

Holografische Interferometrie

Alexander Nykolyon & Daniel Schmidt
Berlin, den 21. Oktober 2002
Optisches Institut, TU Berlin, Fortgeschrittenenpraktikum

Die holografische Interferometrie ist eine Methode geringe Deformation von Körpern im Wellenlängenbereich des Lichts zu untersuchen. Es können zwei oder mehrere Zustände des Körpers anhand von Interferenzmuster betrachtet werden. Der Versuch umfaßt die Doppelbelichtungsmethode, des Echtzeitmethode und des Zeitmittelwertmethode.

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen der Holografischen Interferometrie	2
1.1	Doppelbelichtungsmethode	2
1.2	Zeitmittelwert-Methode	2
1.3	Belichtungsreihe	2
2	Aufbau und Durchführung	3
2.1	Geräte	3
2.2	Doppelbelichtungshologramm einer defomierten Platte	3
2.3	Schwingende Membran in Echtzeit	4
2.4	Schwingende Membran im Zeitmittelwert	4
2.5	Brechungsindex eines Gases	4
2.6	Hinweise	4
3	Auswertung	5
3.1	Deformation der Platte	5
3.2	Schwingende Membran in Realzeit	5
3.3	Schwingende Membran im Zeitdurchschnitt	5
3.4	Brechungsindex eines Gases	9

1 Theoretische Grundlagen der Holografischen Interferometrie

1.1 Doppelbelichtungsmethode

Es werden zwei Hologramme des zu untersuchenden Gegenstands auf die Hologrammplatte aufgenommen. Eine Weglängenänderung der Strahlen ist am Interferenzmuster zu erkennen. (Siehe Abb. 1)

$$d = \frac{n\lambda}{\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2} \quad (1.1)$$

- Wellenlänge des Lichts
- φ_1 Winkel zwischen Beleuchtungs- und Verschieberichtung
- φ_2 Winkel zwischen Beobachtungs- und Verschieberichtung
- d Verschiebung
- n Anzahl der Extrema zwischen den betrachteten Interferenzstreifen

Abbildung 1: Winkelverhältnisse bei der Doppelbelichtungsmethode

1.2 Zeitmittelwert-Methode

Für eine harmonische Schwingung gilt für die Intensität der Objektwelle

$$E(x, y) \propto J_0 \left\{ \frac{2\pi a}{\lambda} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \right\} \quad (1.2)$$

- λ Wellenlänge des Lichts
- J_n Besselfunktion n -ter Ordnung
- a Amplitude der harmonischen Schwingung

1.3 Belichtungsreihe

In der Abbildung 2 ist die Abhängigkeit des Schwärzungskoeffizient D von der Bestrahlungsenergie E dargestellt. Es muß eine Belichtungszeit zwischen den beiden Punkten A und C erreicht werden, womit ein starker Kontrast erreicht wird.

Das Verhältnis der Intensität Objekt- und Referenzwelle sollte 1:3 betragen. Die Winkel zwischen Objekt- und Referenzwelle sollte möglichst klein sein. Aber auch der Strahlaufweg der Referenz- und Objektwelle müssen annähernd gleich.

Abbildung 2: Gradationkurve

2 Aufbau und Durchführung

2.1 Geräte

- Helium-Neon-Laser
- Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel)
- 2 Strahlaufweiter (Linse und Blende)
- 3 Spiegel
- verfügbares Fotolabor (Entwickler, Fixierer, Stoppbad, Dunkelraum)
- ausreichend viele Hologrammplatten
- Halterung für Hologrammplatte (Repositionierbar)
- Fotokathode als Ampèremeter
- Fotokamera
- Frequenzgenerator
- Kopfhörermembran
- deformierbare Platte mit Zentimeterkästchen und Millimeterschraube
- Becherglas
- sogenannte „Druckluft“ (aus der Dose)
- Mattscheibe



Abbildung 3: Der Aufbau für holografische Interferometrie

2.2 Doppelbelichtungshologramm einer defomierten Platte

Abbildung 4: Aufbau Holographie der Verformung einer Platte

Beim Aufbau - siehe Abb. 4 werden folgende die Abstände der Tabelle 1

Der Strahlungsteiler wird so eingestellt, daß die Intensität des Objektstrahls ein Drittel der des Referenzstrahls ist. Die Intensität wird durch die Stromstärke an einer Photodiode getrennt für beide Strahlen aufgenommen. Das Verhältnis beider Amperewerte muß 1:3 sein.

Im Vorfeld wird die Photoplatte durch streifenweise Abdeckung unterschiedlich lange belichtet. Als kontrastreichste Belichtungszeit nimmt man 4 Sekunden.

Für die Aufnahme wird die Photoplatte im Grundzustand und im verformten Zustand belichtet. Nach der Entwicklung wird die Photoplatte so gut wie möglich repositioniert. Für die Ansicht des Hologramms wird der Objektstrahl abgedeckt. Die Belichtungszeit für das Foto betragen 60 s.

Die Winkel betragen $\varphi_1 = 50^\circ$ und $\varphi_2 = 40^\circ$.

Laser - Strahlteiler	9 cm
Referenzstrahl	
Strahlteiler - Strahlaufweiter	28 cm
Blende - Spiegel	14 cm
Spiegel - Platte	53 cm
Objektstrahl	
Strahlteiler	23 cm
Blende - Spiegel	10 cm
Spiegel - Objekt	25 cm
Objekt - Platte	27 cm

Tabelle 1: Abstände der Gerätschaften für die Doppelbelichtungsmethode

2.3 Schwingende Membran in Echtzeit

In Abbildung 5 ist der Aufbau geschildert. Zuerst wird die Photoplatte 4 s belichtet. Nach der Entwicklung wird die Photoplatte wieder repositioniert. Es wird eine harmonische Schwingung von 1,25 kHz an die Lautsprecher-membran angelegt. Die dabei entstehenden Interferenzmuster werden aufgenommen.

Abbildung 5: Aufbau zur Untersuchung einer schwingenden Membran

2.4 Schwingende Membran im Zeitmittelwert

Bei dieser Methode wird die Photoplatte bei der Schwinung von 1,25 kHz aufgenommen, nach der Entwicklung wieder zur Aufnahme des Photos repositioniert. Auch hierbei werden die Interferenzmuster aufgenommen.

2.5 Brechungsindex eines Gases

Bei diesem Versuche erfolgt ein Aufbau wie in Abbildung 6. Die Photoplatte wird 4 s belichtet. Nach der Repositionierung wird die sogenannte Druckluft in das Becherglas eingesprüht, wobei Interferenzmuster beobachtet werden. Die Winkel betragen $\varphi_1 = 50^\circ$ und $\varphi_2 = 40^\circ$.

Abbildung 6: Aufbau zur Untersuchung des Brechungsindex eines Gases

2.6 Hinweise

- Verschußautomatik des Lasers überprüfen
- Geduld beim Einstellen der maximalen Strahlaufweitung
- Fozelle als Ampèremeter verwenden
- Akrebie beim Repositionieren
- Bei längerzeitlichen Aufnahmen das Becherglas dieses abdecken, damit Druckluft nicht entweicht

Laser - Strahlteiler	9 cm
Objektstrahl	
Strahlteiler - Strahlaufweiter	20 cm
Blende - Spiegel	15 cm
Spiegel - Mattscheibe	28 cm
Mattscheibe - Objekt	7 cm
Objekt - Fotoplatter	20 cm
Referenzstrahl	
Strahlteiler - Strahlaufweiter	21 cm
Strahlaufweiter - Spiegel	15 cm
Spiegel - Spiegel	26 cm
Spiegel - Fotoplatte	28 cm

Tabelle 2: Abstände der Gerätschaften für die Doppelbelichtungsmethode

3 Auswertung

3.1 Deformation der Platte

Die Maxima des Fotos der Platte (Abbildung 7) werden in die Tabelle 3 aufgenommen. Die Abhängigkeit der Verformung d zum Ort eines Plattenpunktes wird in Abbildung 8 dargestellt. Als Fehlerspanne erhält man $\Delta h_{1/2} = 0,1 \text{ cm}$, $\Delta d = 0,07 \mu\text{m}$.

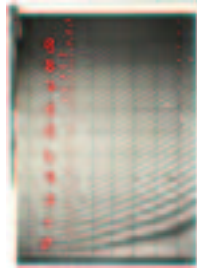


Abbildung 7: Interferenzmuster der verformten Platte

3.2 Schwingende Membran in Realzeit

Die Interferenzmuster sind nur schwer erkennbar. Auch durch Erhöhung der Tiefenschärfe war keine Abbildung auf eine Foto möglich. Die Beobachtung mit dem Auge wird in der Skizze 11 wiedergegeben

3.3 Schwingende Membran im Zeitdurchschnitt

Die Extrema der Interferenzmuster entsprechen den Extrema der Gleichung 1.2. Dabei entspricht das hellste Maximum dem ersten Maximum der Besselfunktion ($n = 1$). Man verfolgt beidseitig von diesem Punkt auf einer Linie und ordnet dem Abstand das jeweilige Extremum zu. Die Funktionswerte z an den Extrema der Besselfunktion sind mathematisch vorgegeben. Es gilt die Beziehung

$$a = \frac{z\lambda}{2\pi(\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2)} = 7,151 \cdot 10^{-8} z \quad (3.1)$$

Als Fehler ergeben sich $\Delta r = 0,1 \text{ cm}$, $\Delta a = 0,0010$.

Nr	Hoehe	Linie1	Linie2
1	0.1	0.8	0.43
3	0.8	2.0	1.29
5	1.4	3.0	1.72
7	1.9	3.8	2.15
9	2.4	4.5	2.58
11	2.9	5.1	3.01
13	3.5	5.8	3.44
15	3.9	6.3	3.87
17	4.9	7.0	4.73
19	5.4	7.5	5.16
21	5.9	8.0	5.59
23	6.5	8.7	6.02
25	7.0	9.3	6.45
27	7.5	9.9	6.88
29	8.0		7.31
31	8.5		7.74
33	9.0		8.17
35	9.5		8.6
37	10.0		9.03

Tabelle 3: Meßwerte für die Verformung der Platte – siehe Abb. 7

Nr. des Extrim n	$z \frac{dJ_0}{dz} = 0$	z_1 Ort des Extremums	z_2 Ort des Extremums	Aplitude
1	0	1.4	1.3	0
2	2.4	1.25	1.15	0.172
3	3.83	1.15	1.05	0.274
4	5.52	1.05	0.95	0.395
5	7.1	0.95	0.9	0.508
6	8.65	0.85	0.75	0.619
7	10.2	0.75	0.65	0.729
8	11.7	0.60	0.55	0.837
9	13.3	0.45	0.4	0.951
10	14.9	0.30	0.25	1.066
2	2.4	1.6	0	0.172
3	3.83	1.7	1.45	0.274
4	5.52	1.9	1.05	0.395
5	7.1	2.1	1.15	0.508

Tabelle 4: Extrema der Interferenzmuster für die schwingende Membran

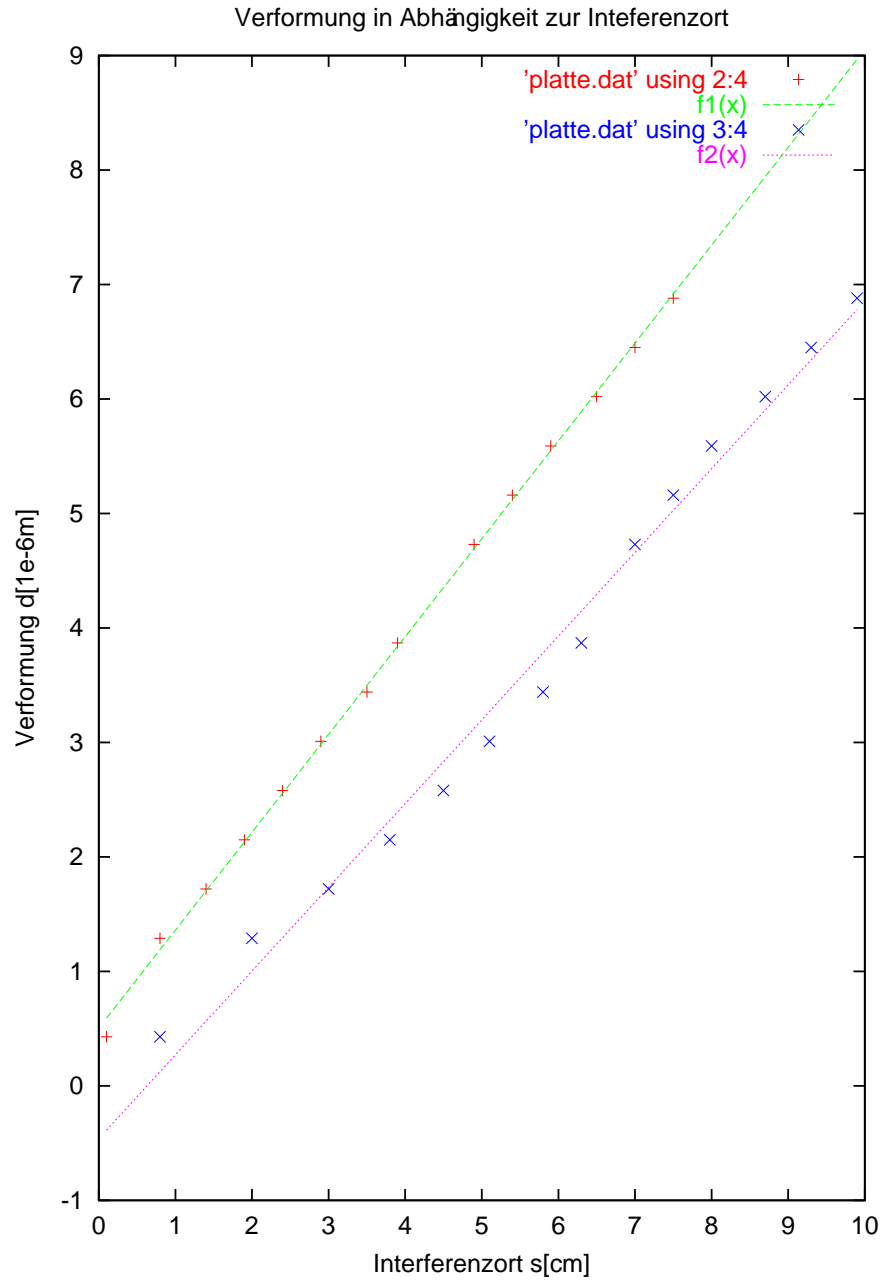


Abbildung 8: Die Deformation der Platte durch die Meßpunkte der Abb. 7

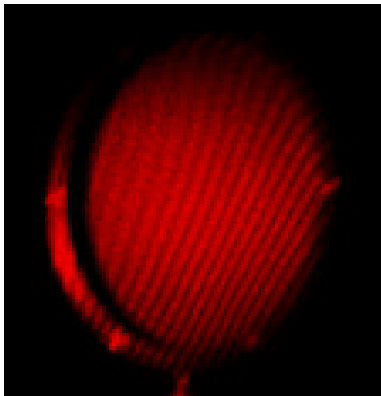


Abbildung 9: lineare Muster für die schwingende Membran

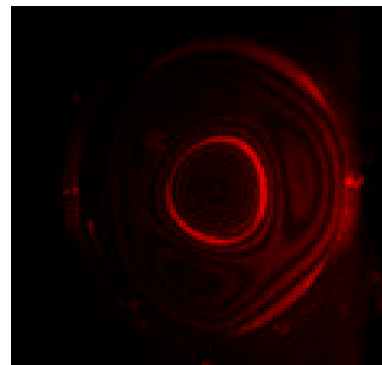


Abbildung 10: konzentrische Muster für die schwingende Membran

Abbildung 11: Realzeitinterferenzmuster einer schwingenden Membran

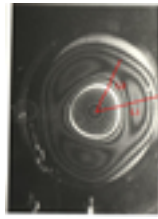


Abbildung 12: Zeitmittlungsmethode der Lautsprechermembran

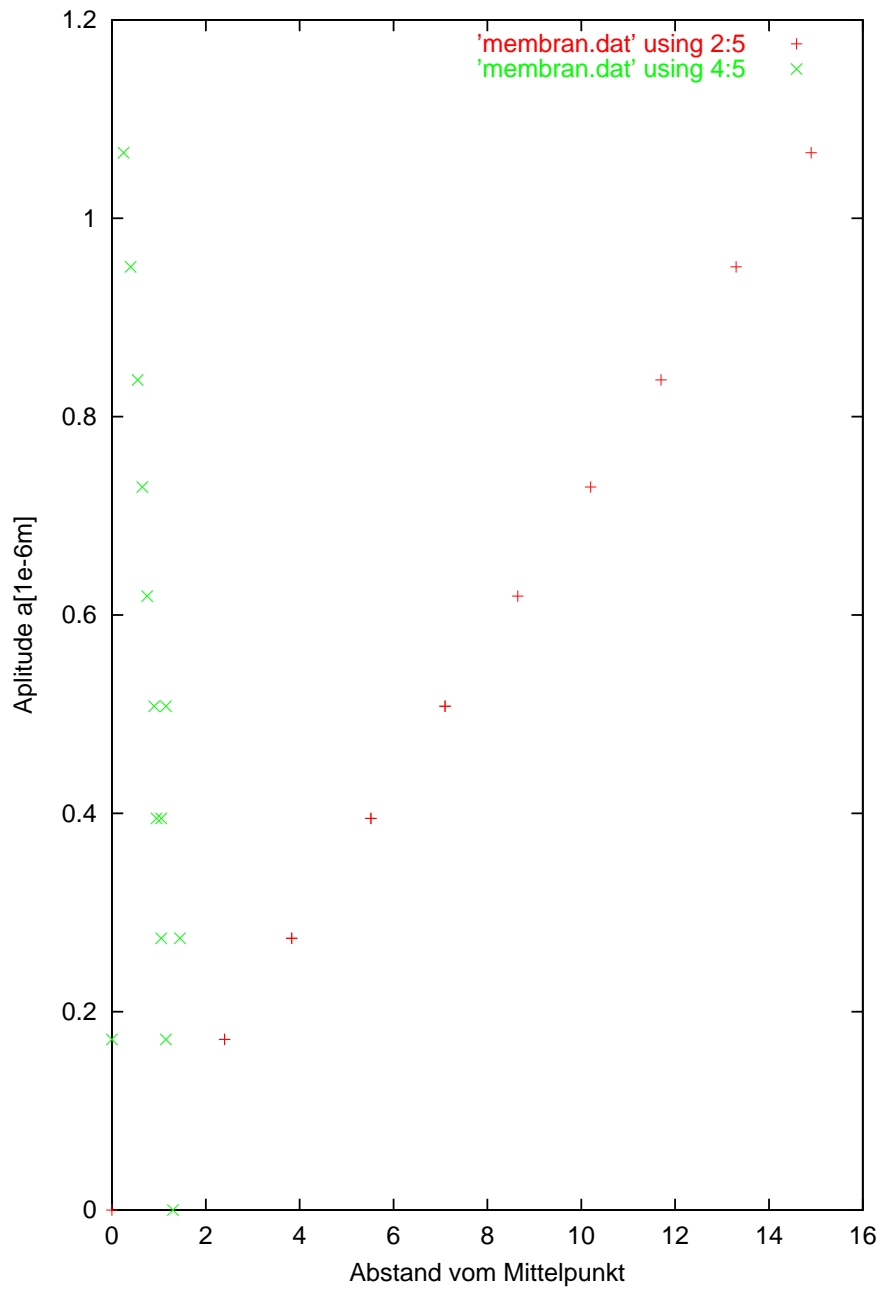


Abbildung 13: Die Amplitude der schwingenden Membran in Abhängigkeit des Orten der Interferenzmaxima

3.4 Brechungsindex eines Gases

Vor dem Füllen des Becherglases sind waagerechte Interferenzstreifen zu erkennen, die sich nach oben biegen, als „Druckluft“ eingefüllt worden ist. Die Zahl der erkennbaren Maxima n gibt, um wieviele Wellenlängenskalen λ der optische Weg d verlängert wird.

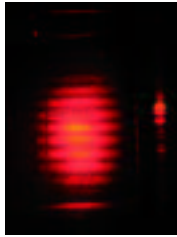


Abbildung 14: Intefferenzmuster des Becherglases im Normalzustand



Abbildung 15: Intefferenzmuster des Becherglases bei Füllung mit „Druckluft“

Die Brechzahl von normaler Luft ist $n_L = 1,0000$, der Weg ist der Durchmesser des Becherglases $d = 7$ cm. Für die Brechzahl n_D der „Druckluft“ ergibt sich

$$n_D = n_L \frac{d}{d - n\lambda} = 1,0000 \frac{7 \text{ cm}}{7 \text{ cm} - 7 \cdot 633 \text{ nm}} = 1.0000006 \quad (3.2)$$

Der Fehler für die Werte umfaßt $\Delta d = 0,5$ cm sowie $\Delta n_D = 0,0001$.

Literatur

- [1] Fortgeschrittenenpraktikum, *Skript zur Holografischen Interferometrie*, TU Berlin, 1989
- [2] Vest, C. M., *Holographic Interferometry*, 1997
- [3] Hariharan, P., *Optical Holography*, Cambridge Press, 1984
- [4] Schumann, Zürcher, Cuhe, *Holography and Deformation Analysis*, Springer-Verlag, 1998