

Holographie

Im Rahmen des Fortgeschrittenen-Praktikum II

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



UNI
FREIBURG

Tim Butcher und Florian Tönnies

Physikalisches Institut der Universität Freiburg
Abschlusspräsentation 5. April 2016

Physikalische Grundlagen

Experiment 1: Michelson Interferometer

Experiment 2: Balken-Biegung

Experiment 3: Eigenschwingungen einer Aluminiumplatte

Experiment 4: Kreuzkorrelation

Physikalische Grundlagen

Experiment 1: Michelson Interferometer

Experiment 2: Balken-Biegung

Experiment 3: Eigenschwingungen einer Aluminiumplatte

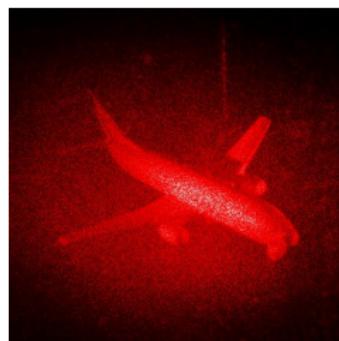
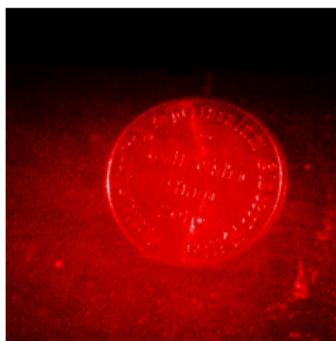
Experiment 4: Kreuzkorrelation

Was ist ein Hologramm?



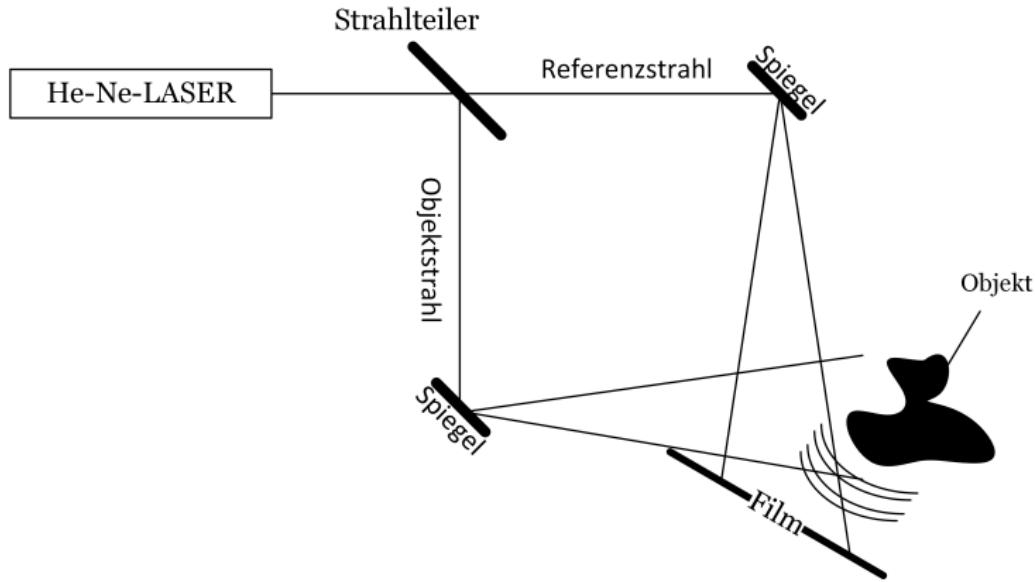
Definition

Dreidimensionale Aufnahme eines Objektes;
Rekonstruktion eines dreidimensionalen Bildes aus dem
Interferenzmuster kohärenter Lichtstrahlen



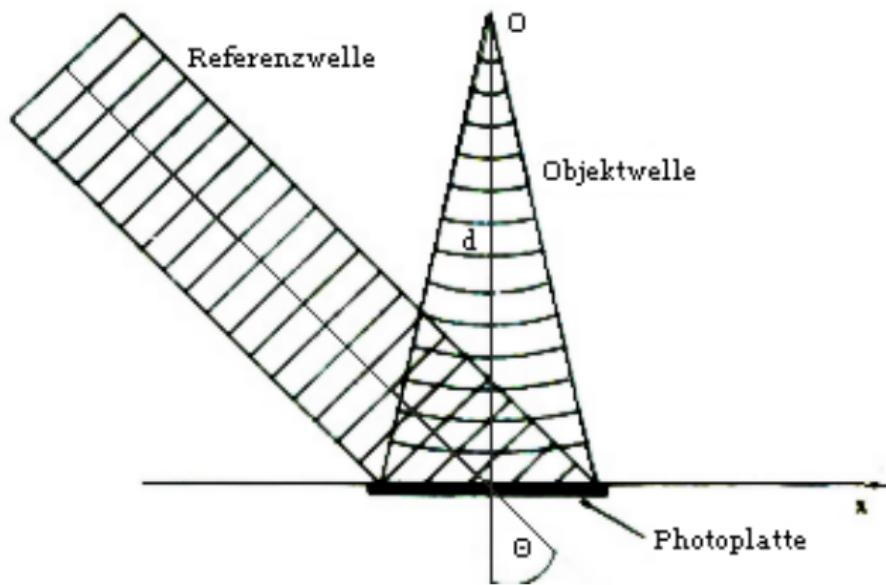
<http://psi.physik.kit.edu/img/transflugzeugsuper.jpg>
<http://psi.physik.kit.edu/img/trans10gulden.jpg>

Grundprinzip der Holographie



Grundaufbau eines Holographie Experiments

Hologramm eines Objektpunktes (1/3)



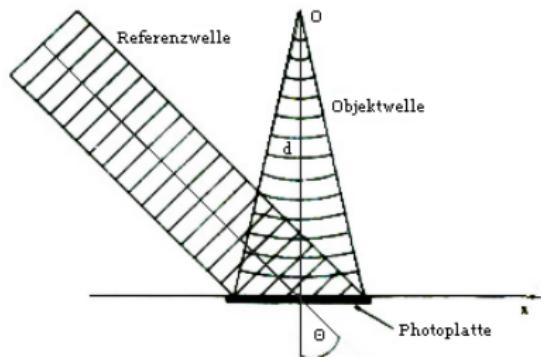
Hologramm eines Objektpunktes (2/3)

Objektwelle (Kugelwelle):

$$\vec{A}_1(\vec{r}) = \vec{E}_1(\vec{r})e^{ikr}$$

Referenzwelle (Ebene Welle):

$$\vec{A}_2(\vec{r}) = \vec{E}_2 e^{ikx \sin \theta}$$



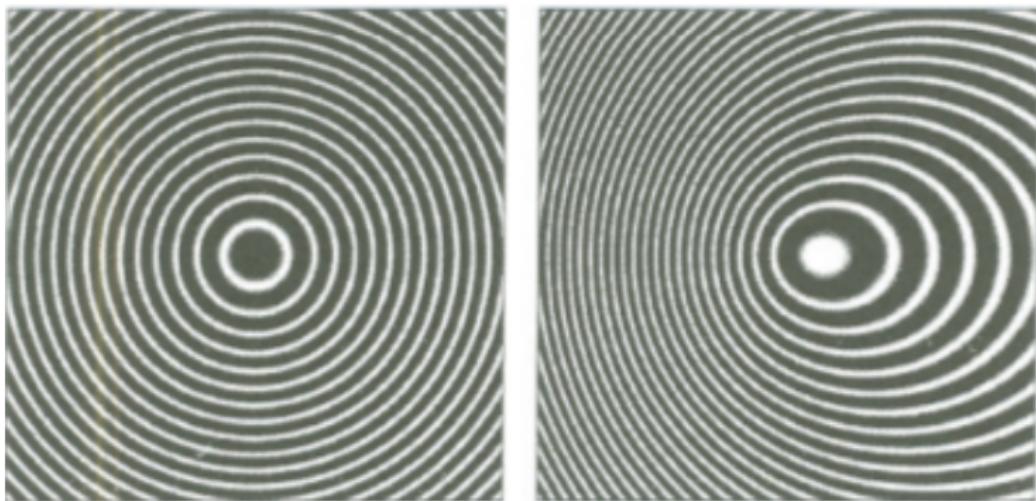
Intensität auf Photoplatte

$$I(\vec{r}) = |\vec{A}_1 + \vec{A}_2|^2 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(k(r - x \sin(\theta)))$$

Hologramm eines Objektpunktes (3/3)



UNI
FREIBURG

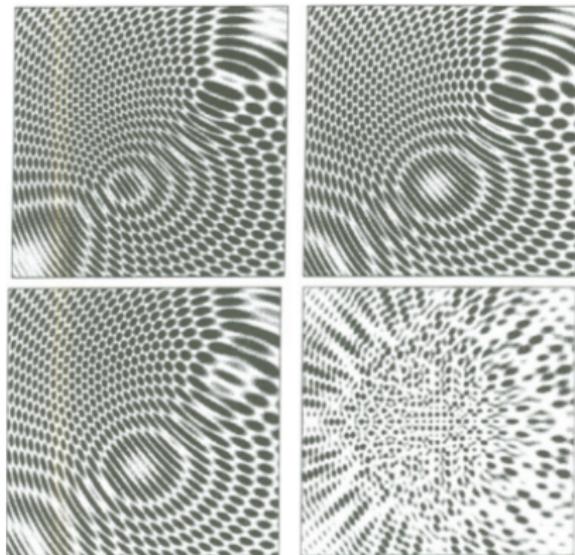


Schwärzung der Photoplatte durch einen Objektpunkt

Hologramm eines beliebigen Objektes

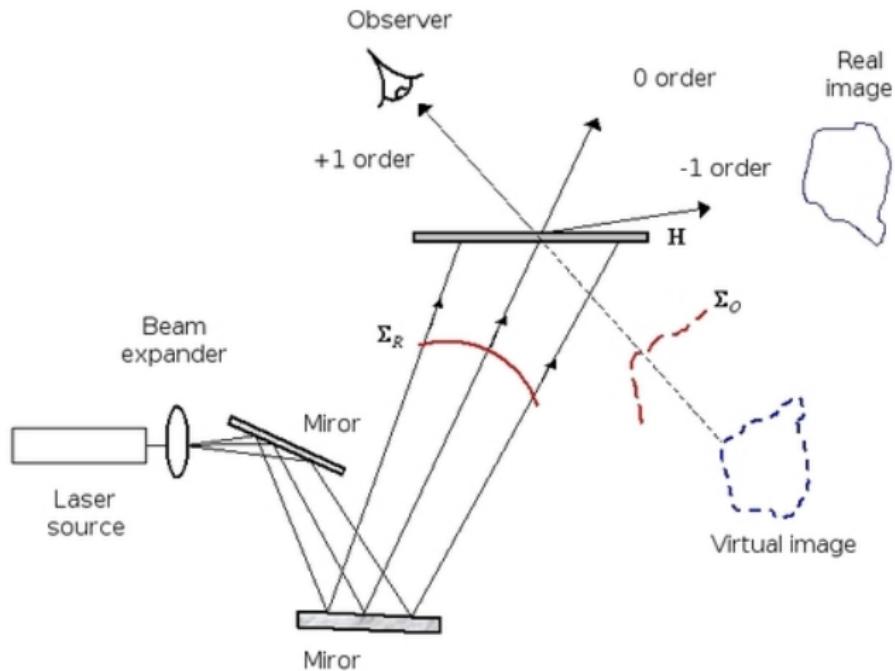


UNI
FREIBURG



Schwärzung der Photoplatte durch mehrere Objektpunkte

Rekonstruktion des Objekts (1/2)



Rekonstruktion des Objekts (2/2)

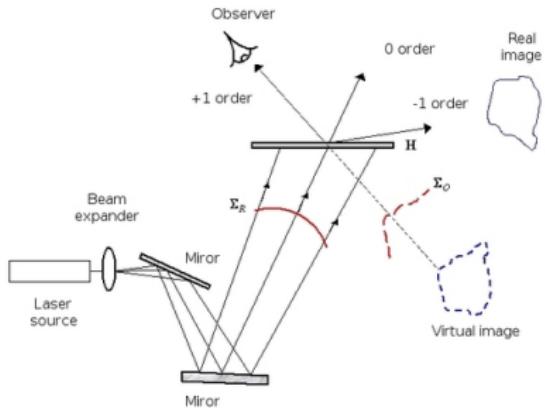


Referenzwelle:

$$A_R(\vec{r}) = A_{R0} e^{ikx \sin \theta}$$

Transmissionsfunktion:

$$T_A = T_0 - C t_e I$$

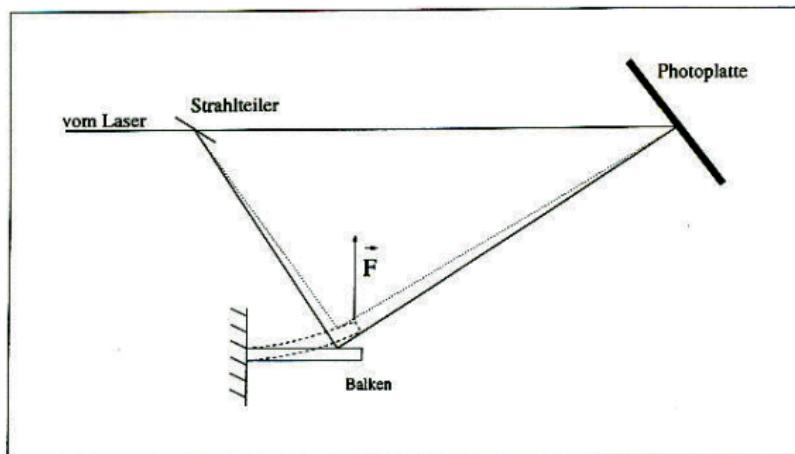


Rekonstruiertes Bild

$$= \underbrace{f(x, \theta)}_{\text{Keine Information}} - \underbrace{\sqrt{I_1 I_2} A_R C t_e e^{ikr}}_{\text{virtuelles Bild}} - \underbrace{\sqrt{I_1 I_2} A_R C t_e e^{-ikr} e^{2ikx \sin(\theta)}}_{\text{reelles Bild}}$$

Holographische Interferometrie (1/2)

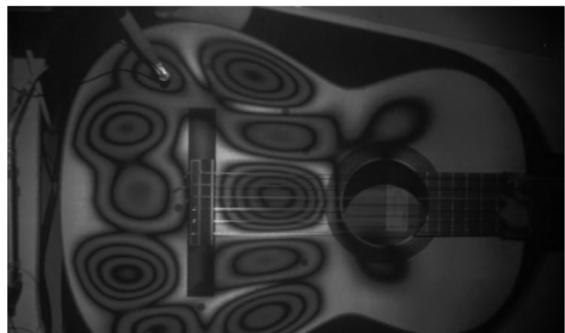
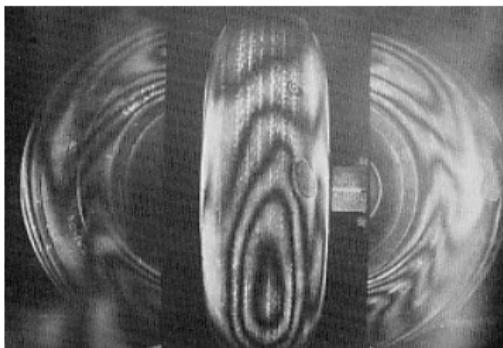
- Interferometrische Messmethode
- Untersuchung von Veränderungen eines Objektes (**ohne es zu berühren**)



aus Staatsexamensarbeit

Holographische Interferometrie (2/2)

- Zerstörungsfreie Prüfung
- Analyse von vibrierenden Oberflächen
- Untersuchung von feinen Konturen



<http://www.holophile.com/images/tires.jpg>

<http://www.delamar.de/wp-content/uploads/2011/05/holographische-interferometrie.jpg> 

Physikalische Grundlagen

Experiment 1: Michelson Interferometer

Experiment 2: Balken-Biegung

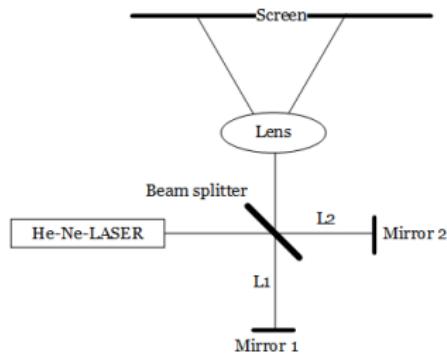
Experiment 3: Eigenschwingungen einer Aluminiumplatte

Experiment 4: Kreuzkorrelation

Experiment 1: Michelson-Interferometer

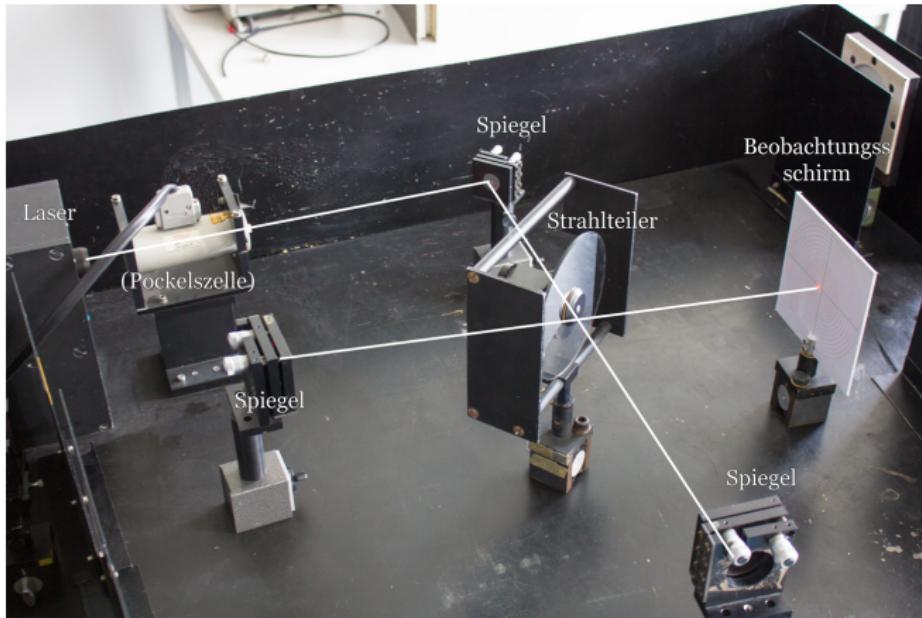
Aufgabenstellung:

- Michelson-Interferometer aufbauen
- Interferenzmuster auf Stabilität testen
- Kohärenzlänge bestimmen



Schema eines
Michelson-Interferometers

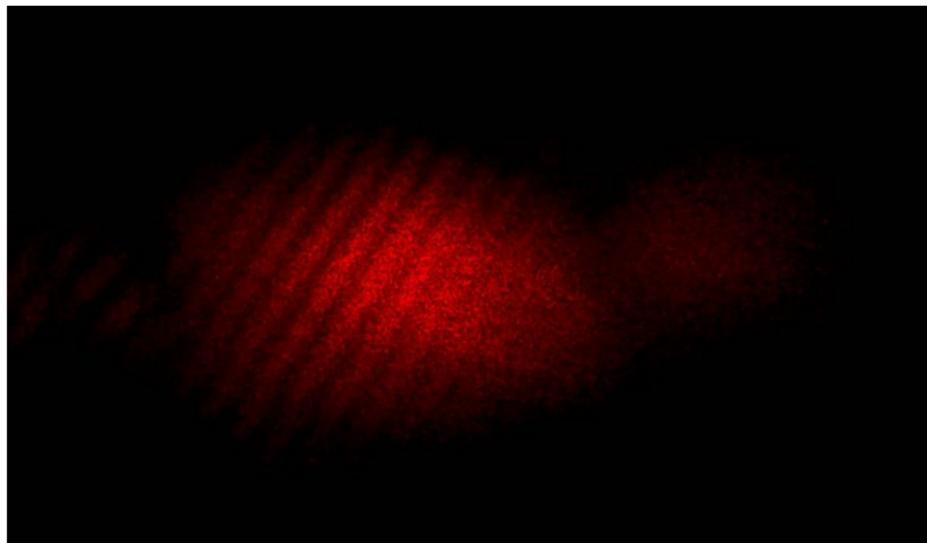
Aufbau des Michelson-Interferometers



Interferenzmuster



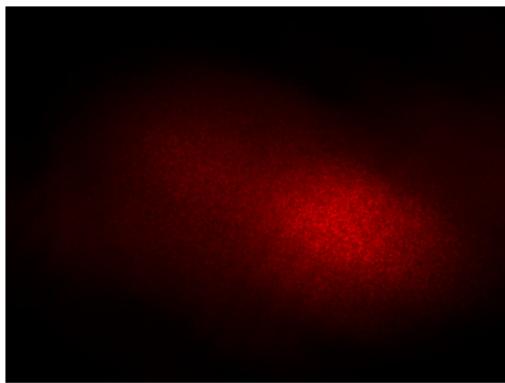
UNI
FREIBURG



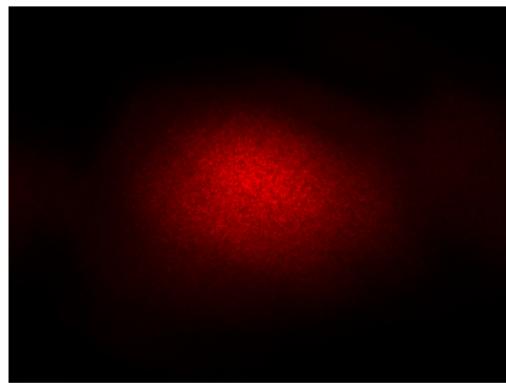
Störung des Musters



UNI
FREIBURG



Störung mit Feuerzeug



Störung durch Schall (822Hz)

Physikalische Grundlagen

Experiment 1: Michelson Interferometer

Experiment 2: Balken-Biegung

Experiment 3: Eigenschwingungen einer Aluminiumplatte

Experiment 4: Kreuzkorrelation

Experiment 2: Balken-Biegung

Aufgabenstellung:

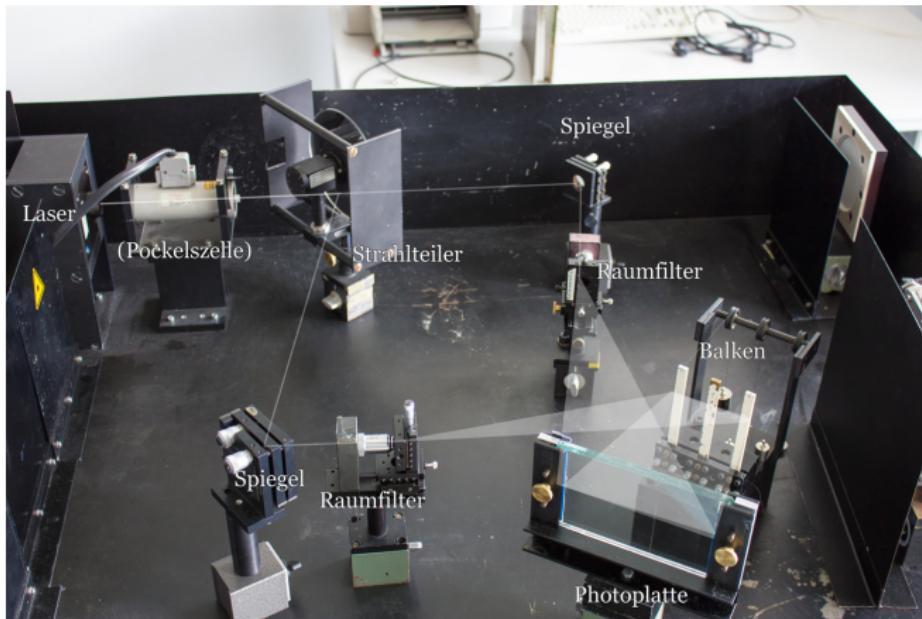
- Drei Balken: Aluminium, Messing, Stahl
- Balken mit Doppelbelichtungsmethode holographieren
- Elastizitätsmodule mit Hilfe des Interferenzmuster berechnen

Belichten $\text{AgBr} \xrightarrow{h\nu} \text{Ag} + \frac{1}{2}\text{Br}_2$

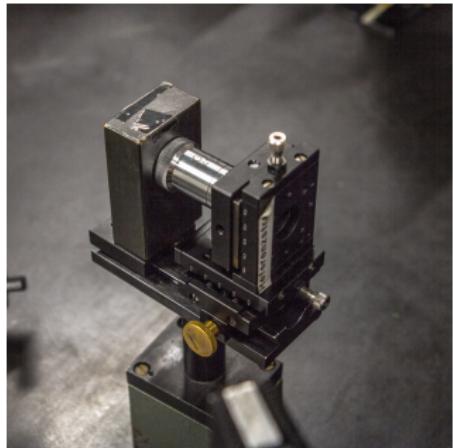
Entwickeln Ag kristallisieren → Schwärzung der Platte

Fixieren Br_2 und Ag-Salze auswaschen
Amplitudenhologramm → Phasenhologramm

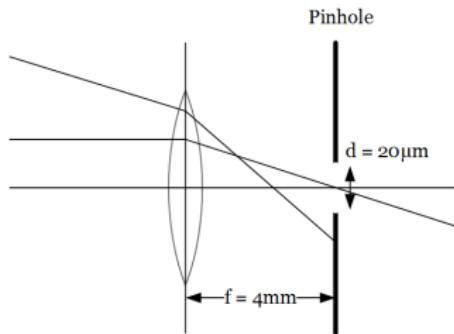
Aufbau zur Doppelbelichtung der Balken



Funktionsweise des Raumfilters



Raumfilter

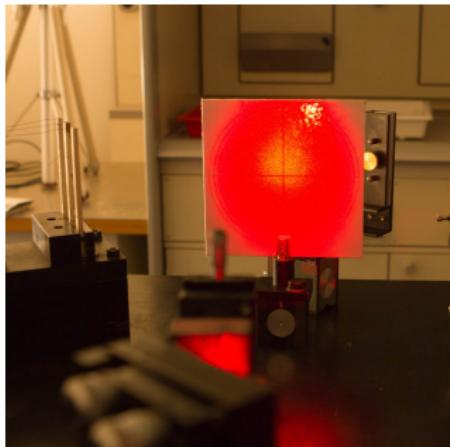
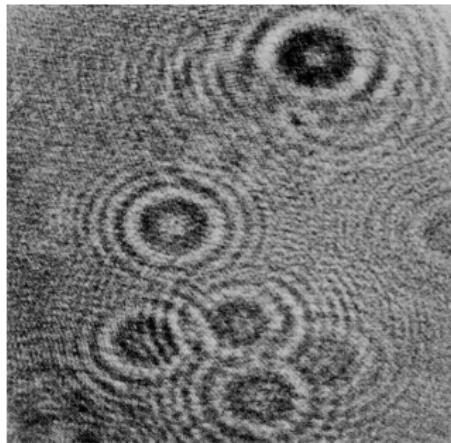


Wirkungsweise der Raumfilter

Wirkung der Raumfilter



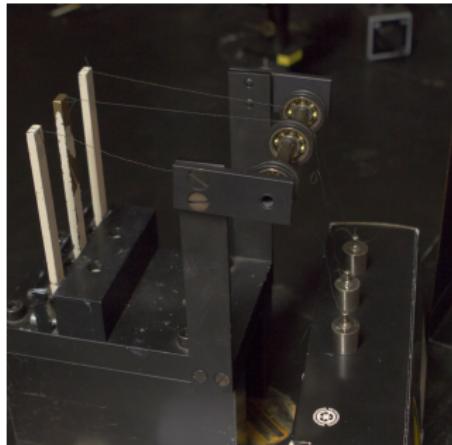
UNI
FREIBURG



Staubpartikel im Strahlengang

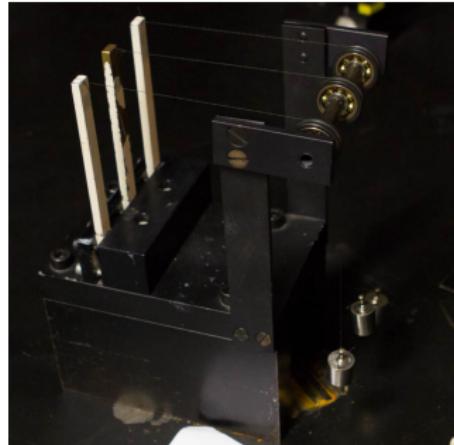
Durch Raumfilter aufgeweiteter
Laserstrahl

Belichtungen

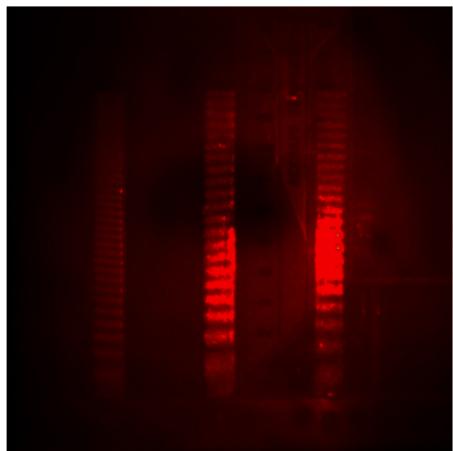


Erste Belichtung: Balken entlastet

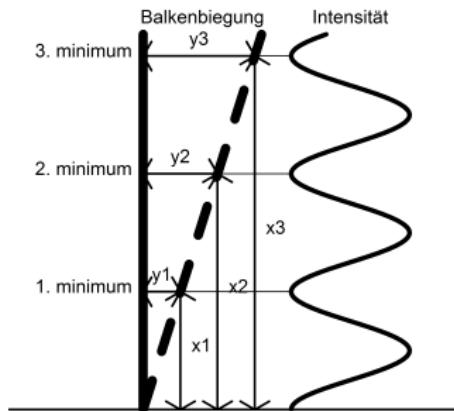
Zweite Belichtung: Balken belastet



Bestimmung der Minima



Das Interferenzmuster



Ablesen der Minima

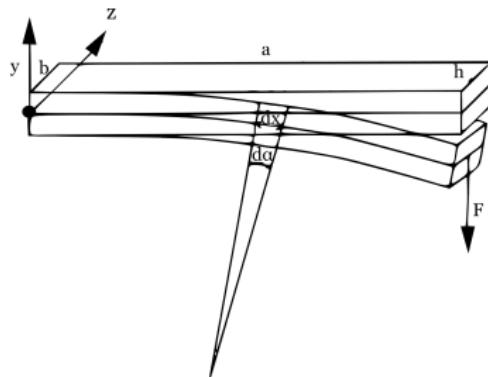
Bestimmung der Minima



Das Interferenzmuster



Ablesen der Minima



Auslenkung:

$$y = -\underbrace{\frac{12F}{Ebc^3}}_{P_1} \left(\frac{ax^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right)$$

Belasteter Balken¹

¹ aus Staatsexamensarbeit

Berechnung der Auslenkung

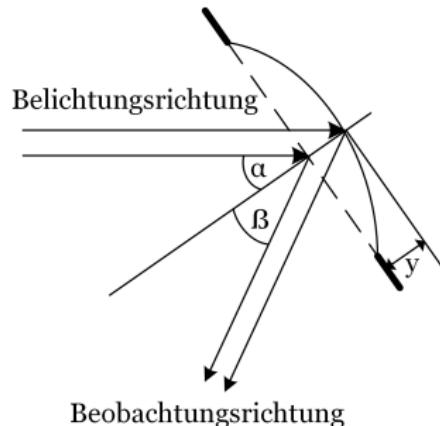
Resultierender

Gangunterschied:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot y \cdot (\cos(\alpha) + \cos(\beta))$$

Bedingung für Minima:

$$\Delta\phi = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$$



Resultierende Auslenkung

$$y = \frac{\lambda}{4} (2n + 1) \frac{1}{\cos(\alpha) + \cos(\beta)}$$

Bestimmung des Elastizitätsmoduls



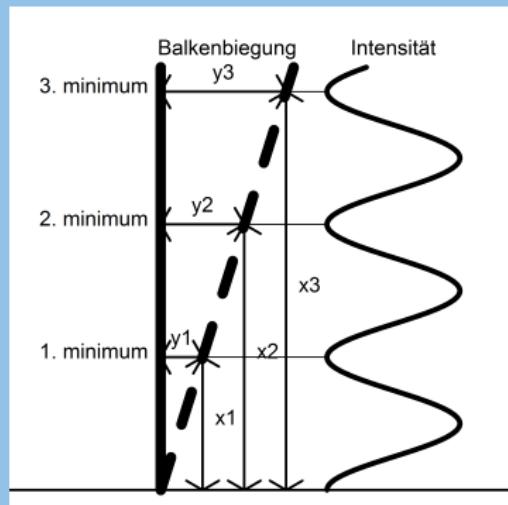
Fitfunktion

$$y = \mathbf{P}_1\left(\frac{ax^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right) + \mathbf{P}_2x + \mathbf{P}_3$$

a: Länge des Balken

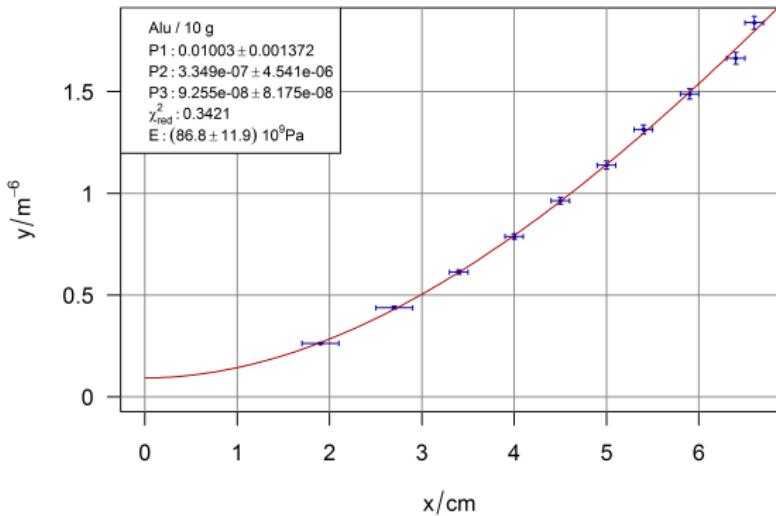
x: Position des Minimums

y: Durchbiegung des Balkens



Beispiel einer Messung

$$y = \mathbf{P}_1 \left(\frac{ax^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + \mathbf{P}_2 x + \mathbf{P}_3$$
$$\alpha = (36 \pm 3)^\circ \quad \beta = (4 \pm 3)^\circ \quad s_x = 0,1 \text{ cm}$$



x-Achse: Position des Minimums; y-Achse: Auslenkung

Berechnung des Elastizitätsmoduls E



Formel für den Elastizitätsmodul

$$E = \frac{12F}{P_1 bc^3} = \frac{12mg}{P_1 bc^3}$$

Masse des Gewichts : m

Erdbeschleunigung : $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Breite des Balkens : $b = (10.5 \pm 0.02) \text{ mm}$

Dicke des Balkens : $c = (5.05 \pm 0.02) \text{ mm}$

Fitparameter : P_1

Zusammenfassung der Ergebnisse

Material	E_{Exp} / GPa	E_{Lit} / GPa
Aluminium	97 ± 9	72
Messing	115 ± 7	100
Stahl	217 ± 15	195

Mögliche Fehlerquellen

- Einspannpunkt nicht exakt bestimmbar
- Beobachtungswinkel nicht genau genug bestimmt
- Belichtung und -Winkel der einzelnen Balken unterschiedlich

Physikalische Grundlagen

Experiment 1: Michelson Interferometer

Experiment 2: Balken-Biegung

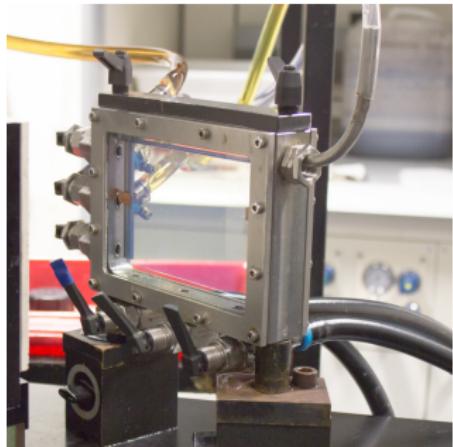
Experiment 3: Eigenschwingungen einer Aluminiumplatte

Experiment 4: Kreuzkorrelation

Aufgabenstellung

- Hologramm einer ruhenden Aluminiumplatte erstellen
- Anregen der Aluminiumplatte mit Lautsprecher
- Eigenfrequenzen durch Echtzeitholographie bestimmen

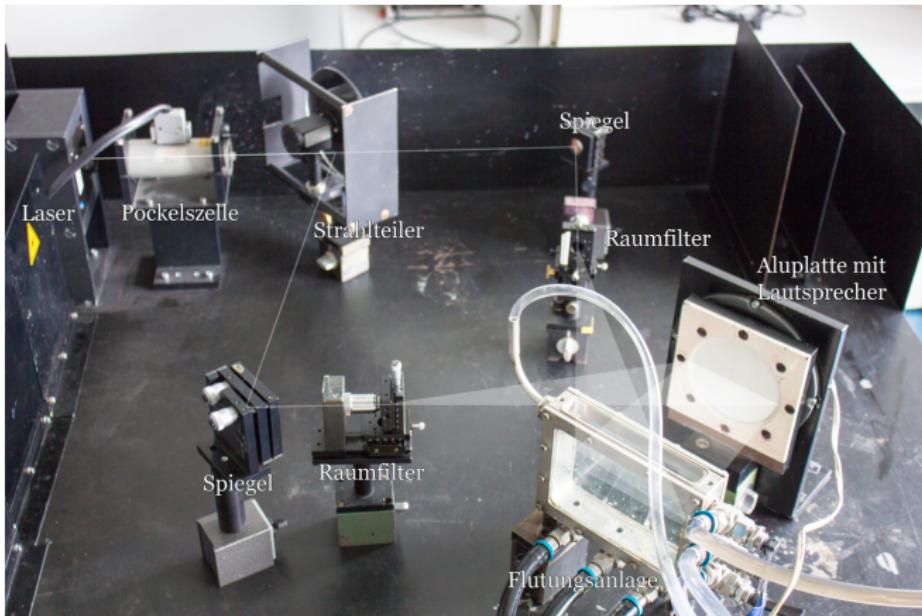
Funktionsweise der Flutungsanlage



- Belichtung und Entwicklung am selben Ort

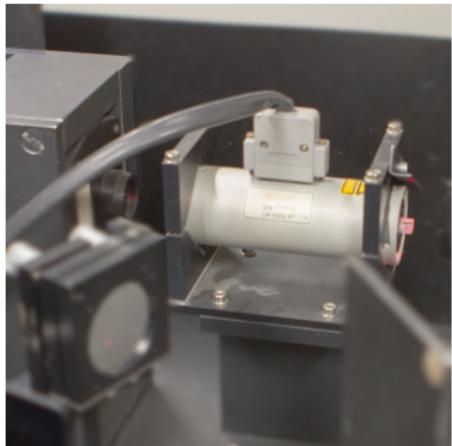
Flutungsanlage inkl. Photoplatte

Aufbau zur Echtzeitholographie

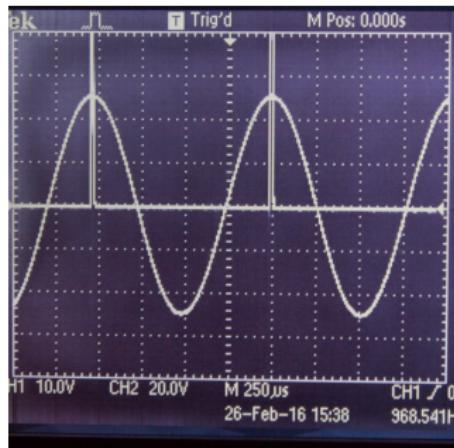


Aufbau zur Bestimmung der Eigenfrequenzen

Stroboskopische Beleuchtung

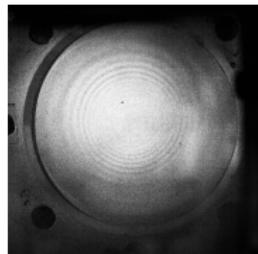


Pockelszelle zum Schalten des Lasers

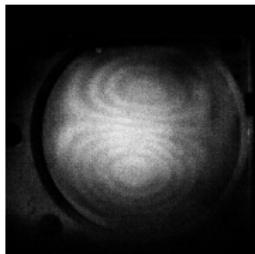


Trigger der Pockelszelle auf Maxima der Schallwelle

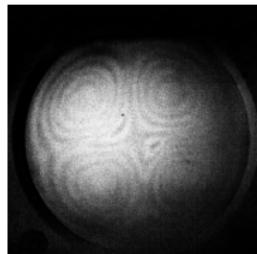
Beobachtete Eigenfrequenzen (1/2)



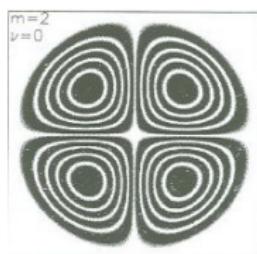
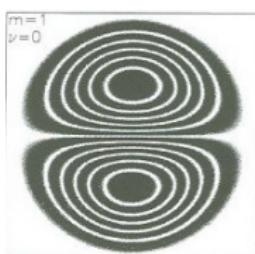
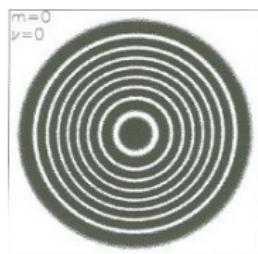
f_{00} -Mode: 442 Hz



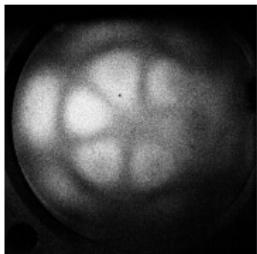
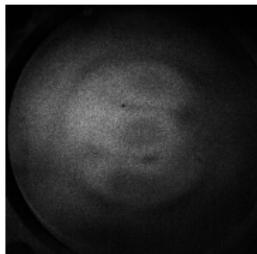
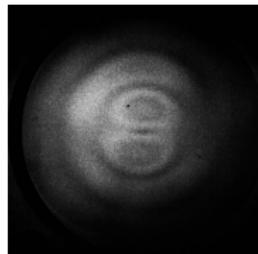
f_{10} -Mode: 1068 Hz



f_{20} -Mode: 1738 Hz



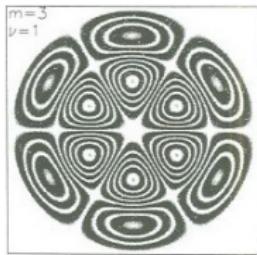
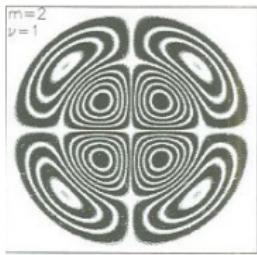
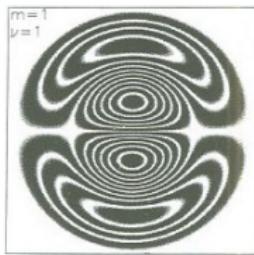
Beobachtete Eigenfrequenzen (2/2)



f_{11} -Mode: 2931 Hz

f_{21} -Mode: 4149 Hz

f_{31} -Mode: 5429 Hz



Theoretische Berechnung der Eigenfrequenzen (1/2)



Eigenfrequenzen einer runden eingespannten Platte

$$f_{mv} = \frac{x_{mv}^2}{2\pi R^2} h \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}} = x_{mv}^2 c$$

$$J_m(ix)[J_{m-1}(x) - J_{m+1}(x)] - iJ_m(x)[J_{m-1}(ix) - J_{m+1}(ix)] = 0$$

$$R = (5.0 \pm 0.5) \text{ cm}$$

$$h = 5 \text{ mm}$$

$$E = 72 \text{ GPa}$$

$$\rho = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

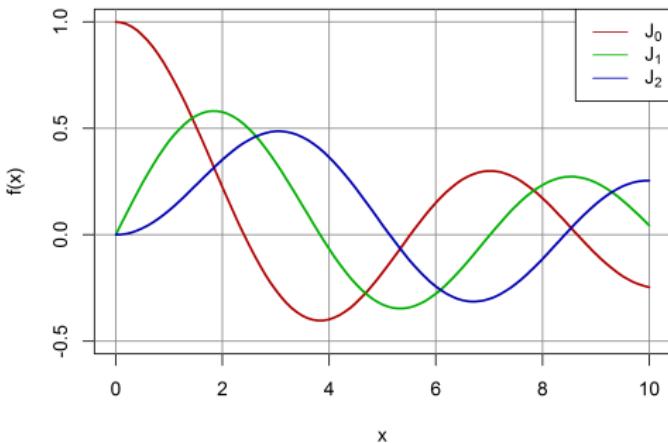
$$\mu = 0.34$$

Theoretische Berechnung der Eigenfrequenzen (2/2)



x_{mv}	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$
$v = 0$	3.19622	4.61090	5.90568	7.14353
$v = 1$	6.30644	7.79927	9.19688	10.53670

Berechneten x_{mv} Werte

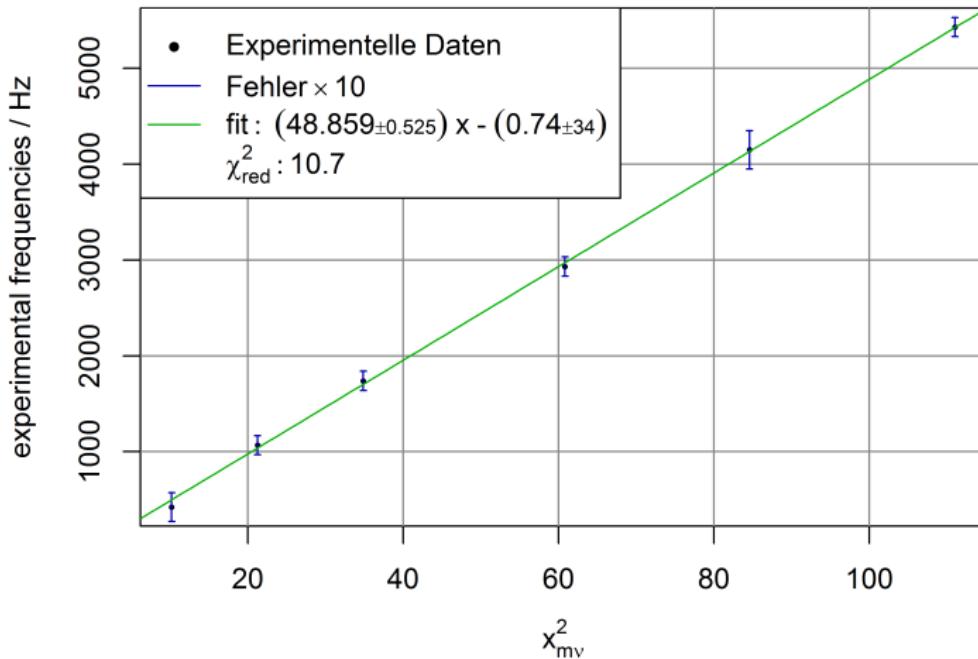


Experimentelle und theoretische Daten

mode	f_{exp}/Hz	f_{lit}/Hz	f_{theo}/Hz
f_{00}	442 ± 15	448	5082
f_{10}	1068 ± 10	983	10577
f_{20}	1738 ± 10	1592	17352
f_{11}	2931 ± 10	2854	30263
f_{21}	4149 ± 20	4090	42081
f_{31}	5429 ± 10	-	55235

Überprüfung des theoretischen Modells

$$f_{mv} = x_{mv}^2 c$$



Physikalische Grundlagen

Experiment 1: Michelson Interferometer

Experiment 2: Balken-Biegung

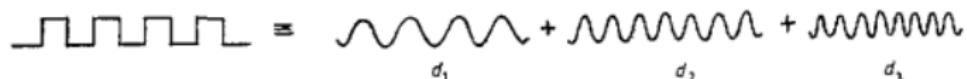
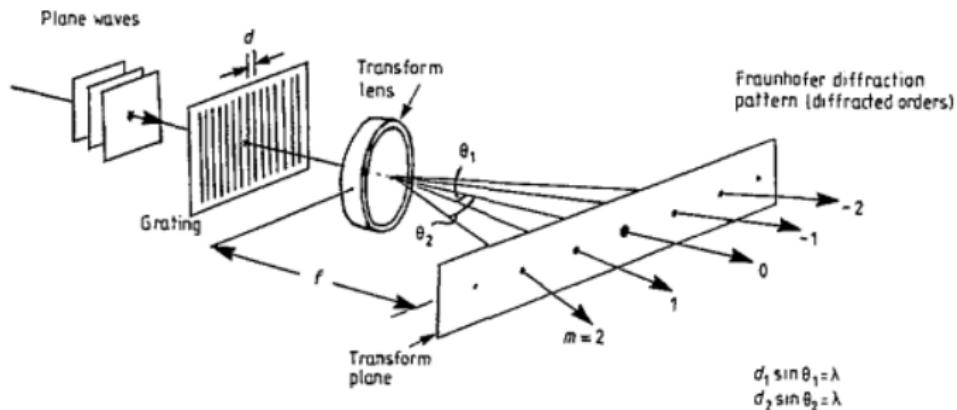
Experiment 3: Eigenschwingungen einer Aluminiumplatte

Experiment 4: Kreuzkorrelation

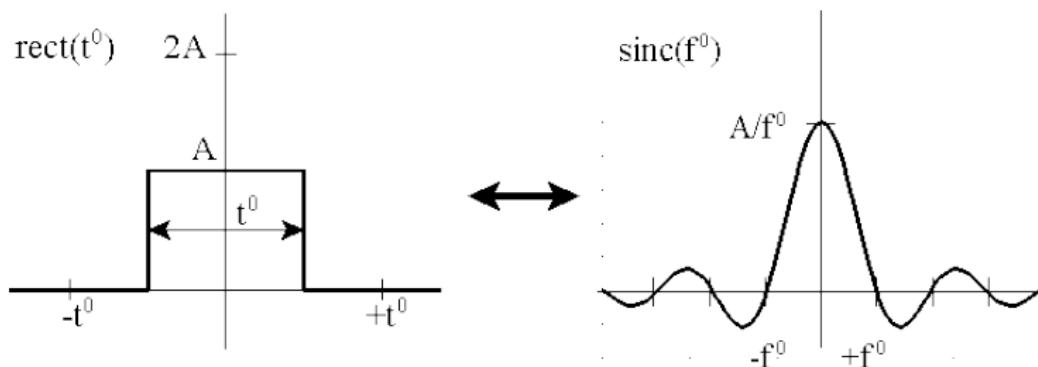
Experiment 4: Kreuzkorrelation

Ziel: Kreuzkorrelation zweier verdrehter Spalte
beobachten

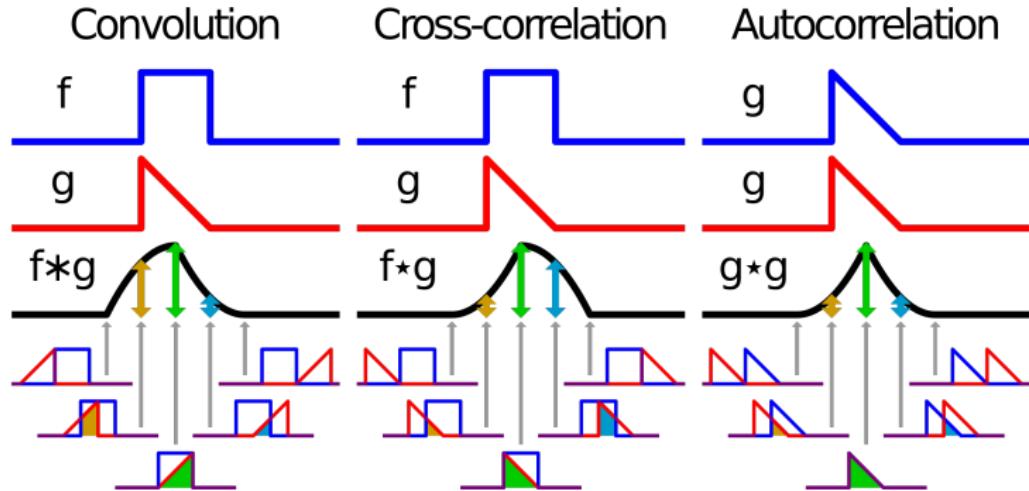
2f-System



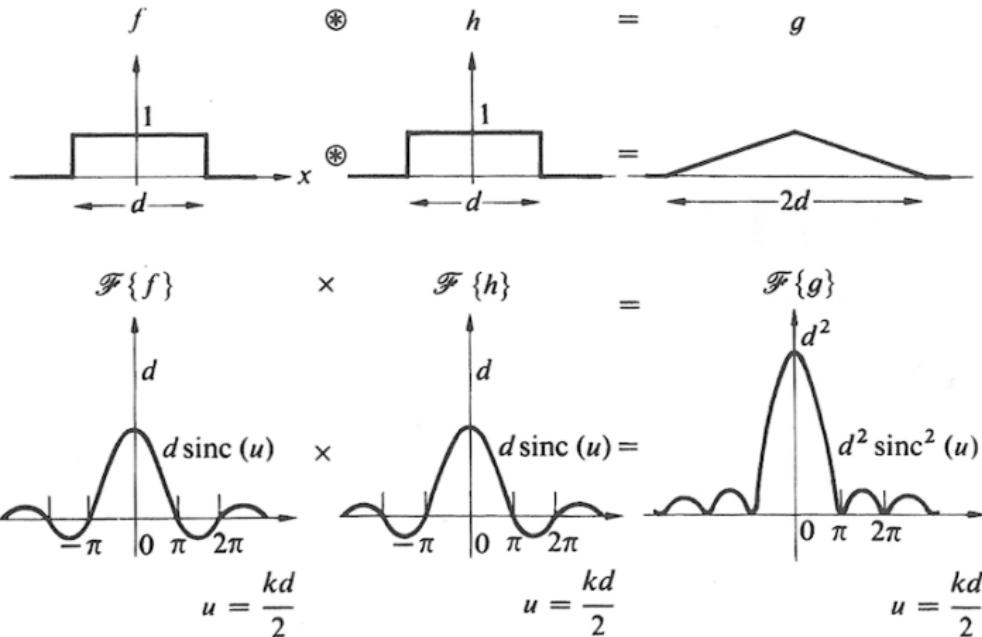
Einzelspalt



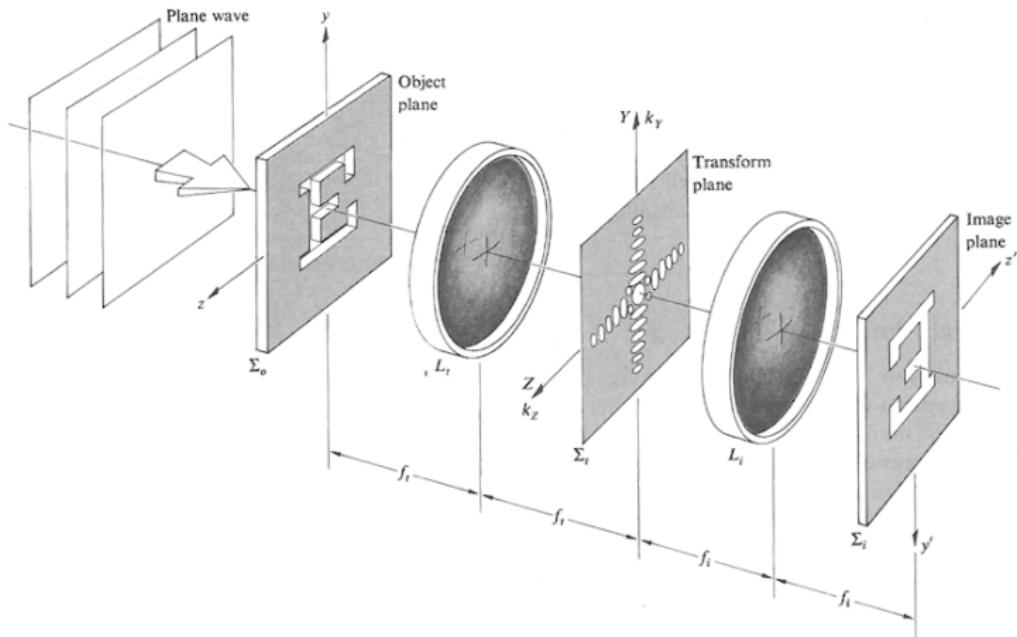
Fourier Paar rect/sinc



Faltungstheorem



4f-System



Simulation der Kreuzkorrelation

0°



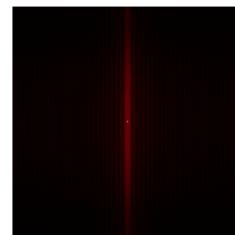
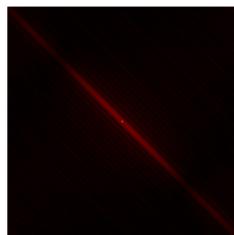
45°



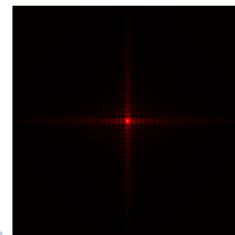
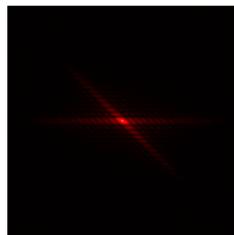
90°



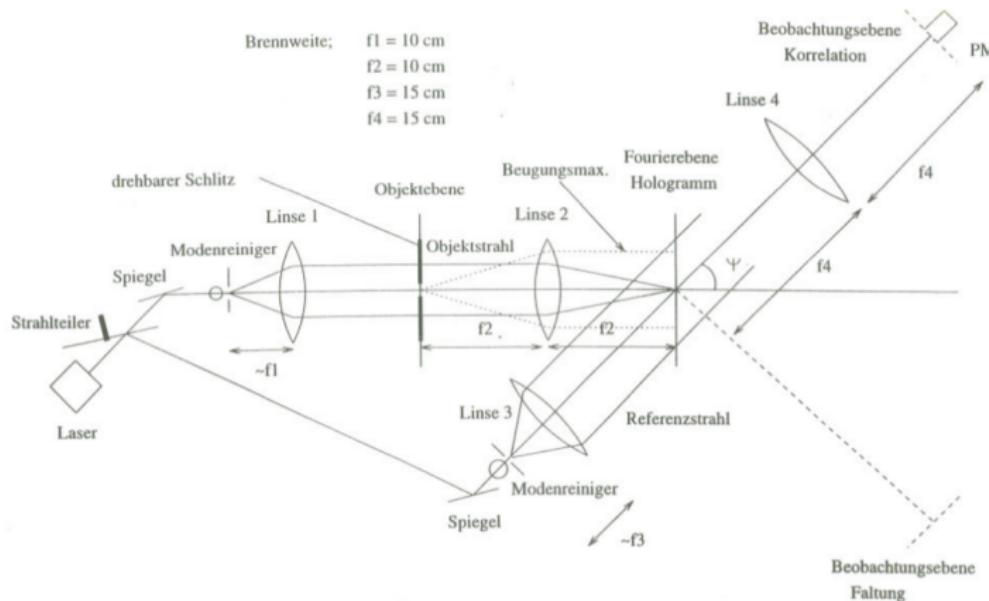
FT



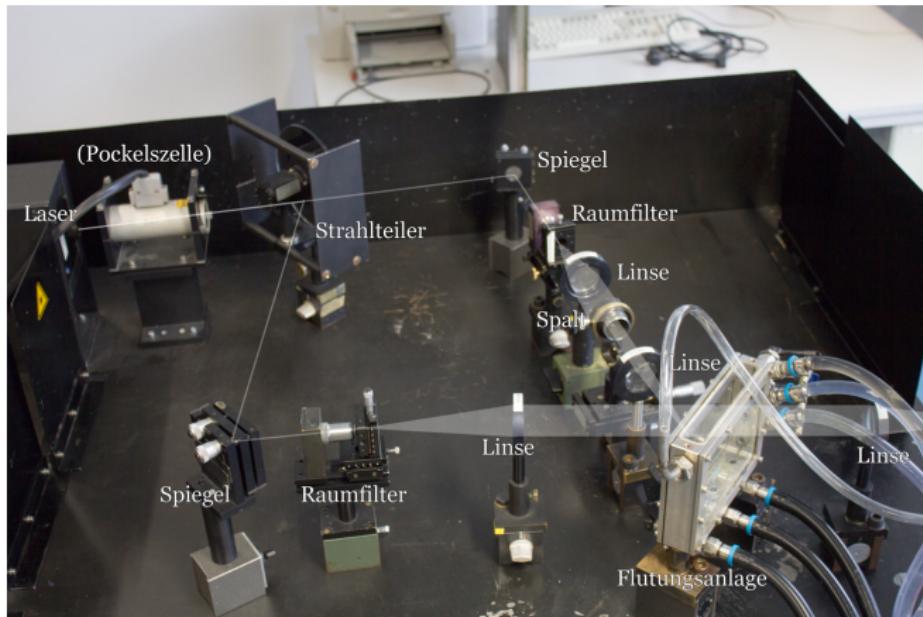
Faltung



Skizze des Versuchsaufbaus zur Fourierinterferometrie



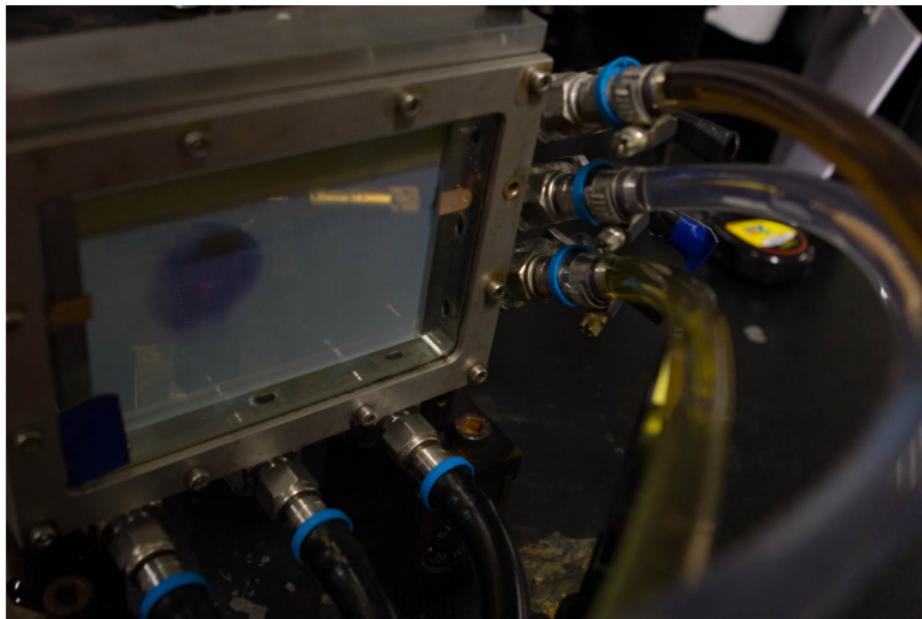
Versuchsaufbau zur Fourierinterferometrie



Belichtete Photoplatte



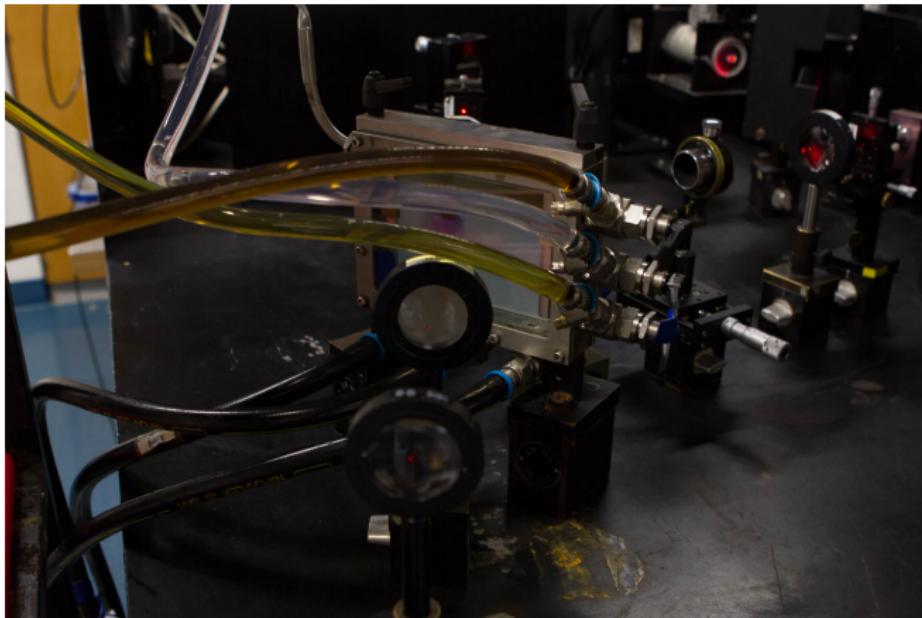
UNI
FREIBURG



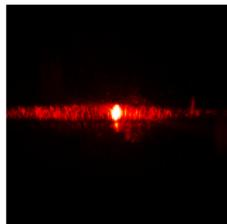
Beobachtung der Kreuzkorrelation



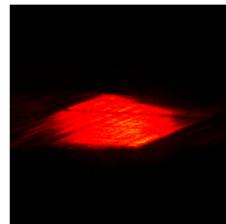
UNI
FREIBURG



Beobachtungen (1/2)



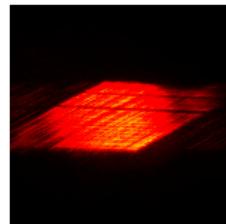
Autokorrelation



Kreuzkorrelation bei 20°

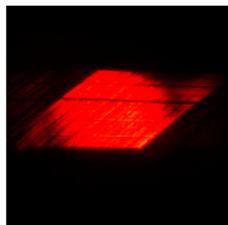


Kreuzkorrelation bei 10°

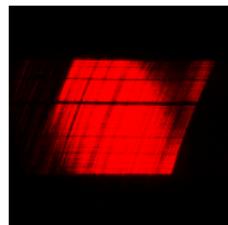


Kreuzkorrelation bei 30°

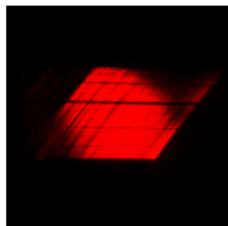
Beobachtungen (2/2)



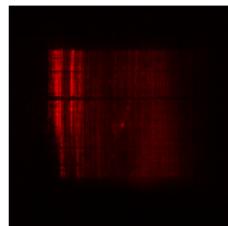
Kreuzkorrelation bei 40°



Kreuzkorrelation bei 80°

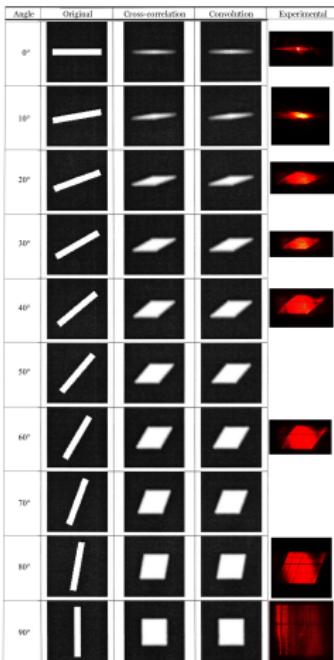


Kreuzkorrelation bei 60°



Kreuzkorrelation bei 90°

Vergleich mit Simulation



aus Anleitung

Zusammenfassung

- Kohärentes Laserlicht, aber Intensitätsmuster sehr fragil
- Elastizitätsmodule systematisch zu hoch
- Eigenfrequenzen mit Theorie vereinbar
- Kreuzkorrelation sehr gut beobachtbar



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!