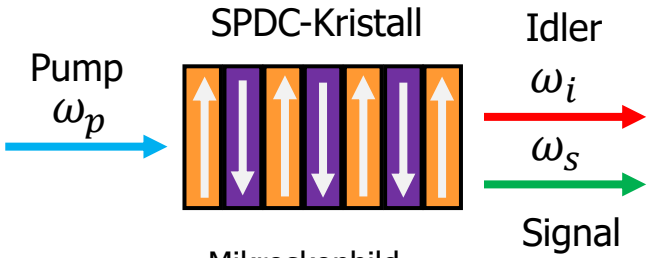
Polarisationsverschränkung



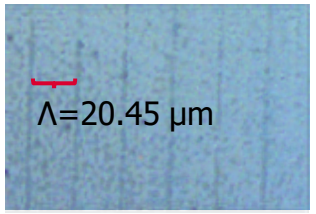
R.W. Boyd. Nonlinear Optics. Academic Press, 2020. 3rd Edition. doi:10.1016/C2015-0-05510-1.

SPDC-Kristalle für die Infrarotspektroskopie

- Kollineare verschränkte Photonen (Energie- bzw. Impulsverschränkung)
- Erzeugung mittels periodisch gepolter Kristalle (alternierende Ausrichtung der Kristallachse)
- Vorteile: leicht zu justieren, breitbandige Emission möglich, individuelles Kristalldesign, Effizienz



Mikroskopbild des Kristalls



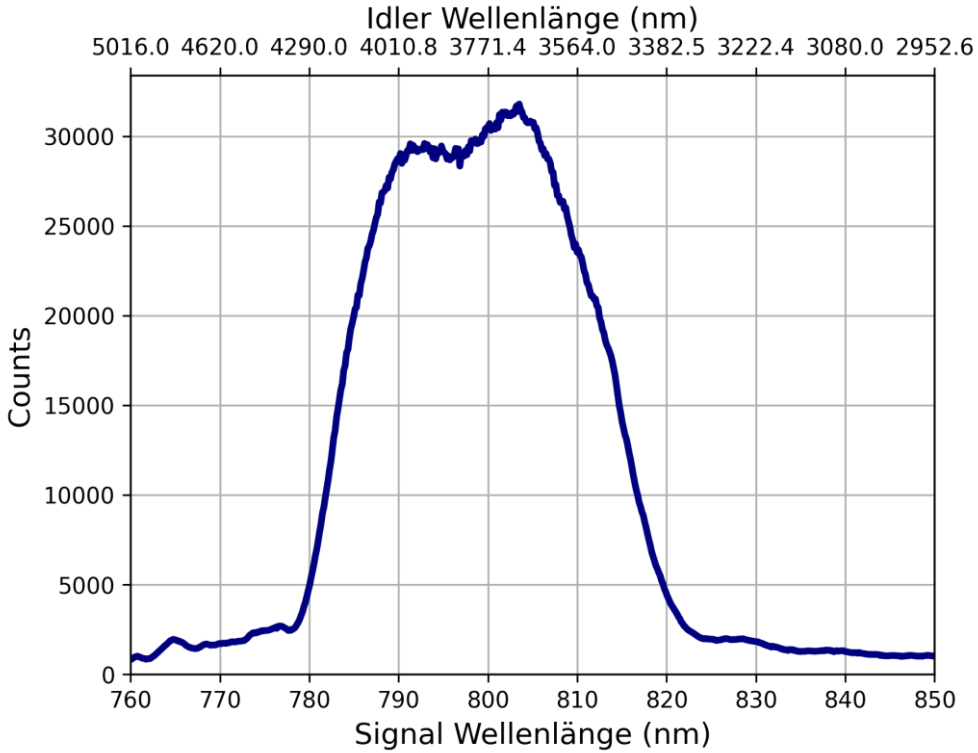
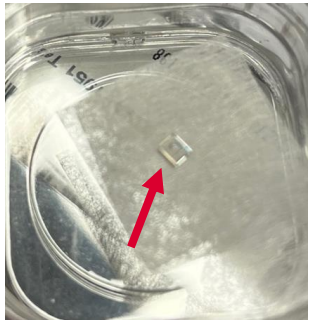


Abbildung: gemessenes Signal-Spektrum mit korrespondierenden Idler-Wellenlängen (oben)

Energieerhaltung: $\omega_p = \omega_i + \omega_s$

Impulserhaltung: (Quasi phase-matching) $\Delta k = k_p - k_s - k_i - \frac{2\pi}{\Lambda}$

Foto des Kristalls



Abmessungen: 2*1*2.5 mm³

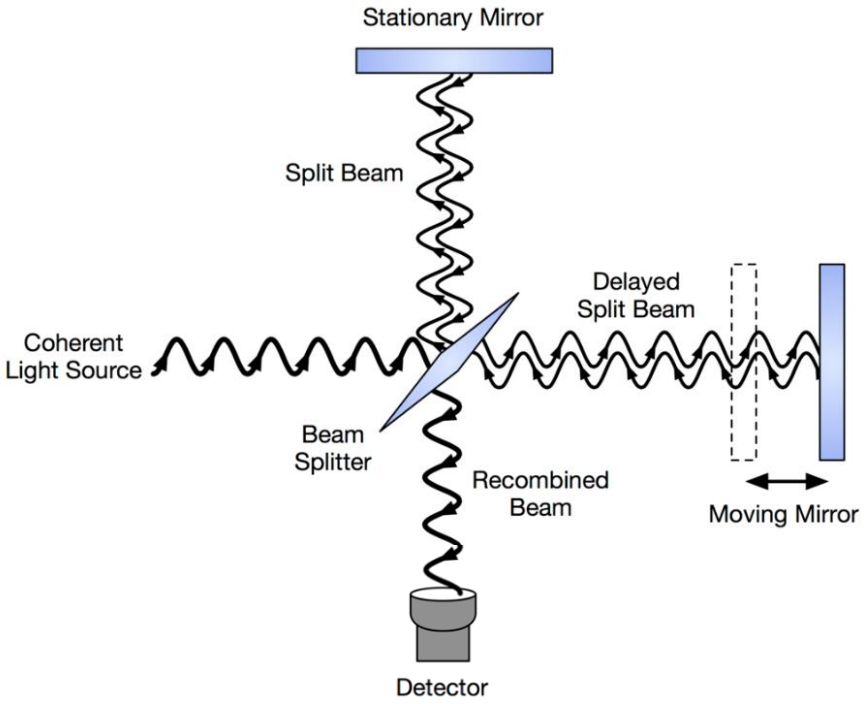
Mikroskopbild des Kristalls mit 10-facher Vergrößerung



Klassische Interferometrie (monochromatisches Licht)

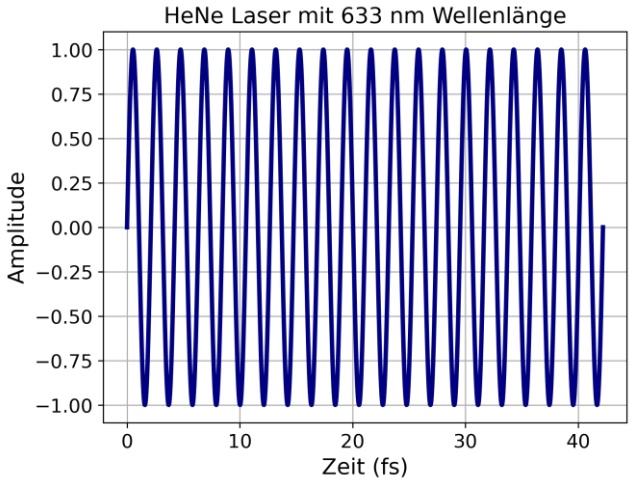
Michelson Interferometer

- Strahlteiler transmittiert/reflektiert einfallendes Licht zu 50%

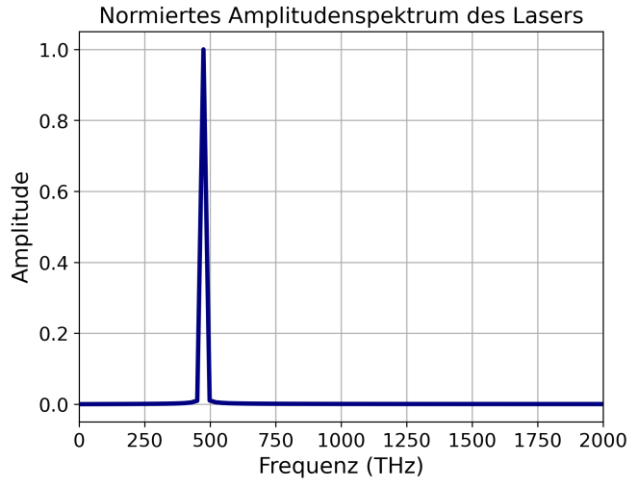


Adapted from: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier-transform_infrared_spectroscopy

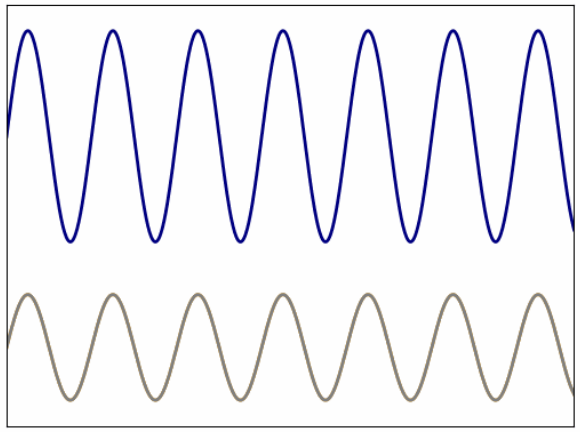
Interferogramm eines **monochromatischen** Lasers:



FT



Verschieben des Referenzspiegels und gleichzeitiges Auslesen am Detektor → Interferogramm



Interferenz

Referenzstrahl

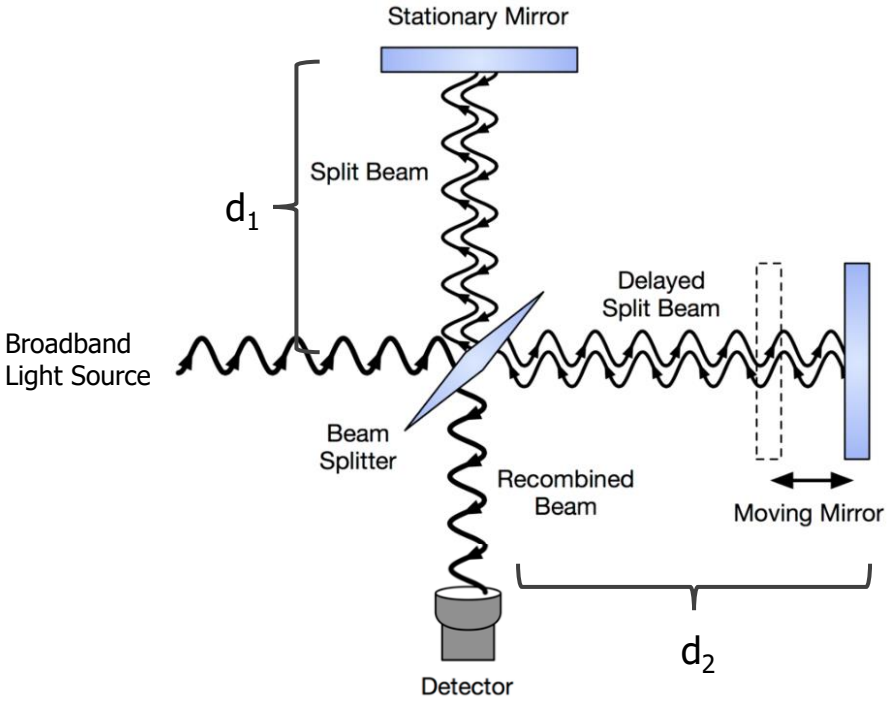
Stationärer Strahl

Das detektierte Signal (Interferogramm) entspricht einer Sinuswelle

Klassische Interferometrie (breitbandiges Licht)

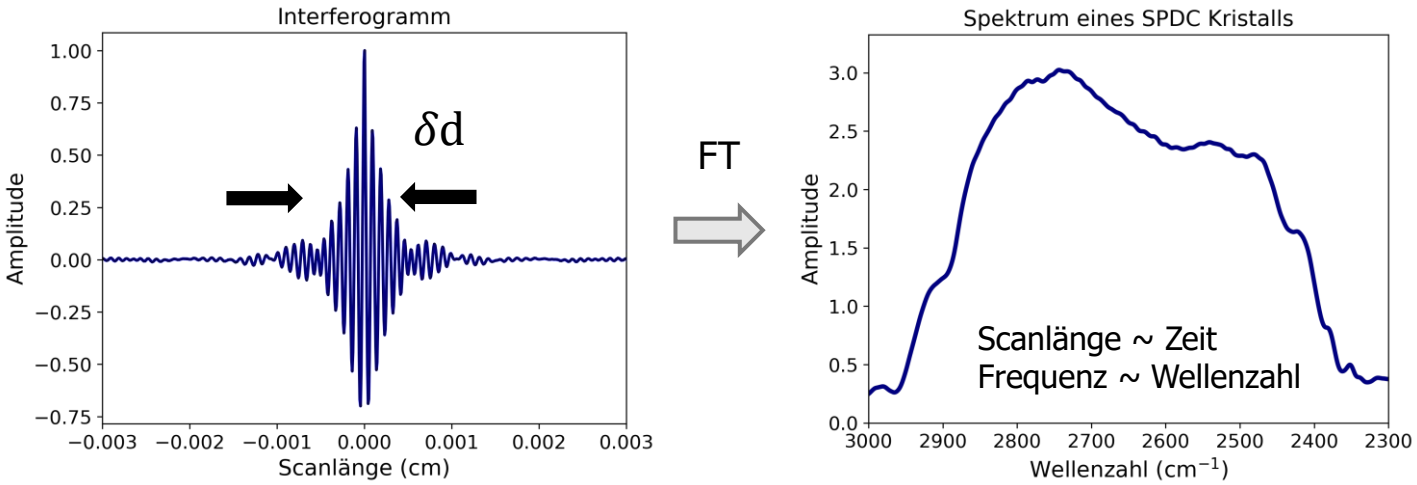
Michelson Interferometer

- Strahlteiler transmittiert/reflektiert einfallendes Licht zu 50%



Adapted from: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier-transform_infrared_spectroscopy

Interferogramm eines **breitbandigen** Strahlers:



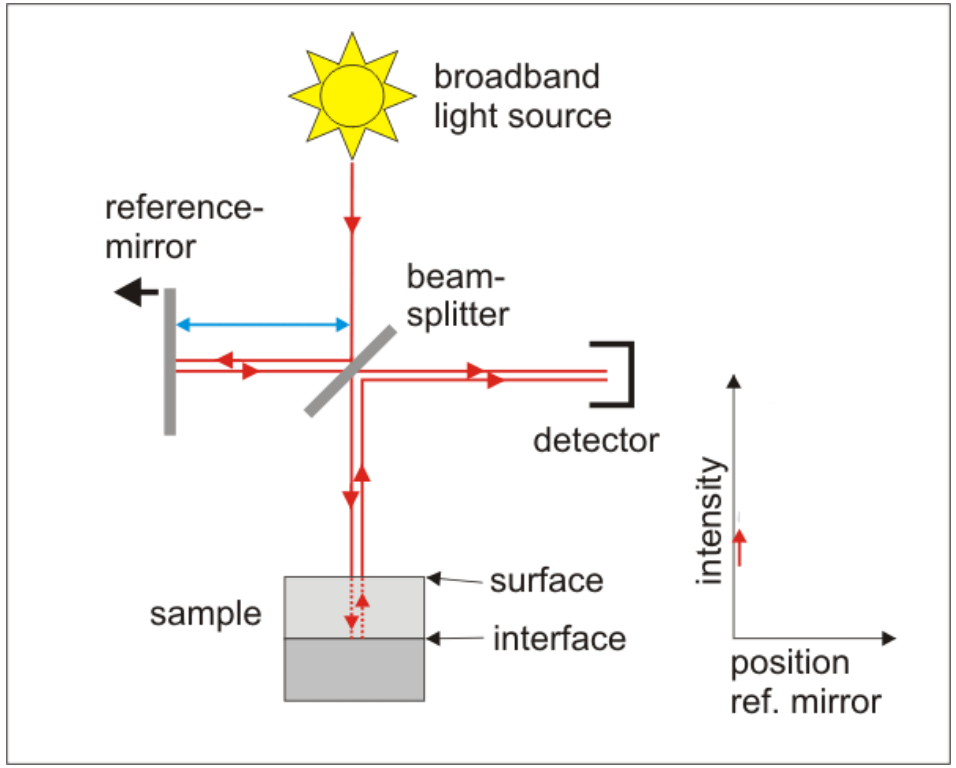
Verschieben des Referenzspiegels und gleichzeitiges Auslesen am Detektor
→ Interferogramm

- **Maximale konstruktive Interferenz**, wenn $d1 = d2$
- Spektrale Auflösung ist proportional zur Scanlänge
- δd ist die **Kohärenzlänge** des breitbandigen Strahlers
- Kohärenzlänge ist jene Wegdifferenz zweier Teilstrahlen einer Lichtquelle, innerhalb derer ein stabiles Interferenzmuster entstehen kann

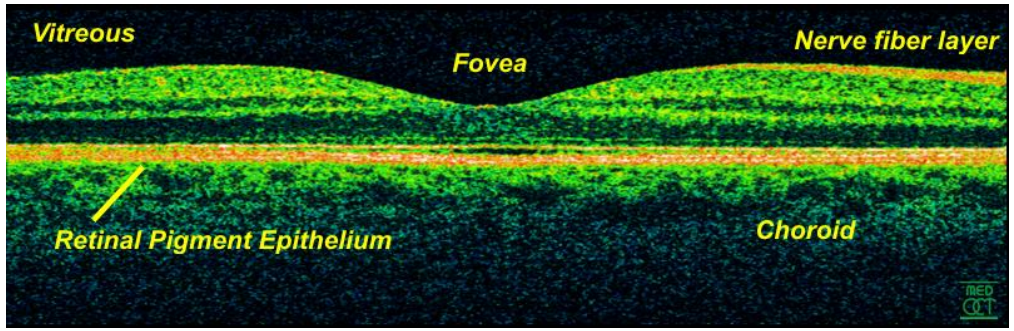
Anwendungsbeispiele der Interferometrie

Optische Kohärenztomographie (Time-domain OCT)

- Interferenzen entstehen durch teilreflektierte Strahlen an Grenzflächen innerhalb eines Mediums (Änderung des Brechungsindex)

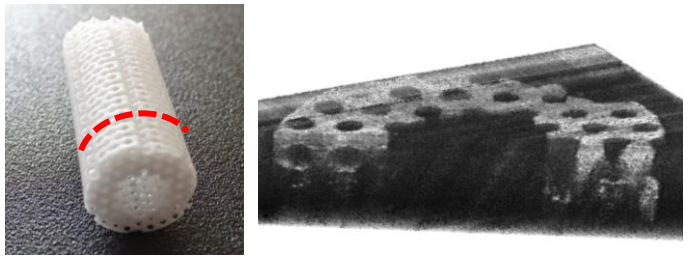


Bekanntestes Beispiel: Ophthalmologie

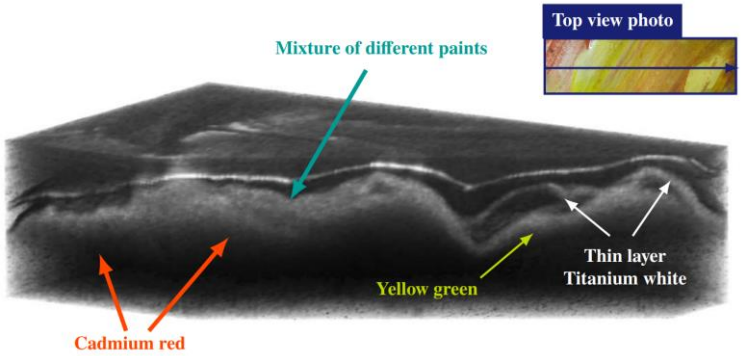


https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_coherence_tomography#/media/File:Retina-OCT800.png

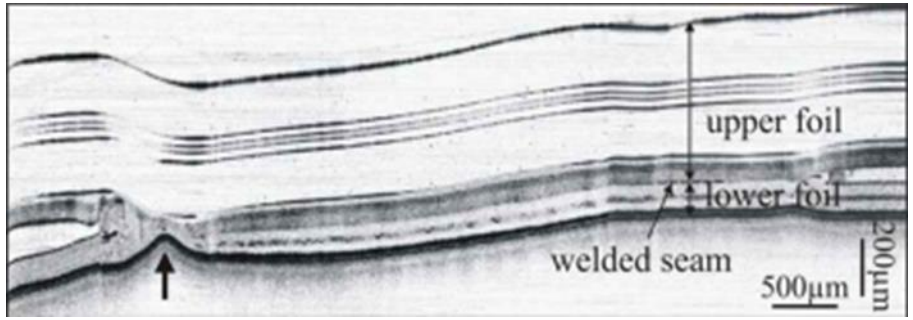
Prüfung 3D gedruckter Keramiken



Untersuchung von Kunst



Fehlerdetektion in Multischichtfolien

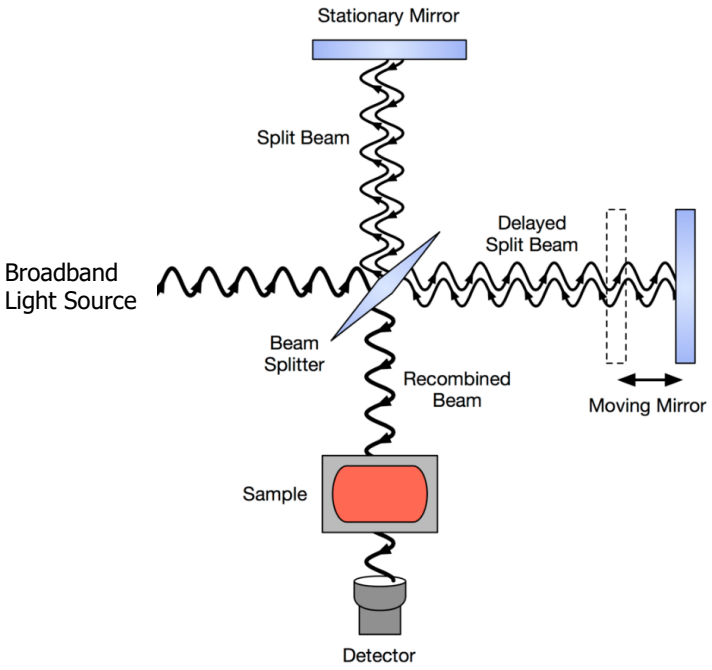


Wiesauer et al., Optics Express **13**, 1015 (2005)

Anwendungsbeispiele der Interferometrie

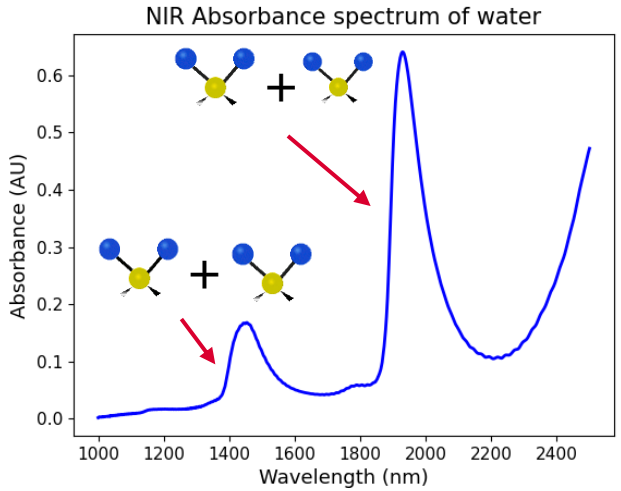
Infrarotspektroskopie

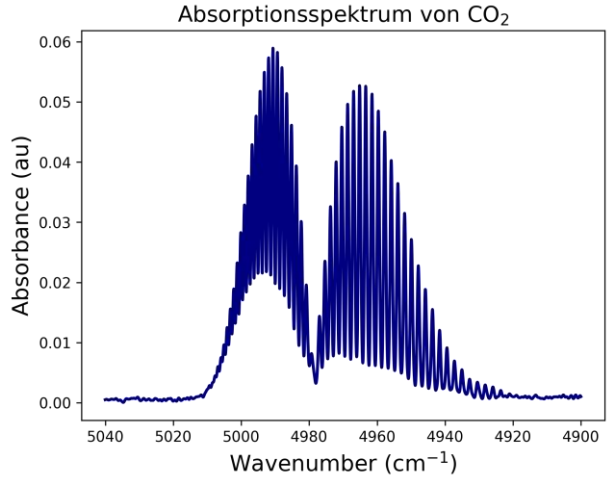
- Moleküle absorbieren spezifische Frequenzen des IR-Lichts

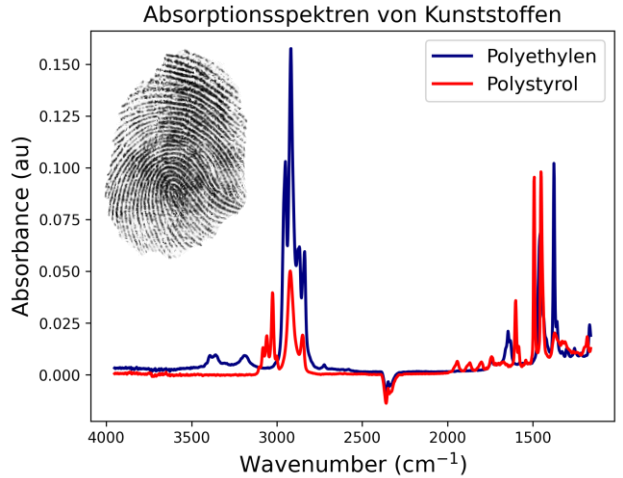


Adapted from: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier-transform_infrared_spectroscopy

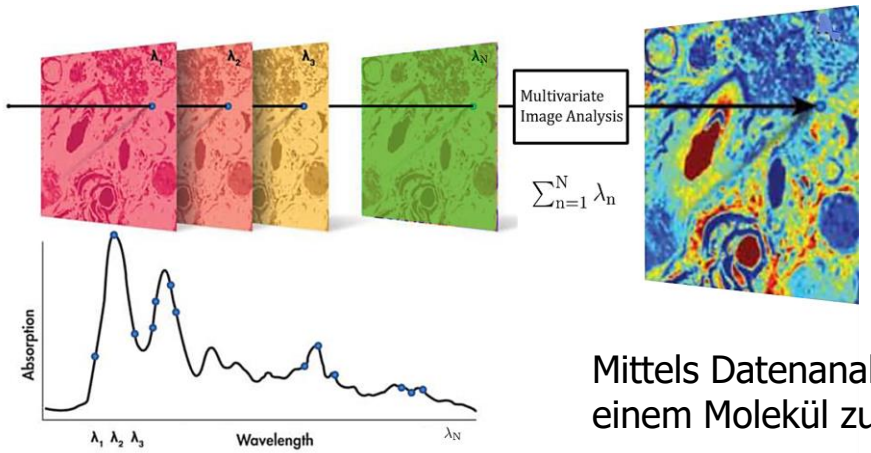
Analyse von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen







Hyperspektrale Bildgebung (IR-Spektrum hinter jedem Pixel)

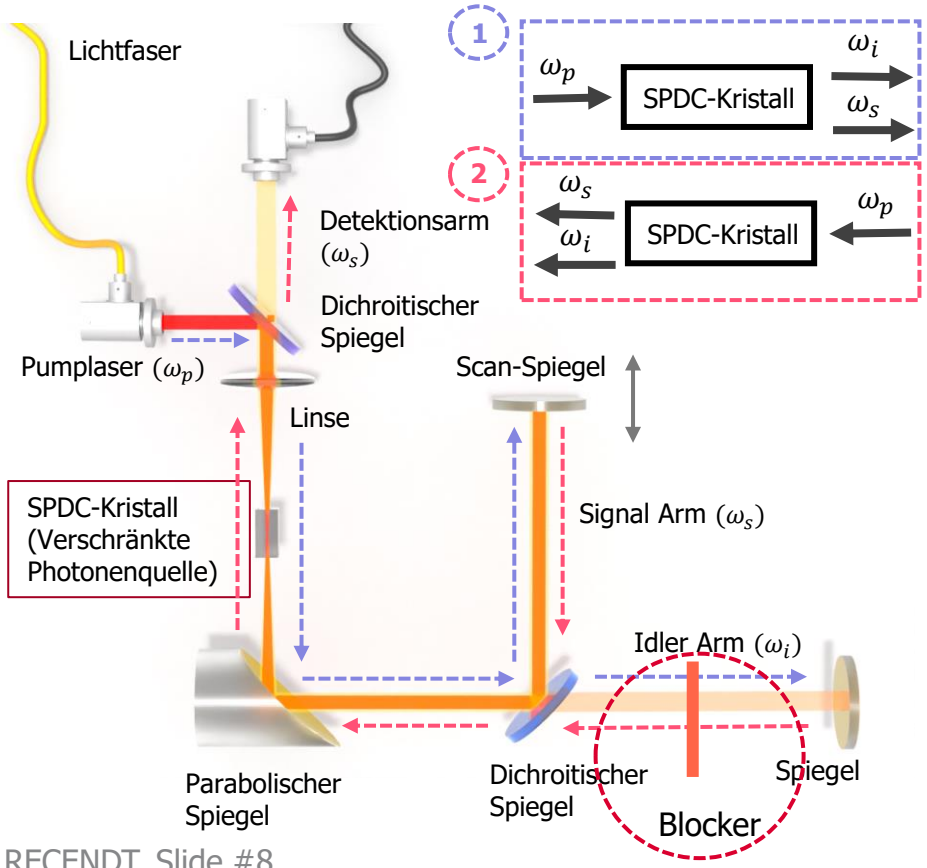


Mittels Datenanalyse kann jeder Pixel einem Molekül zugeordnet werden

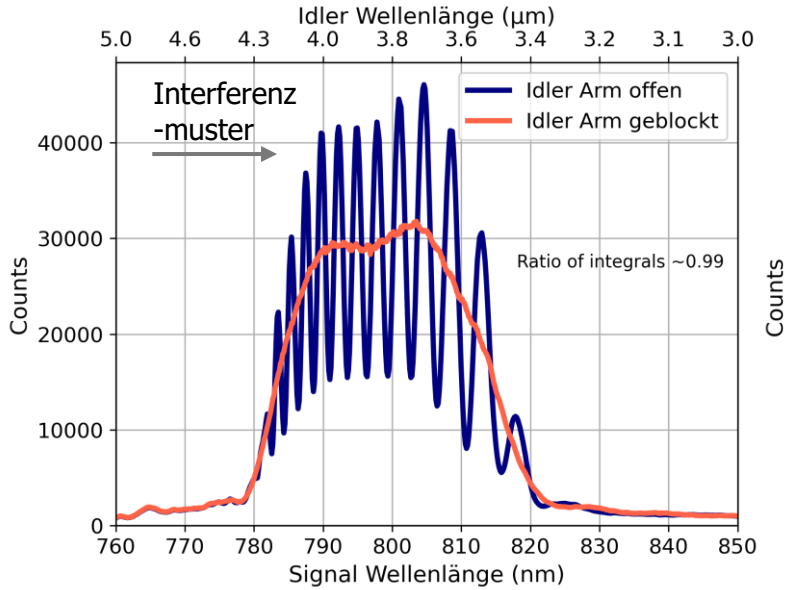
Interferometrie mit nicht-detektierten Photonen

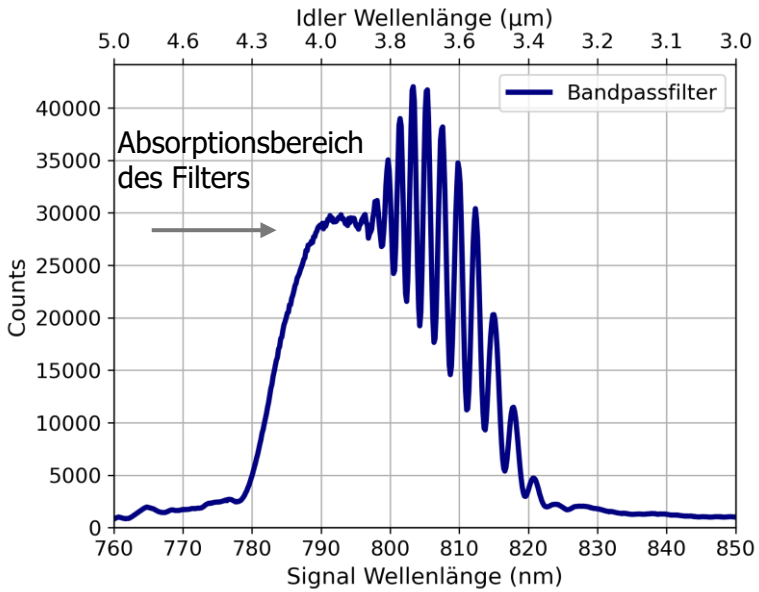
Nichtlineares Interferometer (analog zu Michelson)

- Dichroitischer Spiegel statt Strahlteiler
- Es werden **nur ω_s** Photonen (Lichtteilchen) **gemessen**



- Verschränkte Photonenpaare entstehen bei Hin- und Rückpropagation
- **Interferenz** tritt auf, wenn Interferometer perfekt ausgerichtet ist
- Prinzip der **Ununterscheidbarkeit** → es kann nicht unterschieden werden, ob ω_s am Hin- oder Rückweg entstanden ist → Interferenz zwischen den ω_s
- Wenn ein $\boldsymbol{\omega_i}$ eines verschränkten Photonenpaares am Hinweg **absorbiert/gestreut** wird, dann wären ω_s Photonen im Detektionsarm im Prinzip unterscheidbar → **Verlust** der **Interferenz**

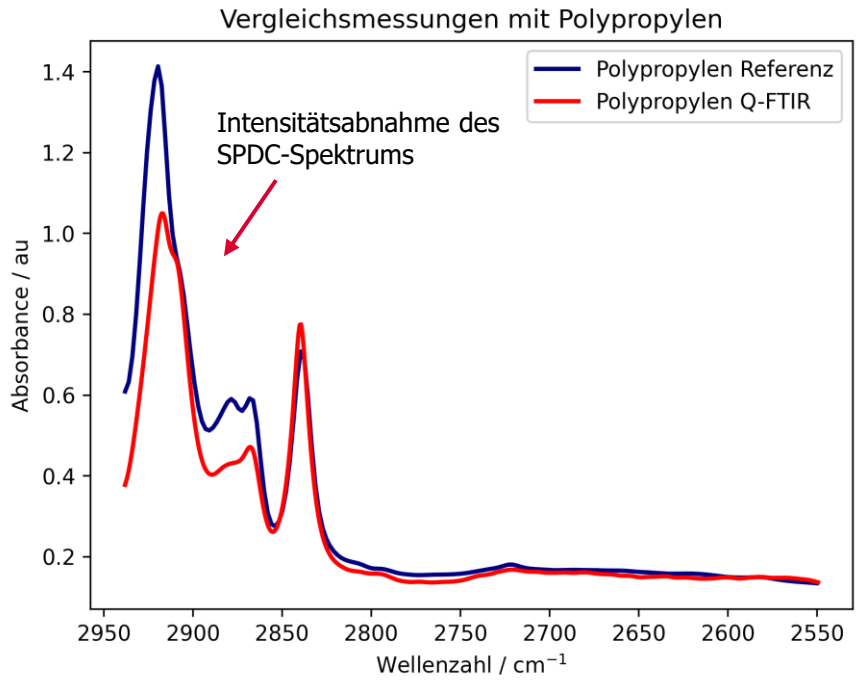




IR-Spektroskopie mit nicht-detektierten Photonen

Quanten-FTIR @ RECENDT

- Erstes nichtlineares Spektrometer (Quanten-FTIR Spektrometer) aufgebaut
- Vergleichsmessungen von Polypropylen mit Standard-Spektrometer



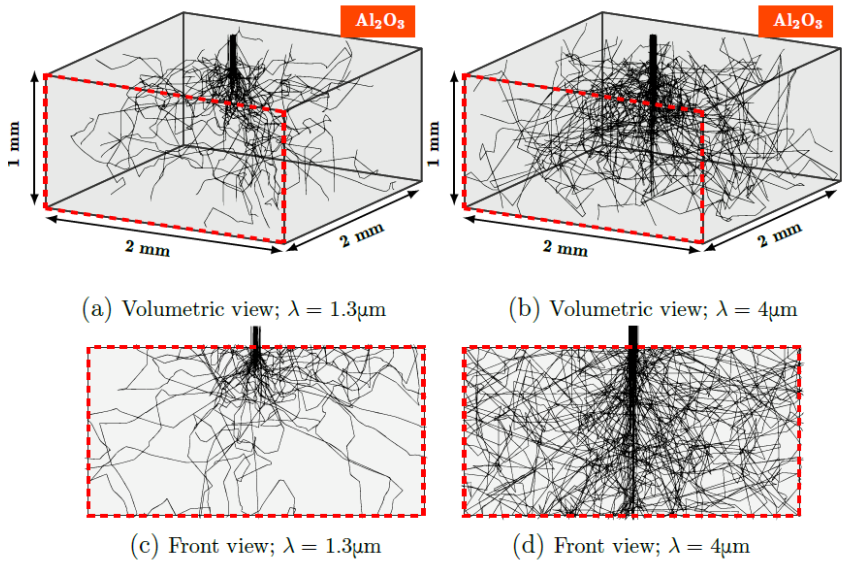
Besonderheiten

- Das **detektierte Licht** (Photonen) hat **nie** direkt mit der Probe **wechselgewirkt**
  ω_i wechselwirkt, aber ω_s wird gemessen
- **Detektoren** für den **sichtbaren Spektralbereich** können verwendet werden
- **Geringe Leistung**, die auf die Probe einwirkt ist ~ 120 pW
- Phasensensitivität (gilt auch für klassischen Ansatz) → wellenlängenabhängiger Brechungsindex der Probe kann gemessen werden

OCT mit nicht-detektierten Photonen

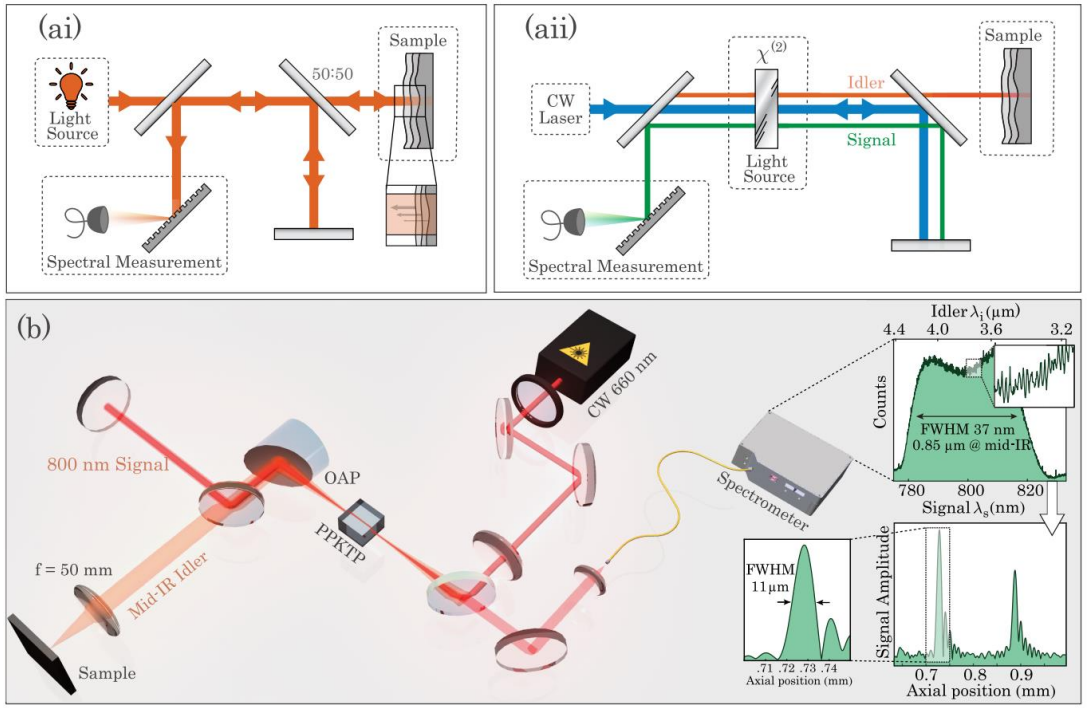
Besonderheiten

- Das detektierte Licht (Photonen) hat nie direkt mit der Probe wechselgewirkt
  ω_i wechselwirkt, aber ω_s wird gemessen
- Detektoren für den sichtbaren Spektralbereich können verwendet werden
- Geringe Leistung, die auf die Probe einwirkt ist ~ 120 pW
- **Streuung im mittleren Infrarot geringer** → größere Eindringtiefe

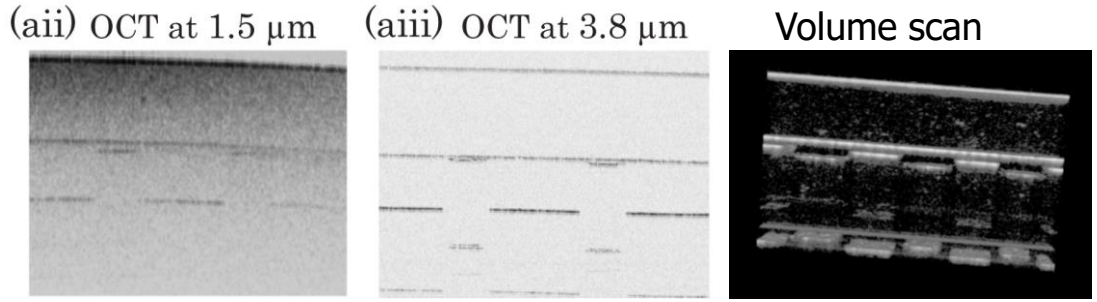


(a) Volumetric view; $\lambda = 1.3\mu m$ (b) Volumetric view; $\lambda = 4\mu m$

(c) Front view; $\lambda = 1.3\mu m$ (d) Front view; $\lambda = 4\mu m$



(ai): Schema eines klassischen OCT-Systems **(aii):** OCT mit nicht-detektierten Photonen; **(b):** detailliertes Layout des Systems; **(aii):**



(aii): B-Scan mit klassischem OCT **(aiii):** QOCT; 3D Scan

A. Vanselow; P. Kaufmann; I. Zorin; B. Heise; H.M. Chrzanowski; S. Ramelow. Frequency-domain optical coherence tomography with undetected mid-infrared photons. *Opt. Vol. 7, Issue 12, pp. 1729-1736* **2020**. 7(12): 1729–1736.

Acknowledgement

Quantum Sensing, Infrared & Raman, OCT @ RECENDT


I. Zorin

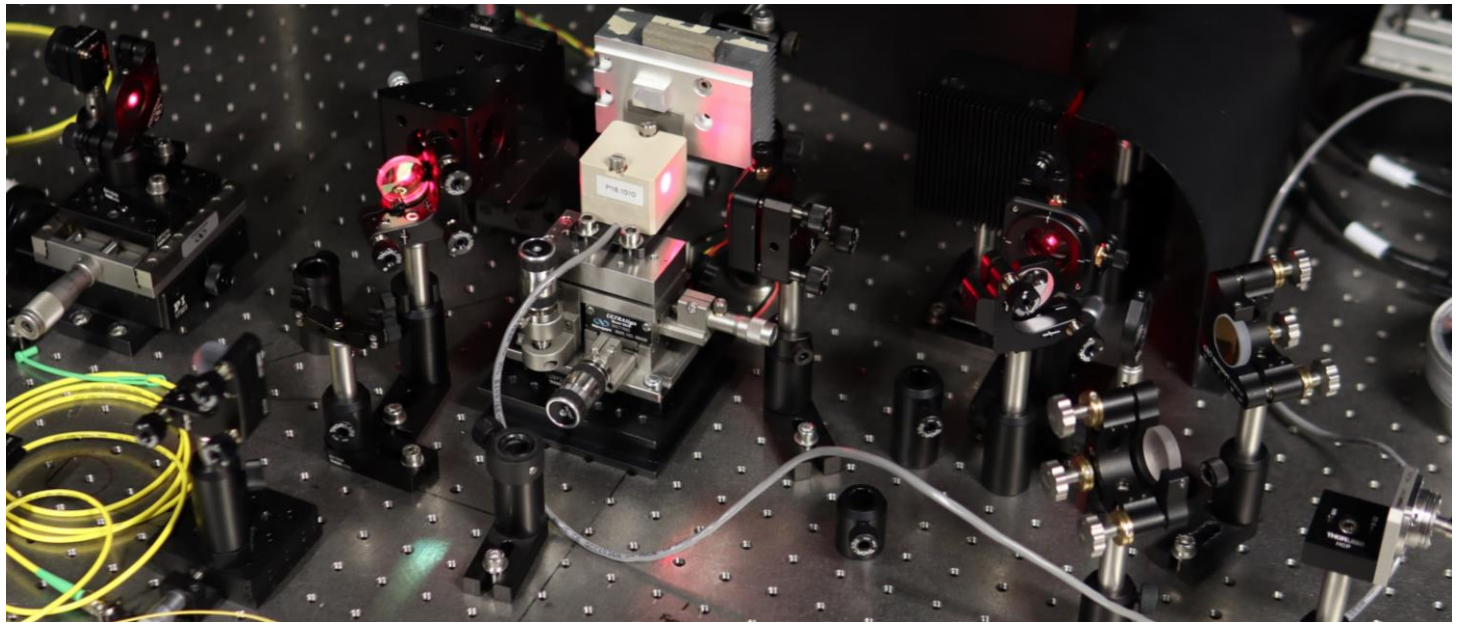

P. Burgholzer


M. Brandstetter


B. Heise

Wissenschaftl. Betreuung JKU


A. Schell



This project is co-financed by research subsidies granted by the government of Upper Austria
QUICK Wi-2022-597365/18-Au