



Wellenfunktion und Interferometer (LF)

Konzeptionsgruppe Physik 2023

C.-J. Pardall, J. Küblbeck [CC BY 4.0](#)

Überblick

- Wellenfunktion
- Von der Zwei-Quellen-Interferenz zum Interferometer
- Michelson-Interferometer: Experimente
 - Interferometer mit Ultraschall
 - Mikrowellen-Interferometer
 - optische Interferometer
- Interferenzmuster
- Bildungsplan, Jahresplanung und weitere Materialien
 - Bildungsplan, Jahresplanung, KMK-Vorgaben
 - Strahlteiler
 - Beispiele für Aufgaben auf Abiturniveau
 - Überblick über das Material

Wellenfunktion

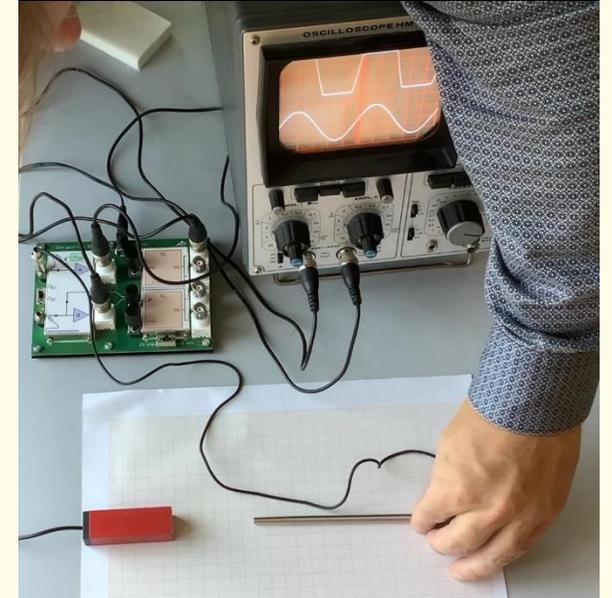
- Math. Beschreibung von linearen harmonischen Wellen

- $c = \lambda \cdot f$ und $\frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{\Delta \varphi}{2\pi}$

- Wellenfunktion $s(x, t) = \hat{s} \cdot \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$

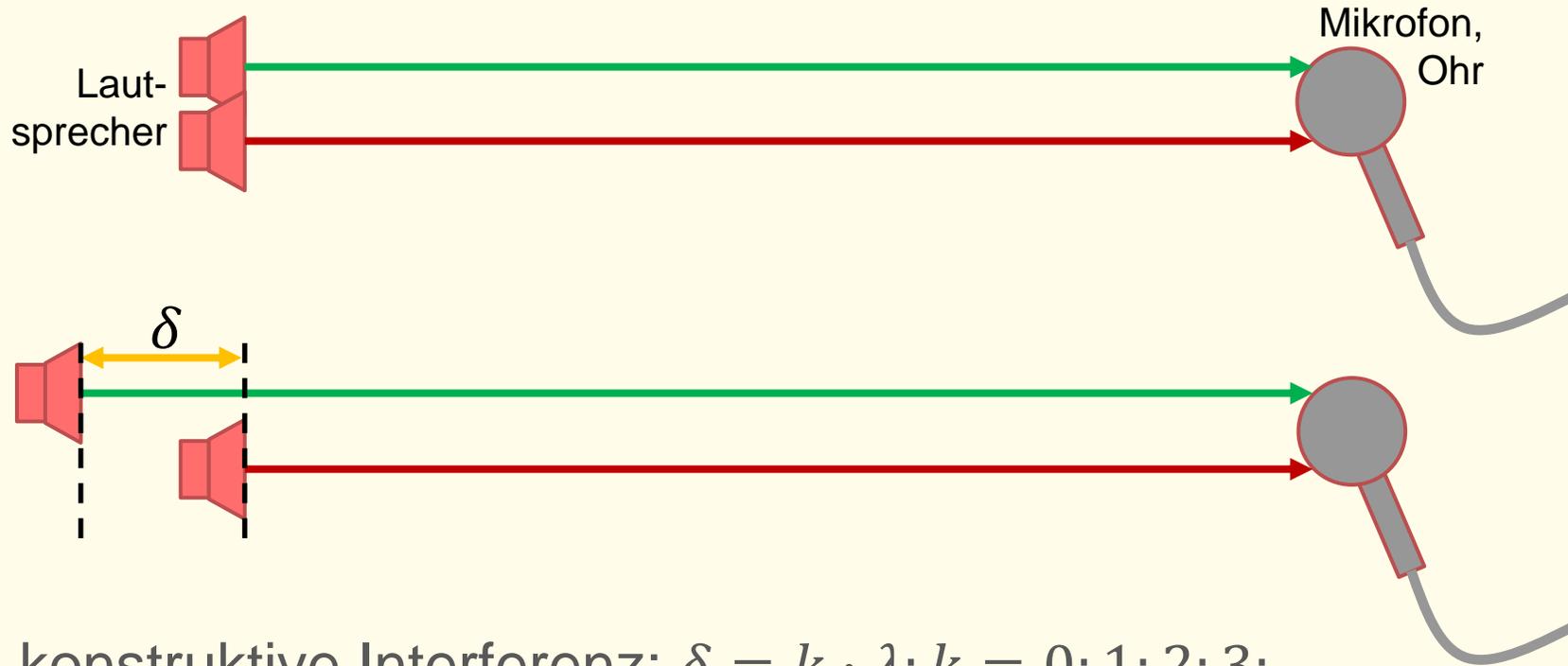
neu!
möglicher
Abiturinhalte

- s - t - und s - x -Diagramme
 - (Zeigermodell → kein verpflichtender Inhalt)
 - **kein Inhalt: Wellengleichung (Dgl.)**
- Experimente und Materialien
 - Stummes Video: Ausbreitungs- als Phasengeschwindigkeit
 - AB: Herleitung der Gleichung der Wellenfunktion
 - Geogebra-Aktivitäten
 - <https://www.geogebra.org/m/AUyDjAAx> (schulphysikwiki) Wellenfunktion
 - <https://www.geogebra.org/m/eXBTxdR9> (schulphysikwiki) Zeiger
 - <https://www.geogebra.org/m/kycxn5wf> (Christoph Zenger) Wellenfunktion
 - <https://www.geogebra.org/m/unpybq9q> (Christoph Zenger) s - t -, s - x -Diagramm mit $s(x, t)$
 - <https://www.geogebra.org/m/k5fhsbx9> (Markus Ziegler) s - t -, s - x -Diagramm mit Zeiger

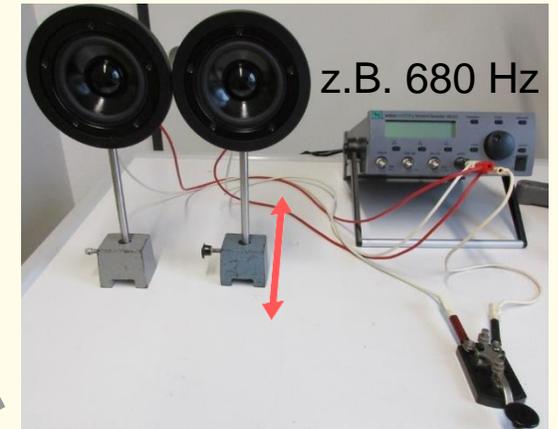


Von der Zwei-Quellen-Interferenz zum Interferometer

- Experiment zur Zwei-Quellen-Interferenz



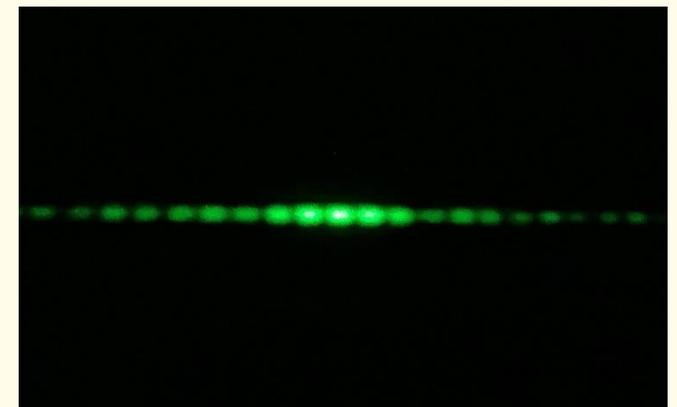
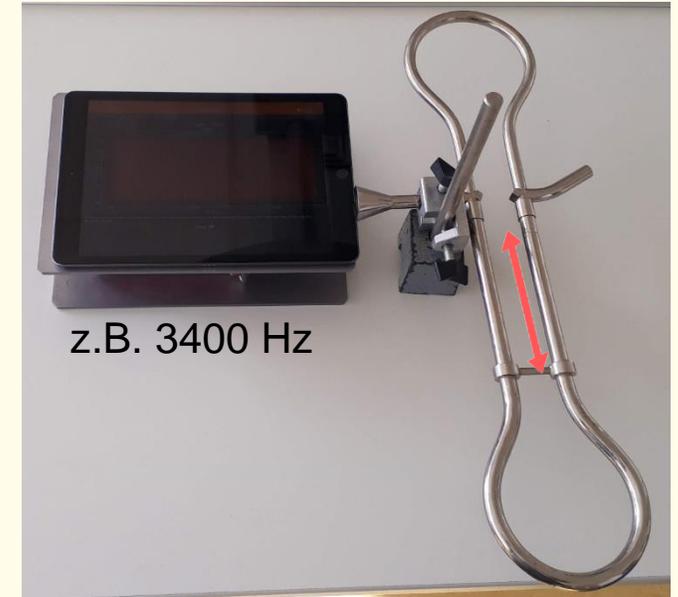
- konstruktive Interferenz: $\delta = k \cdot \lambda; k = 0; 1; 2; 3; \dots$
destruktive Interferenz: $\delta = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}; k = 1; 2; 3; \dots$



Von der Zwei-Quellen-Interferenz zum Interferometer

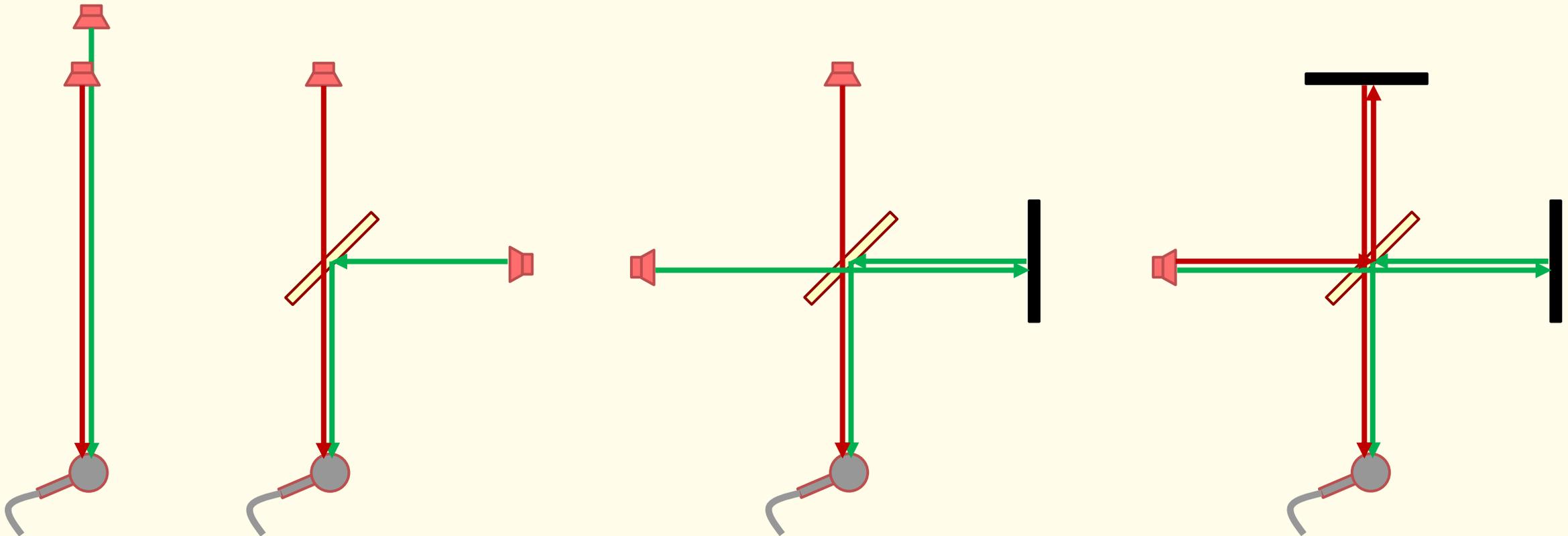
Geht das auch mit nur einer Quelle?

- akustisch: Quincke-Interferenzrohr
 - etwa 2,5-5 kHz (Ultraschall auch möglich)
 $\lambda \approx 10 \text{ cm} \rightarrow$ einfache Handhabung
 - deutliche Repräsentanz des Gangunterschieds
 - [IQB-Beispielaufgabe](#):
Verringerung von Fluglärm durch Interferenz
- optisch
 - zwingend notwendig (Kohärenz)
 - zweidimensional: Doppelspalt, Fresnel-Spiegel, ...
 - „virtuell“ eindimensional: Interferometer!



Von der Zwei-Quellen-Interferenz zum Interferometer

Modell: Akustisches Michelson-Interferometer

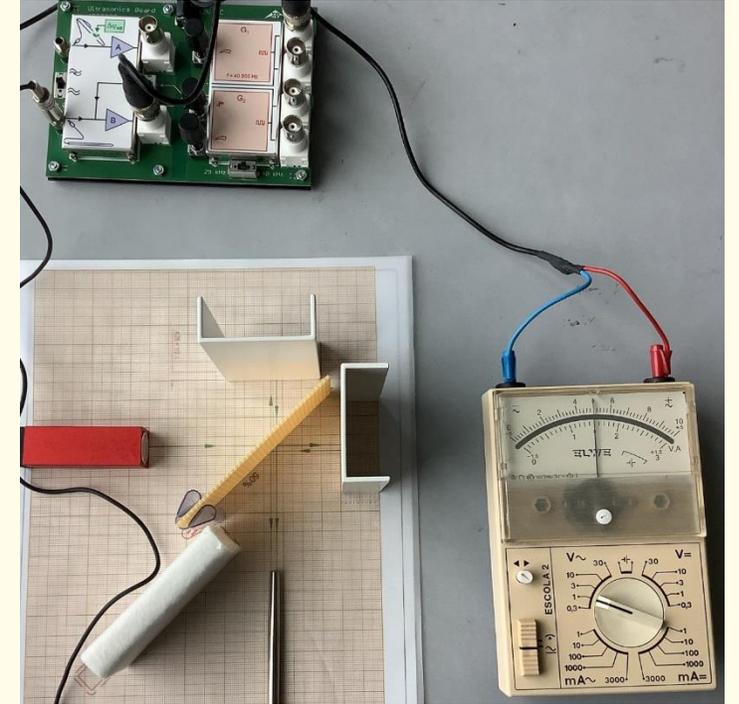


(Die Interferenz in Richtung der Quelle wird hier nicht betrachtet.)

Michelson-Interferometer: Experimente

Aufbau mit Ultraschall

- fachprakt. Abitur in Niedersachsen, 3BScientific
 - einfacher, durchschaubarer, kompakter Aufbau
 - 40 kHz, $\rightarrow \lambda = 8,5 \text{ mm}$,
d.h. Maximum-Minimum beim Verschieben: $\frac{\lambda}{4} \approx 2,1 \text{ mm!}$
 - hier nur mit vorgegebener Vorlage möglich!
- andere Hersteller
 - meist keinen Interferometer-Aufbau mit Ultraschall
 - Mekruphy: Schienensystem



Michelson-Interferometer: Experimente

Aufbau mit Mikrowellen

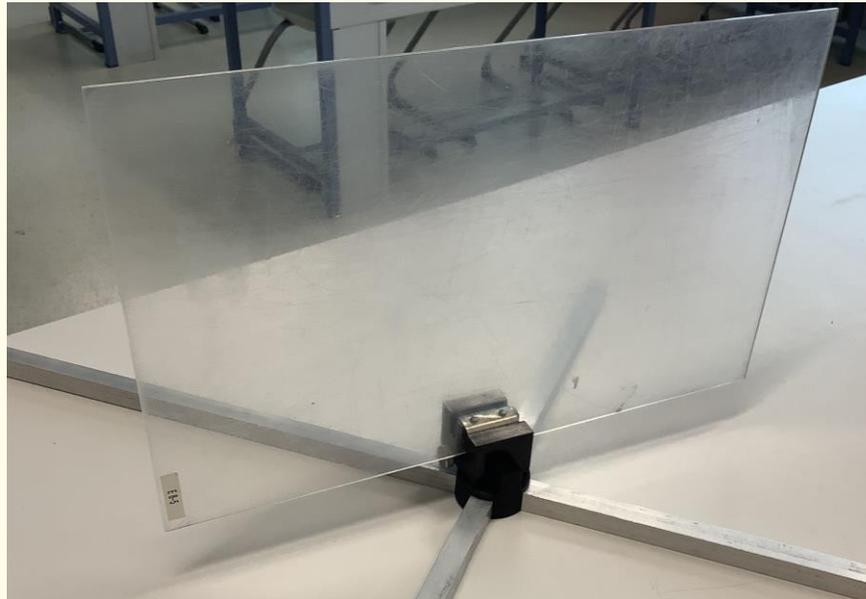
- einfacher, durchschaubarer Aufbau
Strahlteiler: Plexiglas
- $\lambda \approx 3 \text{ cm}$ \rightarrow einfache Handhabung



Michelson-Interferometer: Experimente

Aufbau mit Mikrowellen

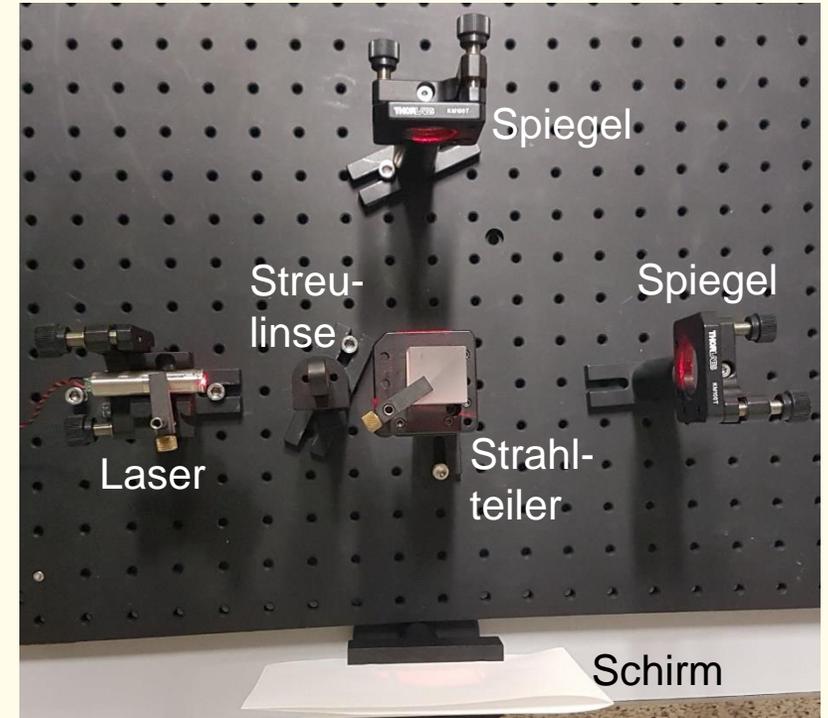
- Erweiterung üblicher Aufbauten mit 3-D-Druck
z.B.: <https://www.thingiverse.com/thing:5686143>
- Variation: Mach-Zehnder-Interferometer



Michelson-Interferometer: Experimente

Aufbau mit Licht

- für Schülerinnen und Schüler sehr beeindruckend
- $\lambda < 1 \mu\text{m}$ \rightarrow empfindlich, Justage notwendig
- Ausführungen verschiedener Hersteller von ca. 1000 € (ohne Laser) bis 5000 € (Aufbau rechts: Thorlabs, ca. 1300 €)



Michelson-Interferometer: Experimente

Aufbau mit Licht

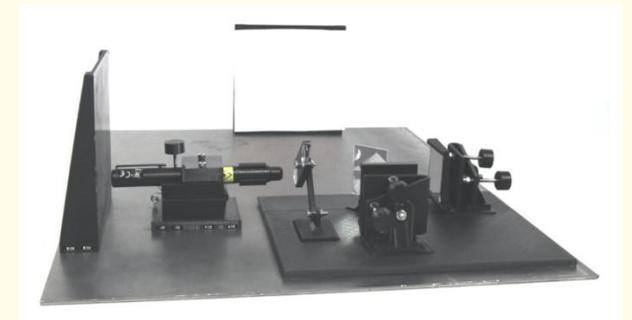
- Alternative: 3-D-Druck-Interferometer
 - CERN S'cool LAB
<https://scoollab.web.cern.ch/laserlab3D>
 - Open³ Quantum (u.a. Uni Münster)
<https://o3q.de/>
 - Physik kommunizieren (Uni Münster)
<https://physikkommunizieren.de/3d-druck/interferometer-aus-dem-3d-drucker/>
- wesentlich günstiger, aber mit viel Arbeit verbunden



CERN S'cool LAB



Open³ Quantum



Physik kommunizieren

Bildquellen:

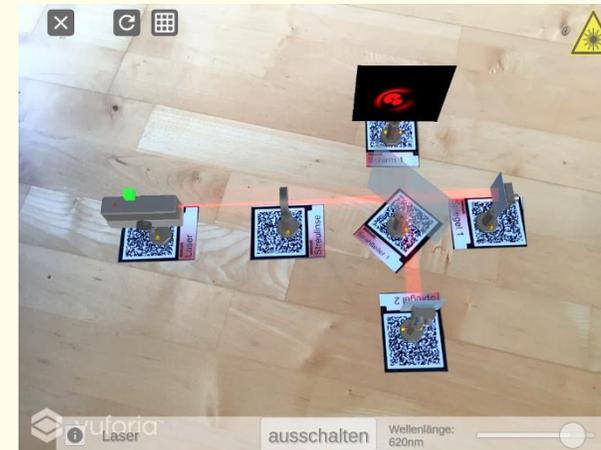
Aufbau CERN S'cool LAB: © CERN <https://scoollab.web.cern.ch/laserlab3D> (18.12.22) Aufbau Open³ Quantum: Nils Haverkamp et al 2022 *Phys. Educ.* **57** 025019 doi: [10.1088/1361-6552/ac4106](https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac4106), [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (18.12.22);

Aufbau Physik kommunizieren: P. Schürmann, https://physikkommunizieren.de/wp-content/uploads/2019/12/Interferometer_1.png, [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) (18.12.22)

Michelson-Interferometer: Experimente

Aufbau mit Licht

- Alternative: Augmented Reality eXperiments (Uni Mainz)
 - <https://www.larissa.physik.uni-mainz.de/arx/> (18.12.22)
 - Platzhalterkarten für Laser, Spiegel usw.
 - Darstellung der Platzhalter über die App AR.X (iOS, Android) als bedienbare Geräte
 - Fixierung des Tablets o.ä. sinnvoll!



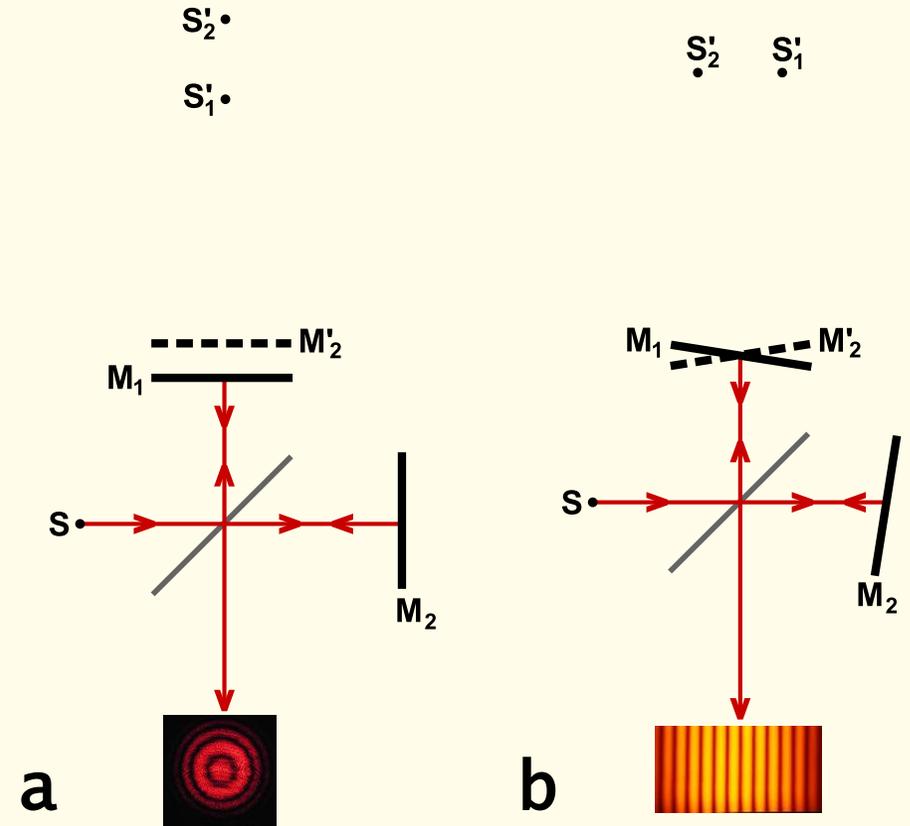
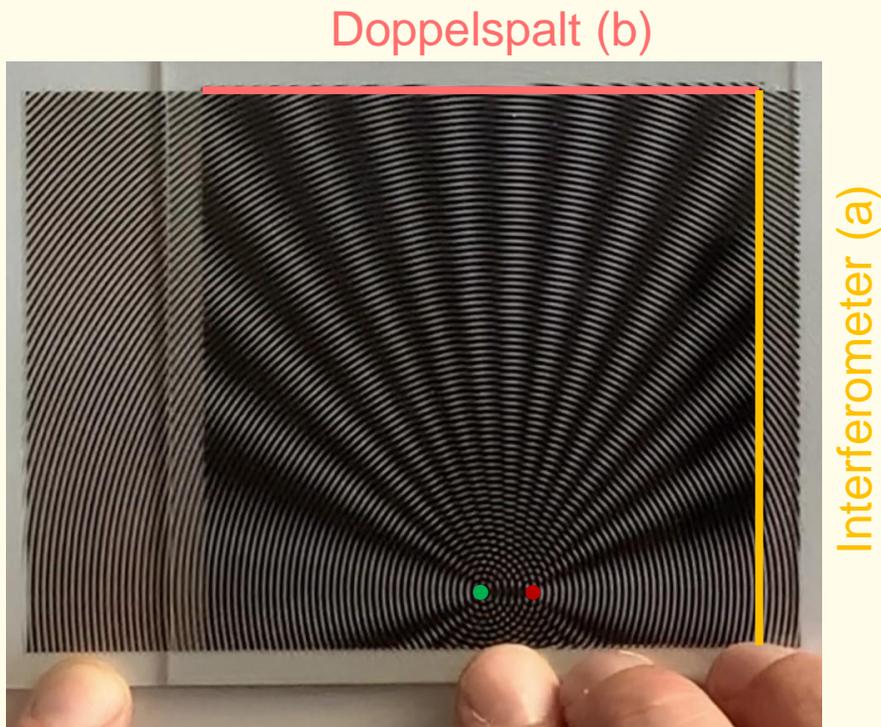
Interferenzmuster: Beobachtungen



Stellen Sie eine Vermutung darüber auf, wie der Film zustande gekommen ist.

Interferenzmuster: Erklärung

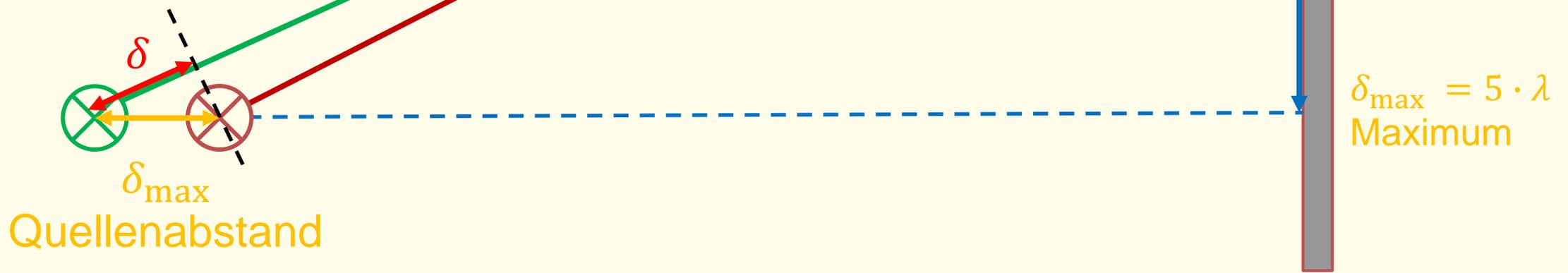
- Ring- oder streifenförmiges Interferenzmuster durch Spiegelstellung



Bildquellen: links: C.-J. Pardall; rechts: Tttrung (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson_interferometer_fringe_formation_multilingual.svg), <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode> (18.12.22)

Interferenzmuster: Erklärung

Je größer der **Radius** auf dem Schirm, desto kleiner ist Quellenabstand δ_{\max} der Gangunterschied δ .

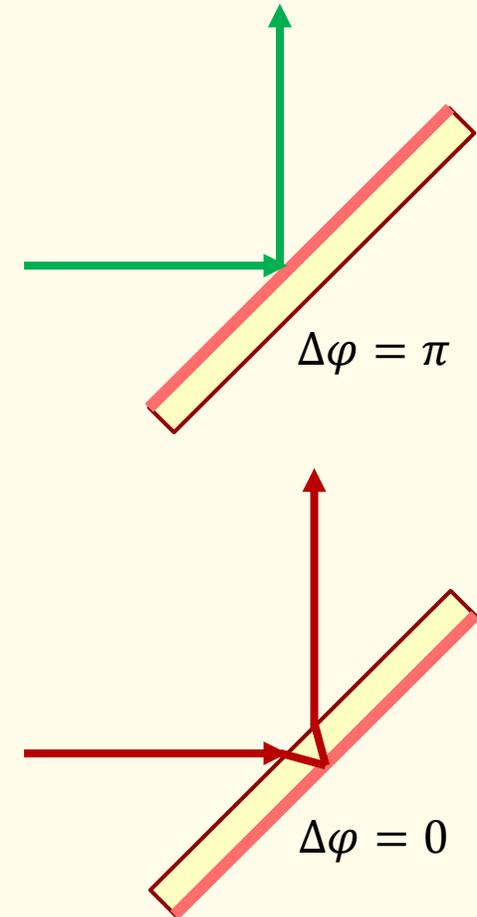


Bildungsplan, Jahresplanung, KMK-Vorgaben

- BP 2016.V2, 3.6.5 Wellenoptik
(4) Interferenzphänomene am Michelson-Interferometer beschreiben (Strahlteiler)
- Jahresplanung für das LF
 - Interferometer:
Aufbau und Funktionsweise eines Michelson-Interferometers (Strahlteiler),
Interferenzmuster, Verschiebungsstrecke und Gangunterschied
 - Interferenzfähigkeit, Sichtbarkeit des Interferenzmusters, Kohärenzlänge
- Eckpunktepapier der KMK
Aufbau und Funktionsweise eines Interferometers
- **Abituraufgaben mit anderen Interferometer-Typen möglich!**
- **sinnvoll: Mach-Zehnder-Interferometer (Quantenphysik)**

Hintergrund: Strahlteiler

- Bei Strahlteilern kommt es zu Phasensprüngen.
 - Einfaches Modell: eine teilverspiegelte Oberfläche
 - Reflexion direkt an der Oberfläche: $\Delta\varphi = \pi$
(Reflexion am festen Ende)
 - Reflexion mit Glasdurchgang: $\Delta\varphi = 0$
(Reflexion am losen Ende)
 - i.d.R. komplizierter!
- für das Prinzip des Michelson-Interferometers nicht notwendig
- z.B. beim Mach-Zehnder-Interferometer schon eher
- KMK: Inhaltliche Vereinbarungen zur Gestaltung der Aufgaben
Es wird nicht vorausgesetzt, dass die Prüflinge Kenntnisse zu Phasensprüngen beim Interferometer haben.

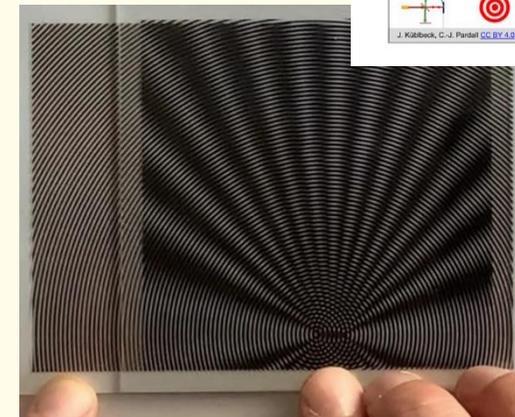
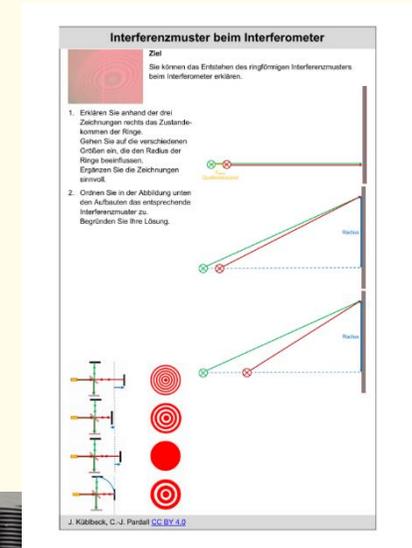


Beispiele für Aufgaben auf Abiturniveau

- [IQB-Beispielaufgabe:](#)
Wellenlängenmessung mit einem Michelson-Interferometer (Licht, Ultraschall)
- [Abituraufgaben Niedersachsen:](#)
Abitur 2017 I: Interferenz von He-Atomen
Abitur 2021 I: Elektronenbeugungsröhre
- [Abituraufgaben Bayern:](#)
Abitur 2022: Michelson-Interferometer (Licht, LIGO)

Überblick über das Material: Wellen

- Hintergrund: diese Präsentation
- Material zur Schüleraktivierung
- stumme Videos
 - Ausbreitungs- und Phasengeschwindigkeit mit Ultraschall
 - Michelson-Interferometer mit Mikrowellen
 - Modell zur Entstehung des Interferenzmusters



Überblick über das Material: Wellen

- 3210_loesungshinweise_ab_herleitung_wellenfunktion
- 3211_ab_herleitung_wellenfunktion: Arbeitsblatt zur Wellenfunktion
- 3212_c_f_lambda.mp4: Stummes Video –Ausbreitungs- und Phasengeschwindigkeit mit Ultraschall

- 3220_loesungshinweise_interferometer
- 3221_michelson_mikrowelle.mp4: Stummes Video – Michelson-Interferometer mit Mikrowellen
- 3222_michelson_licht.mp4: Stummes Video – Interferenzringe beim Michelson-Interferometer
- 3223_up_interferometer_ringe: Unterrichtspräsentation zur Entstehung der Interferenzringe
- 3224_ab_interferometer_ringe: passendes Arbeitsblatt zu 3223
- 3225_interferenzmuster_modell.mp4: Stummes Video – Modell zur Entstehung des Interferenzmusters