



Universität Augsburg
Mathematisch-Naturwissenschaftlich-
Technische Fakultät

Seminar über Festkörperspektroskopie: Quasioptische Spektroskopie

Jonas Kell

Augsburg, 01.07.2021

Abschnitte

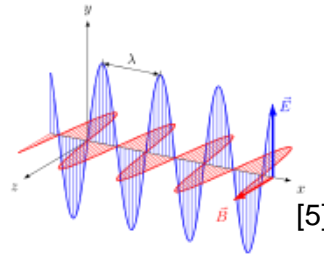
- 1** Übersicht und Geschichte
- 2** Instrumente und Erzeugung
- 3** Messgrößen und Messverfahren
- 4** Experimentelle Aufbauten
- 5** Experimente aus der (aktuellen) Forschung

Charakterisierung der Strahlung

Übersicht und Geschichte

■ Bezeichnungen

- „(Sub-)Millimeterwellen“
- „(Sub-)Terahertz-Strahlung“

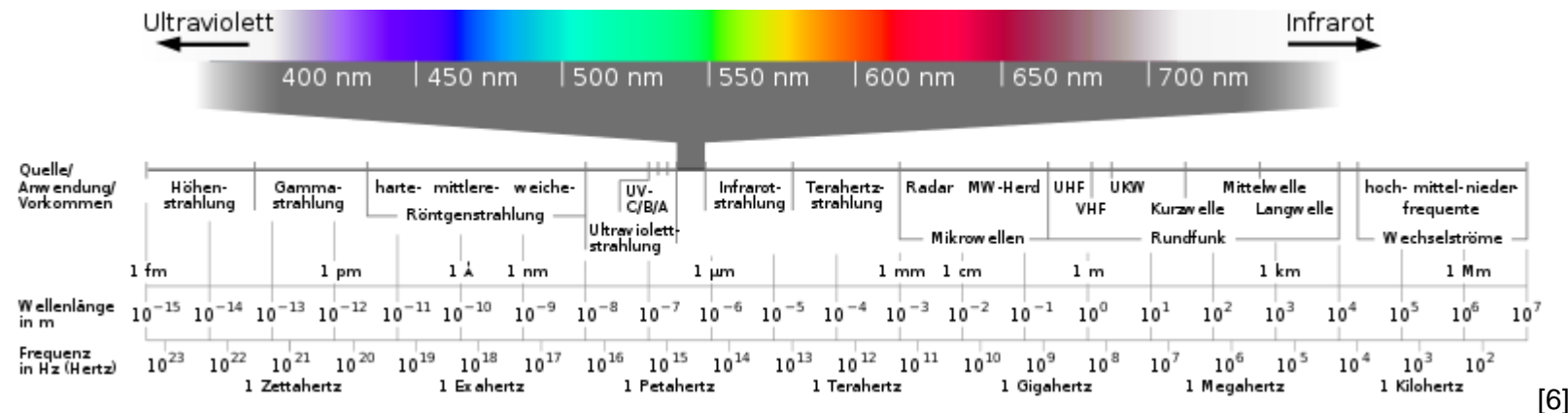


- + Kein Medium notwendig
- + Führung nicht unbedingt notwendig
- + Praktisch Temperaturunabhängig
- + Praktisch Magnetfeldunabhängig

■ Elektromagnetische Strahlung

- Wellenlänge $\lambda=1\text{cm}$ bis $\lambda=200\mu\text{m}$
- Frequenz $f=0,03\text{THz}$ bis $f=1,5\text{THz}$
- Wellenzahl $\nu=1\text{cm}^{-1}$ bis $\nu=50\text{cm}^{-1}$

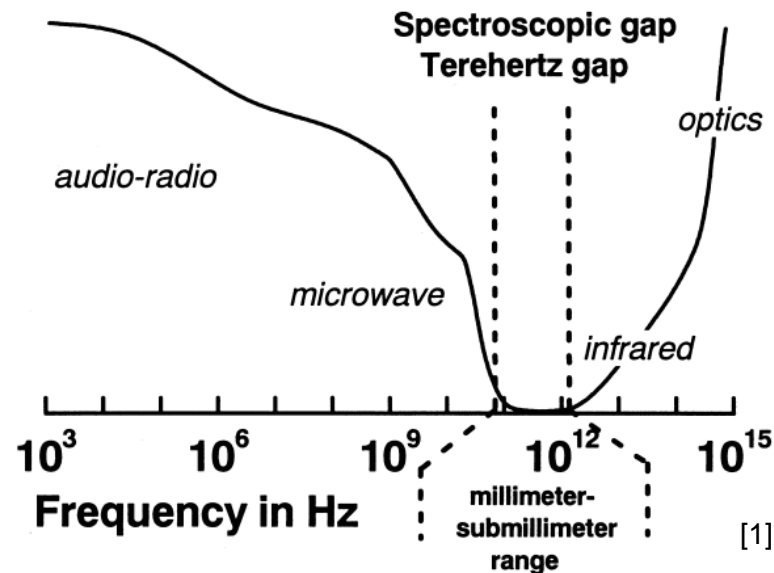
$$\nu = \frac{1}{\lambda} \quad f = \frac{c}{\lambda}$$



Geschichte – Die Terahertz-Lücke

Übersicht und Geschichte

+ Schließt Lücke im Frequenzbereich für die Spektroskopie



Erschließung:

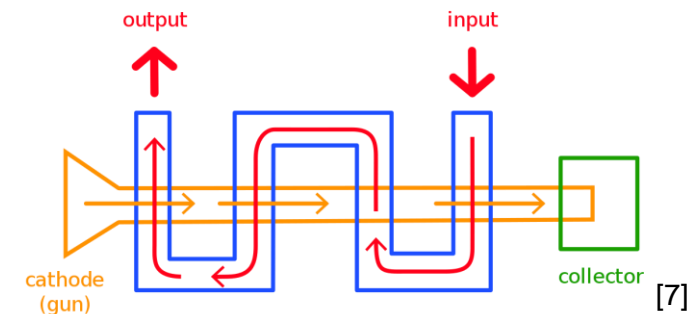
- Vorstellung des BWO (1951)
 - Bernard Epsztein (M-Typ)
 - Rudolf Kompfner (O-Typ)

Eigenschaften - Kurzübersicht

Übersicht und Geschichte

- Praktische Größe der Wellenlängen
 - Ideale Größe für Handhabung in Experimentieraufbauten
 - Im menschlichen „Präzisionsbereich“
 - Vereint dielektrische Phänomene und geometrischen Optik
- Energetisch günstig
 - Viele interessante Energielücken liegen im Energiebereich der Strahlung
 - Für den Menschen praktisch harmlos
 - Energiebereich ohne allzu großen Aufwand detektierbar
- Mittlerweile sehr gut erzeugbar
 - Erzeugbar mit hoher Intensität
 - Hohe spektrale Auflösung
 - Gut monochromatisierbar
 - Gut polarisierbar

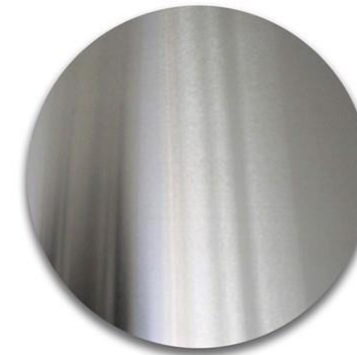
- + Alle Vorteile elektromagnetischer Strahlung
- + Geeignete Wellenlänge
- + Geeignete Energie
- + Spektrale Vorteile
- + Polarisierbarkeit



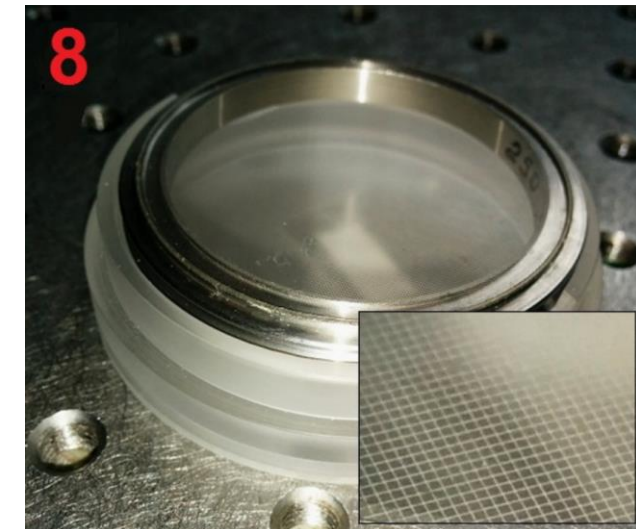
Spiegel

Instrumente und Erzeugung

- Fast perfekte Spiegel
 - Metallplatte reflektiert praktisch alle Strahlung
 - Hohe Leitfähigkeit
 - Hoher Reflexionskoeffizient
 - Niedriger Transmissions- und Absorptionskoeffizient
- Perfekte Spiegel
 - Supraleiter
- Absichtlich nicht-perfekte Spiegel
 - Sehr dünne Metallfolien
 - Messung der Transmissions-/Reflexionskoeffizienten
 - Gitter aus Metalldrähten
 - Teildurchlässige Spiegel (Fabry-Perot)



[8]

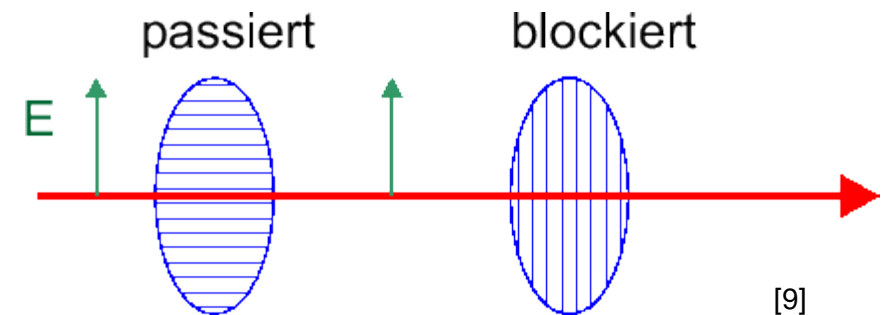


[3]

Polarisatoren

Instrumente und Erzeugung

- Polarisation durch Absorption
 - z.B. optische Polarisatoren (Langkettige Polymere)
- Polarisation durch Reflexion
 - z.B. Reflexion an parallelen Metallfäden auf Mylar
- Für Millimeterwellen sehr viel leichter herzustellen!

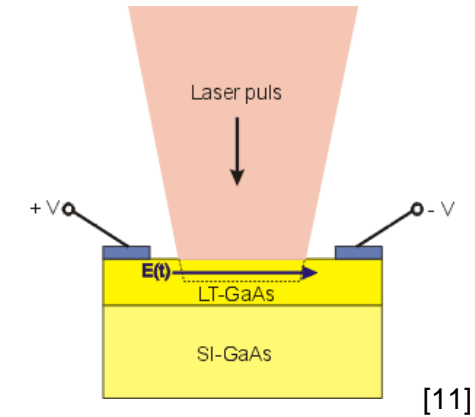


[9]

Erzeugung: Laser-Puls-Antennen

Instrumente und Erzeugung

- Umwandlung von Laserpulsen in Terahertzwellen
 - GaAs oder InGaAs Film
 - Metallische Kontakte als Antenne
 - Kann mit Linse fokussiert werden
- Kann als Emitter und Detektor verwendet werden



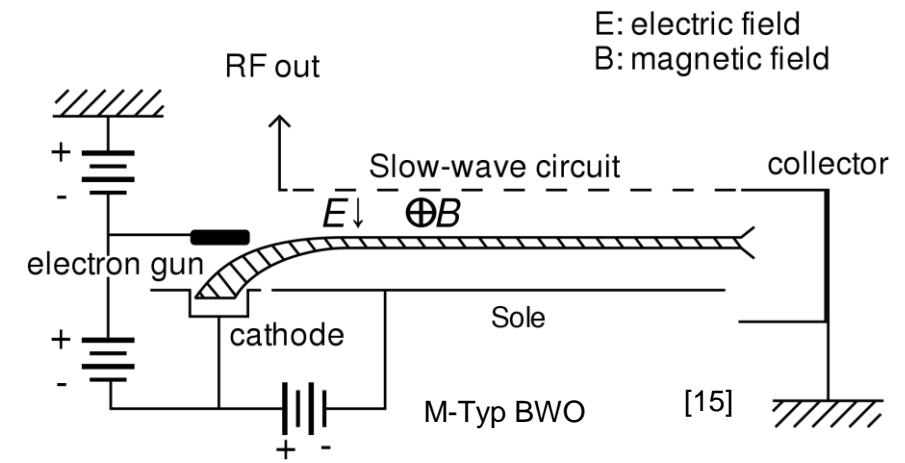
- Emission als Puls
 - Messung in der Zeit-Domäne
 - Fourier-Transformation
 - Phasensensitive Messungen möglich
 - z.B. direkte Berechnung von komplexer Transmission



Erzeugung: Backwards-Wave-Oszillatoren

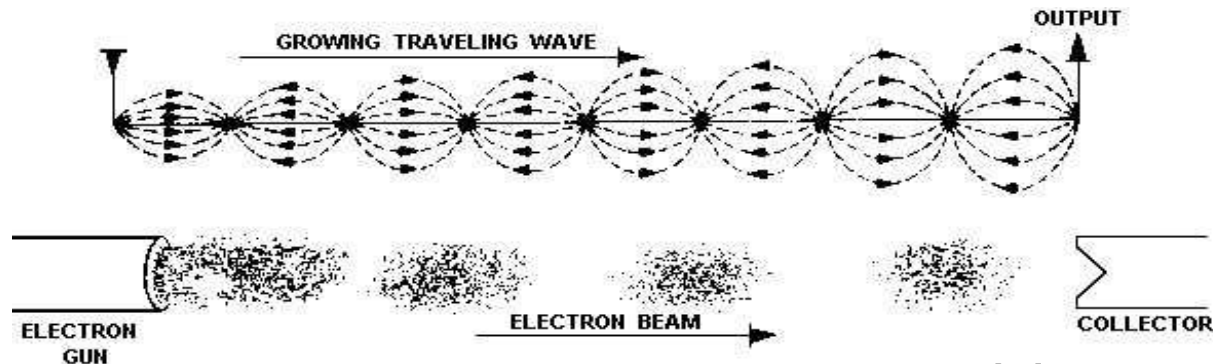
Instrumente und Erzeugung

- Backwards-Wave-Oszillator (BWO)
 - Auch „Carcinotron“
 - Unterteilt in M-Typ und O-Typ Oszillatoren
 - Zuerst nur für Mikrowellen, mittlerweile auch THz-Strahlung
- Familie der „Wanderfeldröhren“
 - Elektronenstrahl in der Mitte eins / durch einen Wellenleiter
 - Elektrisches Feld interagiert mit el-mag-Strahlen
 - Geschwindigkeitsmodulation der Elektronen führt zu Oszillation

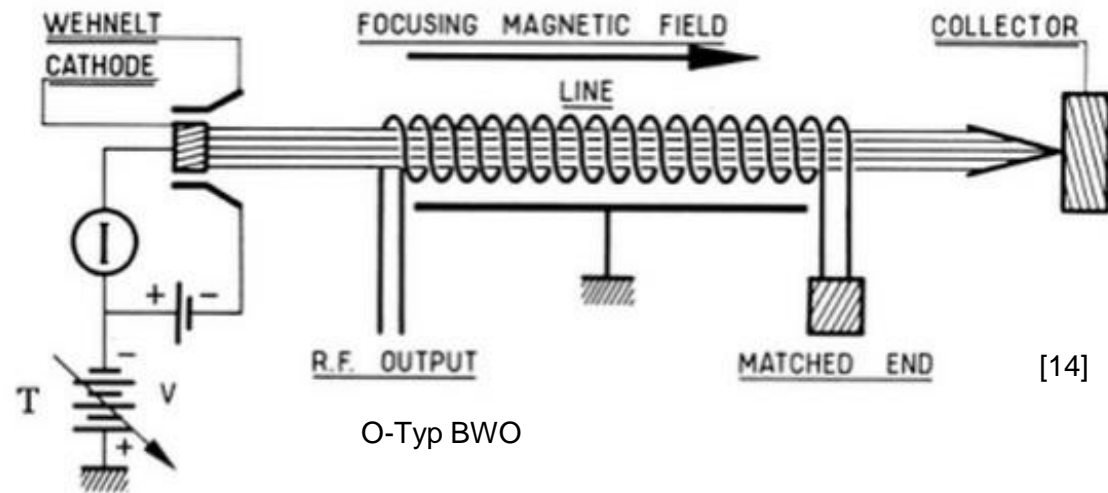


Erzeugung: Backwards-Wave-Oszillatoren

Instrumente und Erzeugung

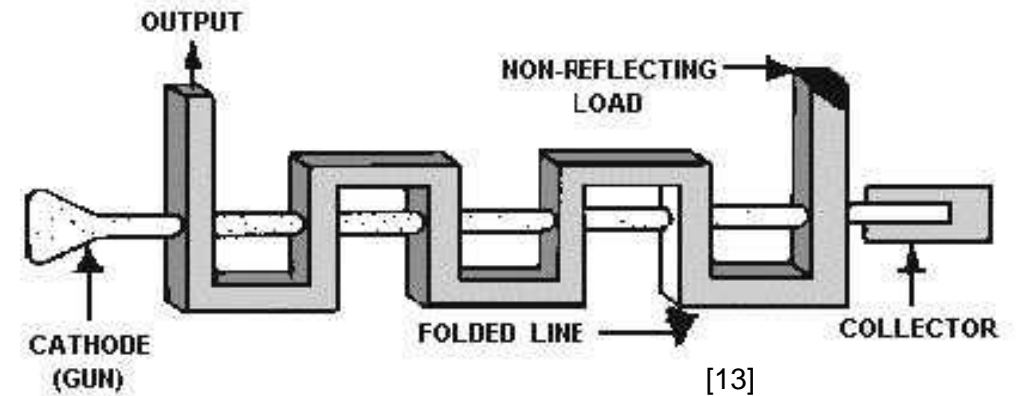


[12]



O-Typ BWO

[14]



[13]

Zuordnung: Messgrößen und deren Messverfahren

Messgrößen und Messverfahren

- Wellenlänge
 - Fabry-Perot-Interferometer
 - Beugung am Gitter
- Leitfähigkeit (besonders präzise Messung)
 - Supraleitendes Fabry-Perot-Interferometer
- Brechungsindex
 - Mach-Zehnder-Interferometer (Messung des Gangunterschieds)
- Transmissionskoeffizient
 - Transmissionsaufbau (Messung von Intensitäts-Verhältnissen)
- Reflexionskoeffizient
 - Reflexionsaufbau mit schrägem oder teildurchlässigem Spiegel (Messung von Intensitäts-Verhältnissen)
- Absorptionskoeffizient
 - Berechnung aus Reflexions- und Transmissionsmessung

Umrechnung von Messgrößen ineinander / Zusammenhänge

Messgrößen und Messverfahren

T: Reflexionskoeffizient
R: Reflexionskoeffizient
A: Absorption
n: Brechungsindex
k: Absorptionskoeffizient
I: Intensität

$$T = (1 - R)^2 e^{(-4\pi k d/\lambda)} \quad (\text{sehr dünnes Dielektrikum / Metall, ohne Mehrfachreflexion})$$

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2}$$

$$A = 1 - T - R \Leftrightarrow 1 = A + T + R \quad 1 = \sqrt{T} + \sqrt{R}$$

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad R = \frac{I_R}{I_0}$$

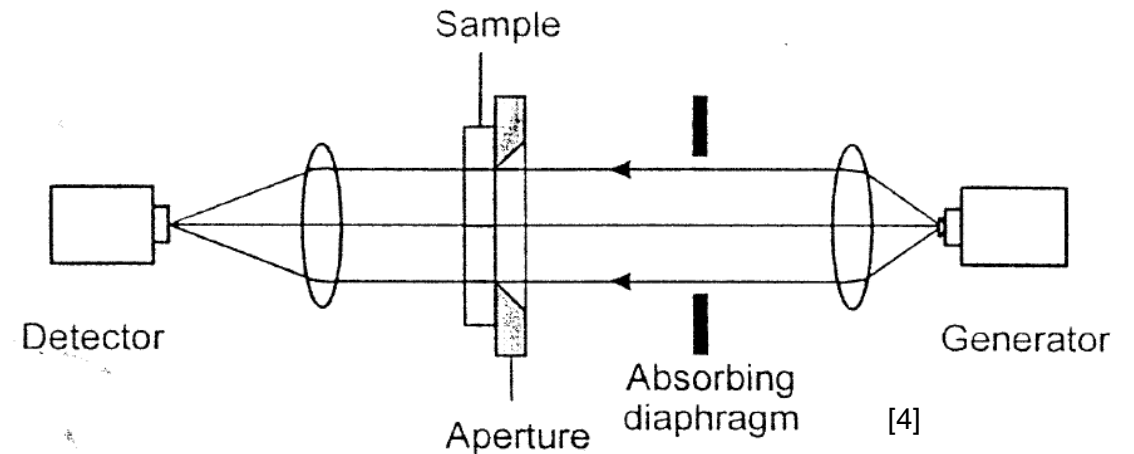
$$T = \frac{1}{\left(1 + \frac{\mu_0 d 6c}{2}\right)^2}$$

$$R = \frac{1}{\left(1 + \frac{2}{\mu_0 d 6c}\right)^2}$$

Transmissionsmessung

Experimentelle Aufbauten

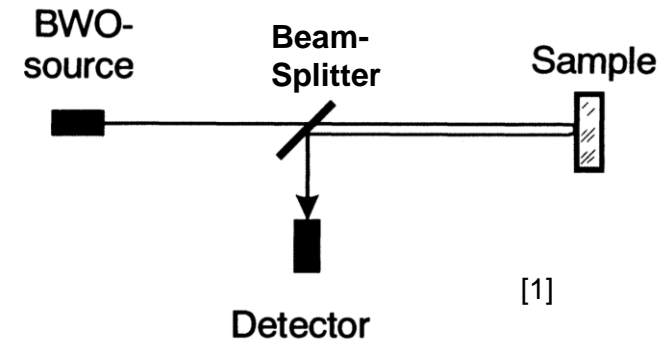
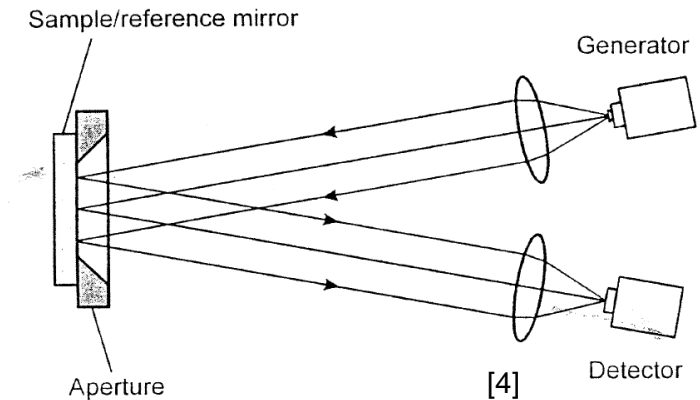
- Generator
 - BWO im Fokuspunkt einer (Teflon-)linse
 - Strahl wird über eine Blende „zugeschnitten“
- Detektor
 - Hinter dem Probenhalter
 - Ebenfalls im Fokuspunkt einer weiteren (Teflon-)linse
- Probenhalter
 - Eine Messung ohne Probe zur Referenz
 - Eine Messung mit Probe



Reflexionsmessung

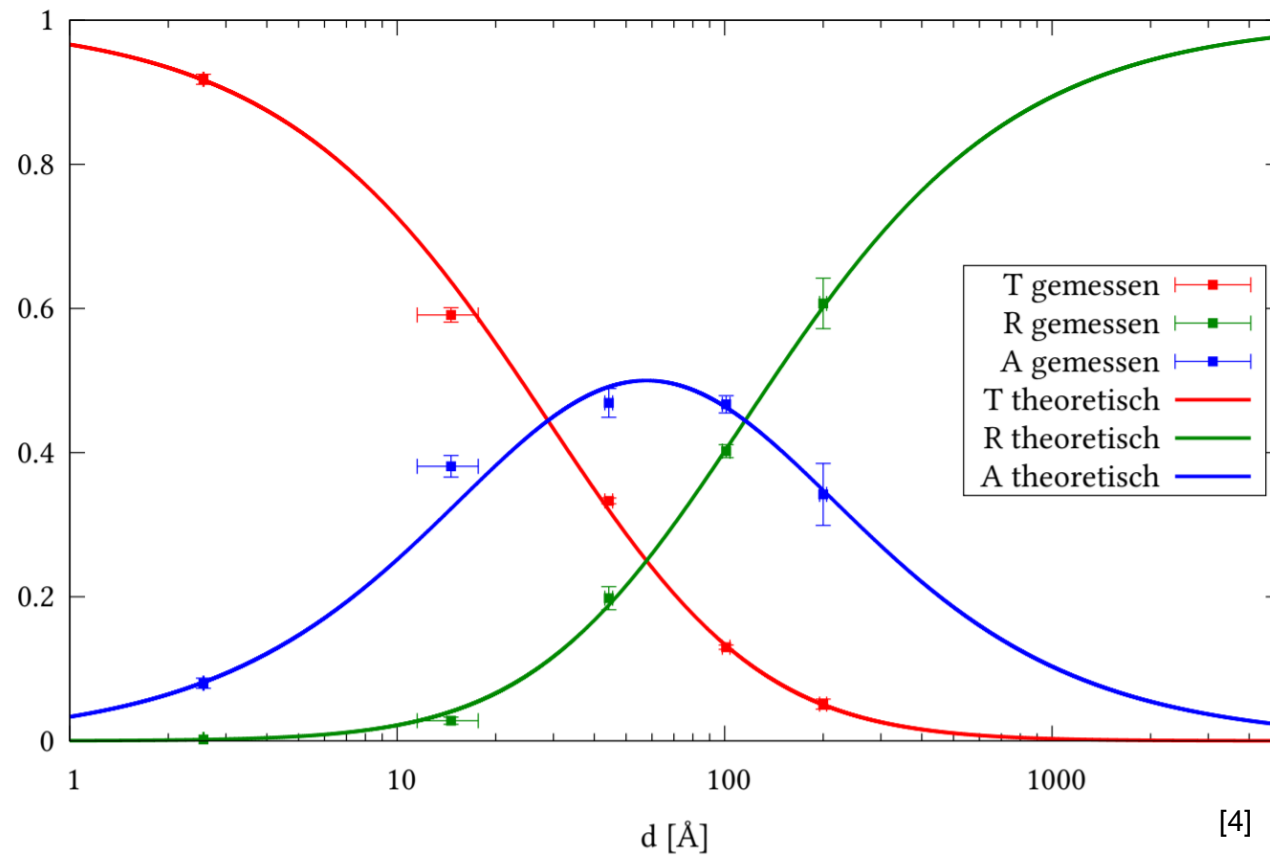
Experimentelle Aufbauten

- Zwei mögliche Aufbauten:
 - Schräger Spiegel
 - Generator und Detektor sind um gleichen Winkel gegen die Spiegelachse verdreht
 - Ansonsten analog zum Transmissionsaufbau
 - Teildurchlässiger Spiegel
 - Probe und Generator befinden sich auf der Hauptachse
 - Reflektierter Strahl wird durch teildurchlässigen Spiegel senkrecht zur Achse ausgekoppelt
 - Strahlenteiler kann z.B. durch Metallgitter realisiert werden



Vergleich: Theorie & Messung – FP 10

Messgrößen und Messverfahren

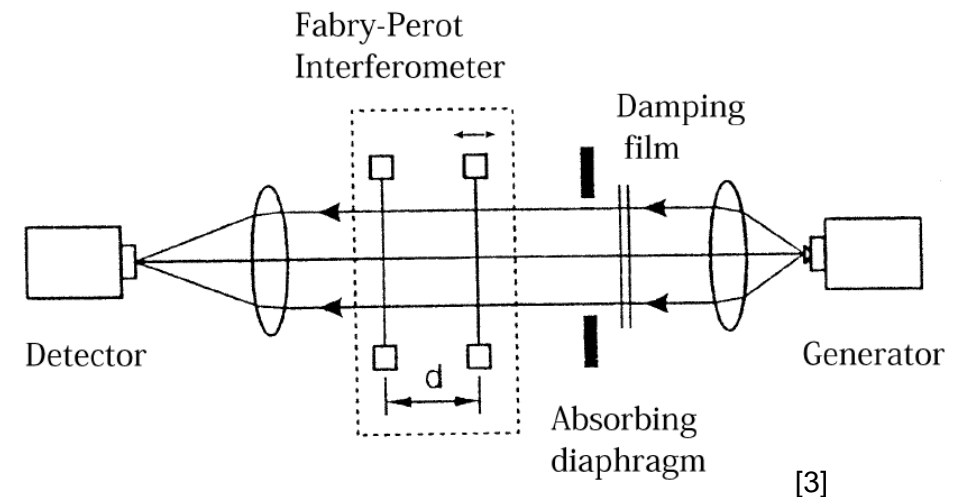
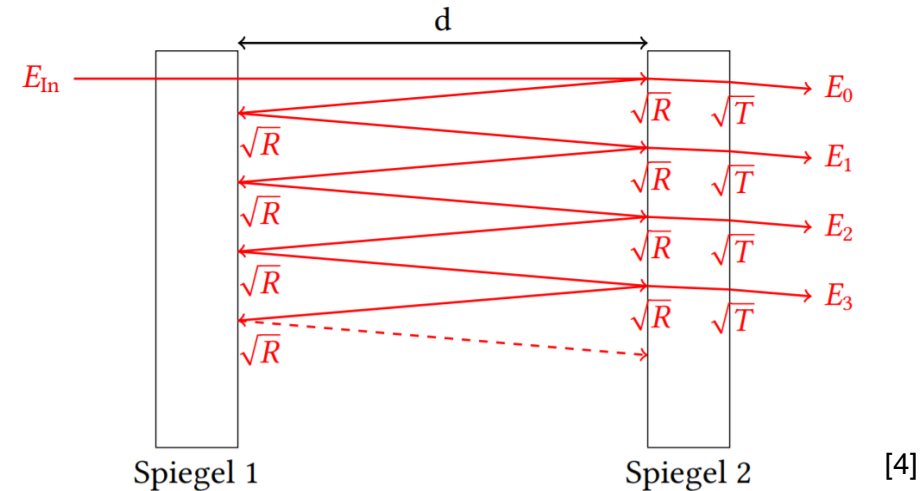


Fabry-Perot-Interferometer: Konzept

Experimentelle Aufbauten

- Transmissionsaufbau
- Zwei teildurchlässige Spiegel
 - Vielstrahlinterferenz
 - Aufbau mit sehr hoher Präzision
 - Justieren aufgrund handhabbarer Wellenlänge gut möglich

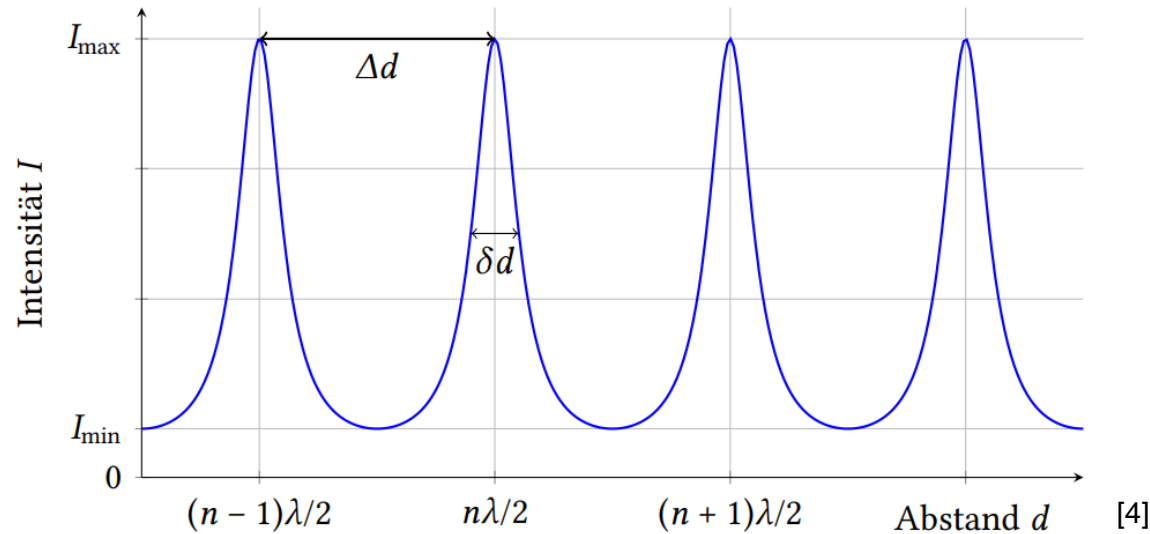
$$I_{ges} = \frac{I_0}{1 + R^2 - 2R \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)}$$



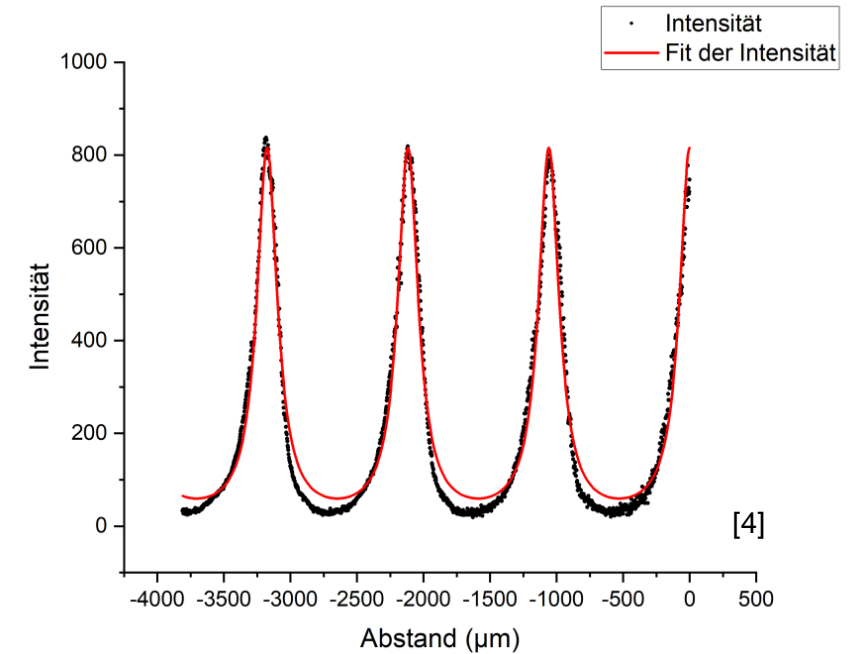
Fabry-Perot-Interferometer: Konzept

Experimentelle Aufbauten

$$I_{ges} = \frac{I_0}{1 + R^2 - 2R \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)}$$



+ Interferometrie betont Peaks um mehrere Größenordnungen

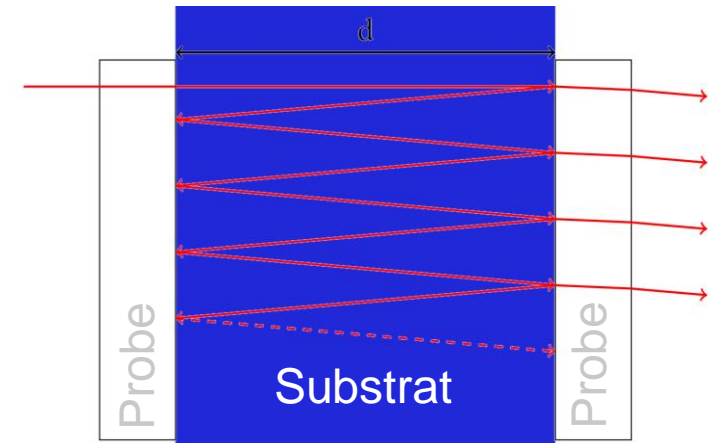


Fabry-Perot-Interferometer: Leitfähigkeit von Supraleiter-Dünnschichten

Experimentelle Aufbauten

- Vermessung von Dünnschicht-Proben
 - Herstellen eines planparallelen Saphier-Substrates
 - Messen der Eigenschaften des Substrats alleine
 - Wachsen des Dünnschichtes auf dem Substrat
 - Messen der Eigenschaften des Substrats mit Probe
 - Berechnung der Größen mit den „Fresnel-Formeln für Mehrschichtsysteme“
- Verbesserung: Supraleitendes Interferometer
 - Aufbringen des Dünnschichtes auf beiden Seiten des Substrats
 - Ein Fabry-Perot-Interferometer wird zwischen den supraleitenden Schichten gebildet
- Modifikation: Vermessung von Flüssigkeiten
 - Flüssige Probe in Referenzcontainer mit bekannten Eigenschaften

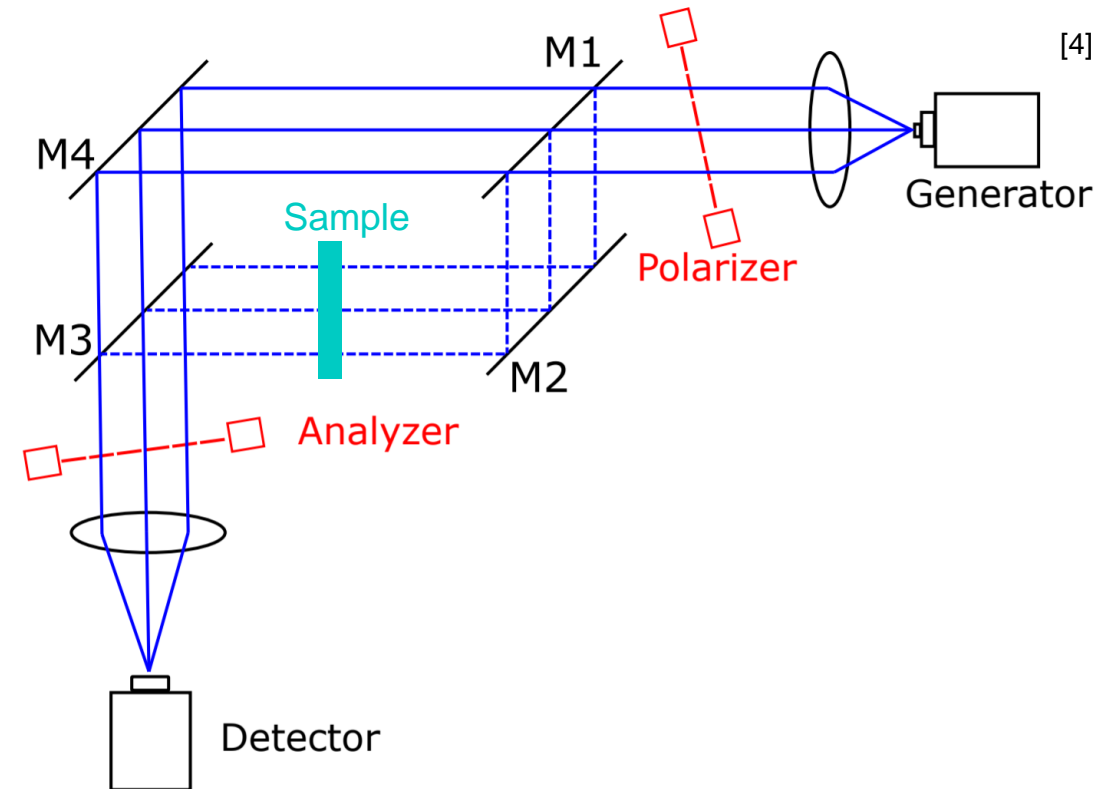
- + Vermessen von mechanisch instabilen Dünnschichten
- + Hochpräzise Vermessung durch Vielstrahl-Interferometrie
- + Ermöglicht Vermessung von Flüssigkeiten



Mach-Zehnder-Interferometer

Experimentelle Aufbauten

- Generator & Detektor
 - Stehen 90° zueinander
 - Wieder mit fokussierenden Linsen ausgestattet
- Polarisation
 - Millimeterwellen im Aufbau sind stets linear polarisiert
- Spiegel
 - M1 & M3: halbdurchlässig (weitere Polarisatoren in 45° Stellung)
 - M2: Fest, voll reflektierend
 - M4: Verstellbar (Mikrometerschraube), voll reflektierend



Mach-Zehnder-Interferometer

Experimentelle Aufbauten

- Genereller Verlauf der Intensität

$$I = 4E_1^2 \cos\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda}\right)$$

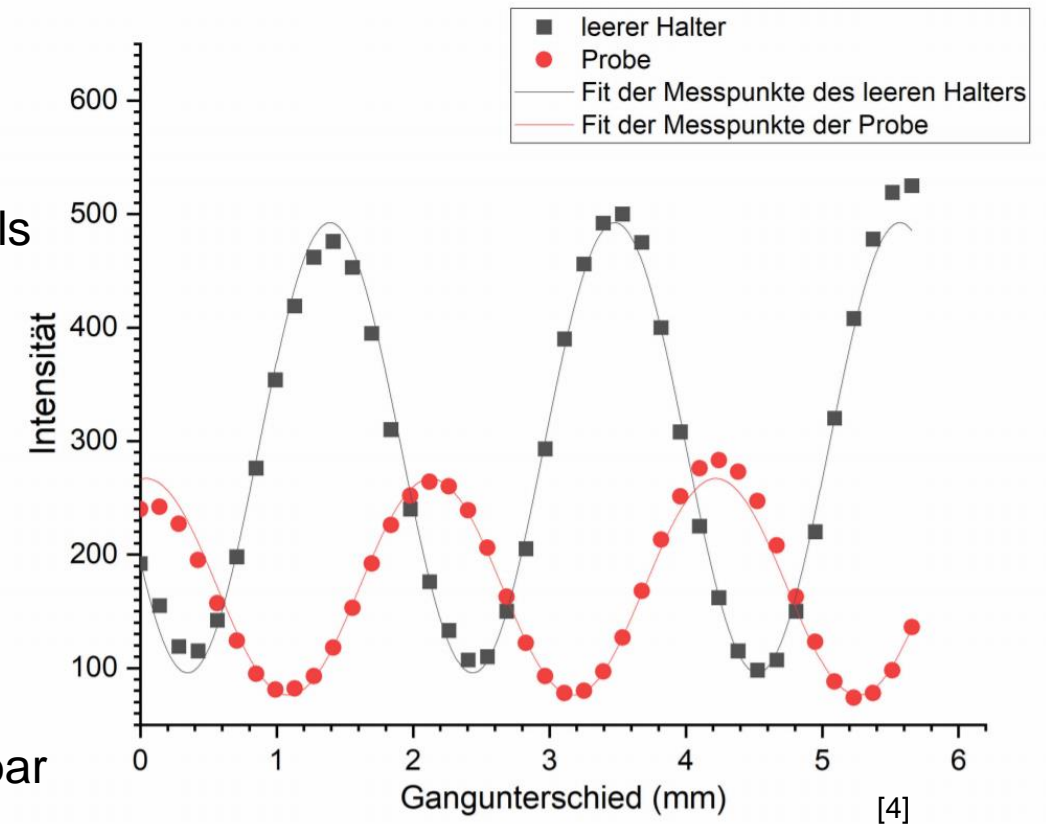
- Veränderte Phasenverschiebung durch Versatz des Spiegels

$$\Delta = \sqrt{2} \cdot l \quad (\text{Verschiebung auf der Diagonalen})$$

- Zusätzliche Phasenverschiebung durch Probe (Dicke d)

$$n_{\text{Probe}} = 1 + \frac{\Delta'}{d}$$

- Nur auf ganzzahliges Vielfaches der Peak-Abstände messbar
 - Mehrere Messungen bei verschiedenen Dicken d

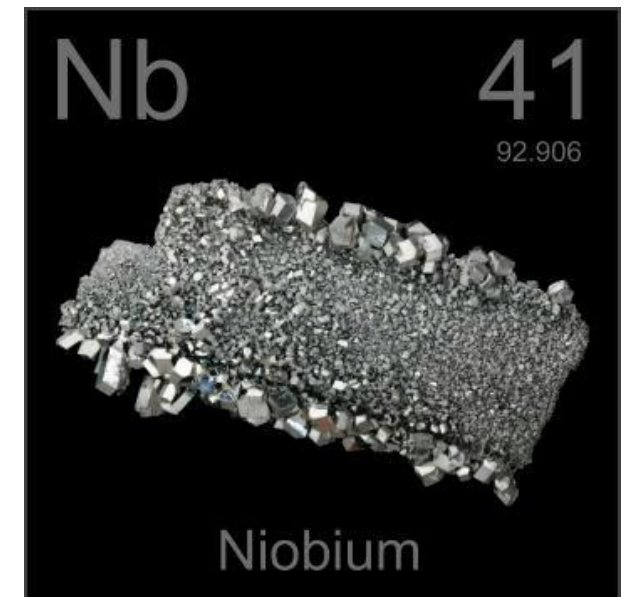


Experiment: Supraleiter Niobium

Experimente aus der (aktuellen) Forschung

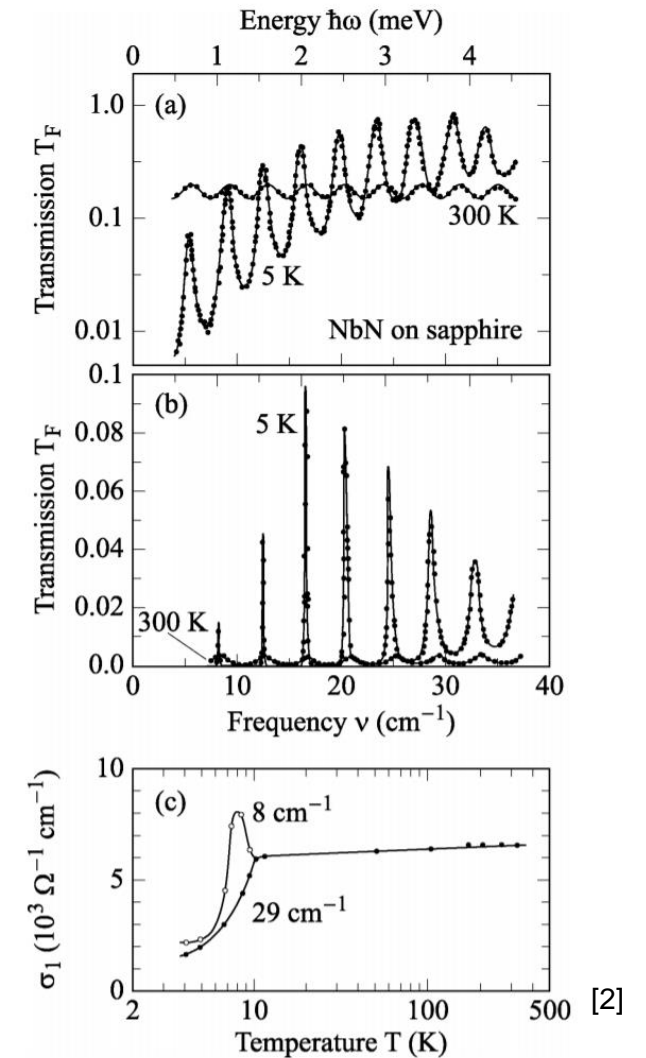
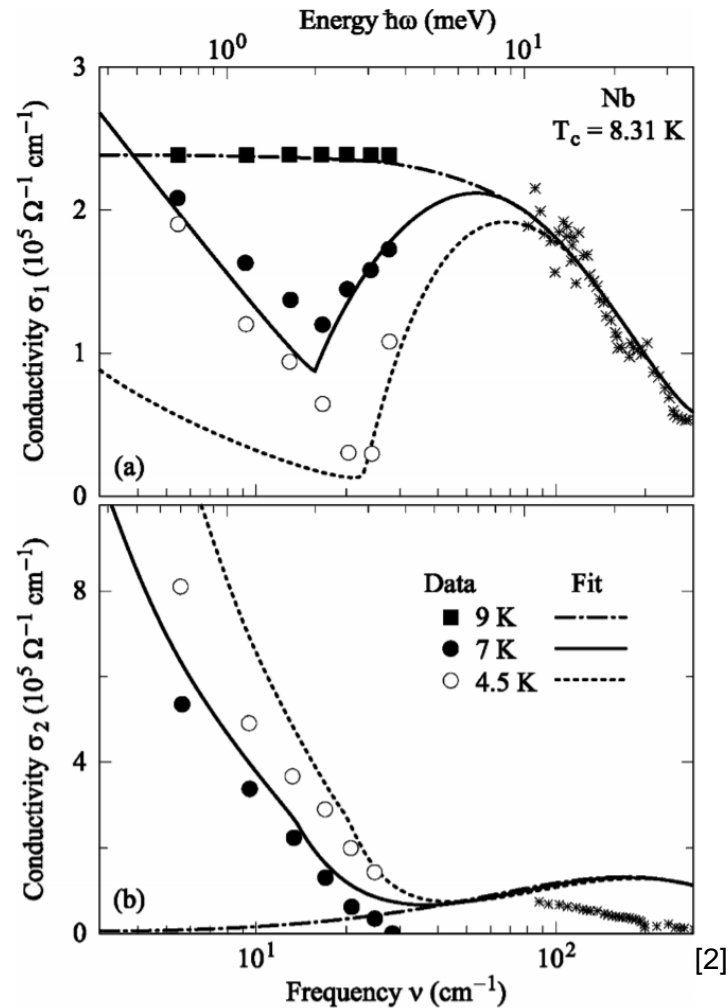
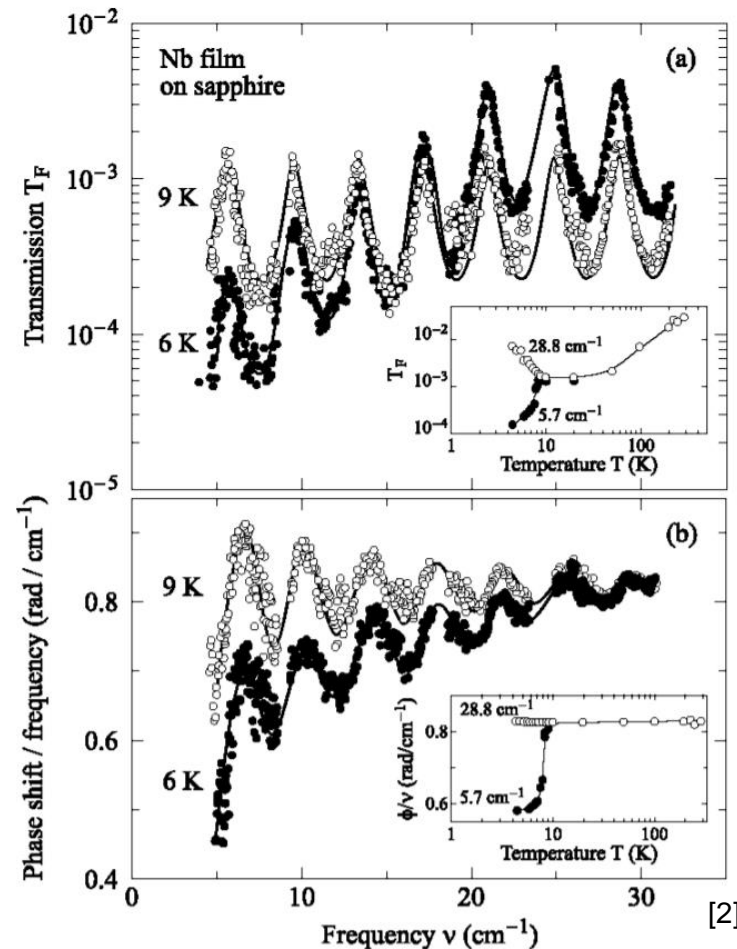
- Superconducting Gap
 - Bereich um die Fermikante
 - Essentiell in der BCS-Theorie
 - Beschreibt Energiegewinn der Elektronen bei Bindung zu Cooper-Paar
 - Größe:
 - Größenordnung: 0,4meV bis 40meV (0,1THz bis 10THz)
 - Nichtexistent im Temperaturbereich über der kritischen Temperatur
 - Wächst beim kühlen unter die kritische Temperatur
 - Erreicht in der Theorie $\Delta(T = 0) = 1,764 k_B T_c$
- Sehr wichtiger Supraleiter zu Beginn: Niobium
 - Hochwertige Dünnschichten
 - Vergleichsweise hohe kritische Temperatur ($T_c = 8,3\text{K}$)

+ Energie der Strahlung ideal für die Erforschung von Supraleitern



Experiment: Supraleiter Niobium

Experimente aus der (aktuellen) Forschung



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Jonas Kell

Universität Augsburg

jonas.kell@uni-augsburg.de

www.uni-augsburg.de

Quellen:

Textquellen & Referenzen

- (1) <https://link.springer.com/article/10.1007/s10762-005-7600-y> (Terahertz BWO-Spectroscopy) (Review Paper mit guter Übersicht über THS)
- (2) THz Spectroscopy of Superconductors (IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 14, NO. 2, MARCH/APRIL 2008) (Artikel mit Zusammenfassung von mehreren wichtigen Experimenten)
- (3) <https://de.wikipedia.org/wiki/Terahertz-Spektroskopie> (Übersicht Terahertz-Spektroskopie)
- (4) Versuchsanleitung FP10 Quasioptische Spektroskopie (Lehrstuhl für Experimentalphysik V, 2015) (Gute Übersicht, viele Beispiele)
- (5) Protokoll: FP 10 Quasioptische Spektroskopie (Jan Geiger & Jonas Kell 2021) (Messdaten und Rechnungen)
- (6) <https://www.springer.com/de/book/9783642014789> (Solid-State Spectroscopy, 2009) (Polarisatoren, Fabry-Perot, Signal-to-Noise)
- (7) <https://www.youtube.com/watch?v=DNSXJPTkEbY> (BWO)
- (8) https://en.wikipedia.org/wiki/Backward-wave_oscillator (BWO)
- (9) <https://electriciantraining.tpub.com/14183/css/The-Traveling-Wave-Tube-100.htm> (& fortfolgende Seiten: BWO)
- (10) <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/009499829/publication/DE966271C?q=pn%3DFR1035379> (Patent BWO)
- (11) https://www.batop.de/information/PCA_infos.html (GaAs-Antenne)
- (12) <https://www.batop.de/products/terahertz/photoconductive-antenna/photoconductive-terahertz-antenna.html> (GaAs-Antenne)
- (13) https://de.wikipedia.org/wiki/Fresnelsche_Formeln (Fresnelsche-Formeln)
- (14) https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_gap (Superconducting Gap)

Quellen:

Bildquellen

- (1) <https://link.springer.com/article/10.1007/s10762-005-7600-y> (Terahertz BWO-Spectroscopy)
- (2) THz Spectroscopy of Superconductors (IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 14, NO. 2, MARCH/APRIL 2008)
- (3) Versuchsanleitung FP10 Quasioptische Spektroskopie (Lehrstuhl für Experimentalphysik V, 2015)
- (4) Protokoll: FP 10 Quasioptische Spektroskopie (Jan Geiger & Jonas Kell 2021)
- (5) https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:EM-Wave_noGIF.svg
- (6) https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Electromagnetic_spectrum_-de_c.svg
- (7) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/76/Diagram_of_basic_principle_of_backward-wave_oscillator.svg/1280px-Diagram_of_basic_principle_of_backward-wave_oscillator.svg.png
- (8) https://www.hm-stahlshop.de/images/staalbutikken/runde%20st%C3%A5lplader/rustfri_st%C3%A5l_rund2.jpg
- (9) <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/gk3a-2003/img445.gif>
- (10) https://www.batop.de/products/terahertz/photoconductive-antenna/pictures/PCA_Chips_5_400x141.jpg
- (11) <https://www.batop.de/information/pictures/PCA.png>
- (12) https://electriciantraining.tpub.com/14183/img/14183_101_1.jpg
- (13) https://electriciantraining.tpub.com/14183/img/14183_103_1.jpg
- (14) <https://image.slidesharecdn.com/bwo-151009040623-lva1-app6891/95/backward-wave-oscillator-11-638.jpg?cb=1444363650>
- (15) https://en.wikipedia.org/wiki/Backward-wave_oscillator#/media/File:M-bwo.svg
- (16) <https://periodictable.com/Samples/041.13/s9s.JPG>