

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	76 (1985)
<b>Heft:</b>	7
<b>Artikel:</b>	Holographie und ihre Anwendung in der Materialprüfung
<b>Autor:</b>	Rytz, H.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-904586">https://doi.org/10.5169/seals-904586</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Holographie und ihre Anwendung in der Materialprüfung

H. Rytz

Nach einer Einführung in das Prinzip der Holographie wird deren Anwendung für die Materialprüfung besprochen. Es werden drei Methoden vorgestellt, mit denen sich berührungslos Deformationen, Verschiebungen oder Dehnungen messen lassen.

Après une introduction au principe de l'holographie l'usage de celle-ci pour l'examen des matériaux est discuté. Trois possibilités d'application sont présentées, permettant de mesurer des déformations, des déplacements ou des ductilités sans toucher l'objet.

## 1. Einleitung

Die Optik gilt als eine der ältesten Disziplinen der Naturwissenschaft. Schon im Altertum hat man sich mit dem Licht und seinen Gesetzmässigkeiten auseinandergesetzt. Die Geschichte der Optik ist geprägt durch das Bestreben des Menschen, weiter zu sehen (Fernrohr) oder mehr Details von einem Gegenstand zu entdecken (Lupe, Mikroskop), als mit dem blosen Auge möglich ist. Es ist darum bezeichnend, dass die Holographie von Gabor 1948 zuerst als eine neue Methode der Mikroskopie vorgestellt wurde [1] und erst später als Möglichkeit zur Aufzeichnung und Wiedergabe von räumlichen Objekten entdeckt wurde [2].

In diesem Artikel wird zuerst kurz das Prinzip der Holographie (vom griechischen *holos*, ganz, vollständig, und *graphein*, aufzeichnen) erläutert, anschliessend wird ein Ausschnitt aus dem grossen Anwendungsbereich, die holographische Interferometrie, vorgestellt.

Unter dem Begriff *Welle* wird im folgenden eine Lichtwelle verstanden, die als Lösung der zeitunabhängigen Wellengleichung beschrieben werden kann. Eine solche Welle besitzt folgende Eigenschaften:

- sie ist monochromatisch, d.h. es ist nur eine Lichtfrequenz zugelassen.
- die Amplitude und die Phase der Welle sind Ortsfunktionen und beschreiben die räumliche Verteilung.

Die Lösung der Wellengleichung hat die Form:

$$U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) e^{i\Phi(\mathbf{r})} \quad (1)$$

wobei  $A(\mathbf{r})$  die reelle Amplitudenverteilung und  $\Phi = k\varrho(\mathbf{r})$  die reelle Phasenverteilung im Raum beschreibt.  $k = 2\pi/\lambda$  ist die Wellenzahl und  $\varrho(\mathbf{r})$  der Quellenabstand. Die Ausbreitungsrichtung der Lichtquelle ist normal zur Phasenfläche, d.h. zu den Orten gleicher Phase. Der Ursprung des Koordinatensystems  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  wird auf der Hologrammplatte angenommen, wobei diese in der  $x, y$ -Ebene liegen soll (Fig. 1).

Eine spezielle Lösung der Wellengleichung stellt die Kugelwelle dar, bei der die Orte gleicher Phasen Kugelflächen sind:

$$U_K = \frac{1}{\varrho} e^{ik\varrho} \quad (2)$$

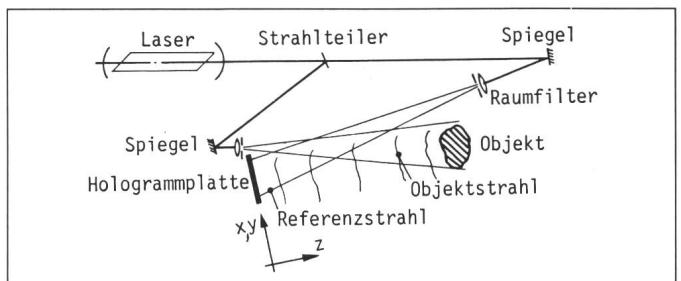
$\varrho$  bezeichnet den Kugelradius

Gemäss dem Prinzip von Huygens können beliebige Wellen, auch solche, die von diffus streuenden Objekten herkommen, als Überlagerung vieler Kugelwellen beschrieben werden.

## 2. Prinzip der Holographie

Unter Holographie versteht man die Aufzeichnung und Rekonstruktion von Objektwellen. Dazu müssen Am-

Fig. 1  
Strahlengang für  
Hologammaufnahme



### Adresse des Autors

Hugo Rytz, dipl. phys. ETH, Arbeitsgemeinschaft für Industrielle Forschung, Institut für angewandte Physik ETH, 8093 Zürich.

plitude und Phase der Objektwelle aufgezeichnet werden. Da die bis heute bekannten Photomaterialien nur den absoluten Betrag der Objektwelle, d.h. deren Intensität festhalten können, geht die Phase und somit die räumliche Information bei der Aufzeichnung normalerweise verloren. In der Holographie wird deshalb die Photoplatte mit der Objektwelle und einer zusätzlichen, dazu kohärenten Referenzwelle beleuchtet (Fig. 1). Aus der Überlagerung der beiden Wellen resultieren auf der Hologrammplatte Interferenzstreifen, die sowohl die Amplituden- als auch die Phaseninformation der Objektwelle enthalten. Wegen der feinen Interferenzstreifen, die durch die Überlagerung entstehen, muss die Photoplatte ein sehr hohes Auflösungsvermögen (bis 3000 Linien pro Millimeter) besitzen, ansonsten werden an das Photomaterial keine besonderen Anforderungen gestellt.

Die Aufzeichnung geschieht durch eine ortsabhängige Schwärzung der Platte. Diese Schwärzung wird quantitativ erfasst durch die Definition

$$D = \log \frac{I_e}{I_a} = \log \left| \frac{U_e}{U_a} \right|^2 \quad (3)$$

wobei  $U_e$ ,  $U_a$  die ein- bzw. ausfallende Wellenamplitude und  $I_e$ ,  $I_a$  die entsprechenden Intensitäten (Leistungswerte) bezeichnen.

Die Schwärzung  $D$  wird verursacht durch eine Belichtungsdosis (Belichtungsdauer  $\tau$  mal Intensität  $I$ ):

$$D = \gamma \log k_D \tau I = \log(k_D \tau I)^\gamma \quad (4)$$

$k_D$  ist eine Konstante.

Für die Hologrammrekonstruktion spielt die Amplitudentransparenz  $T = T(\mathbf{r})$  eine wesentliche Rolle. Sie ist definiert durch:

$$T = U_a / U_e \quad (5)$$

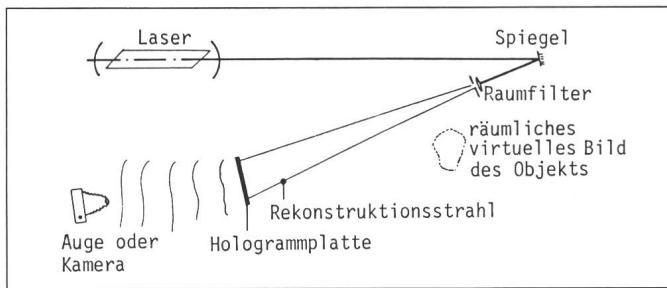
Durch Einsetzen von (3) und (4) in (5) erhält man:

$$T = (k_D \tau I)^{-\gamma/2} \quad (6)$$

Die Intensität  $I$  berechnet sich aus der Überlagerung der Referenzwelle  $U_R$  mit der Objektwelle  $U_O$ , welche beide gemäß (1) komplexe Funktionen der Ortsvariablen  $\mathbf{r}$  sind:

$$I = (U_R + U_O)(U_R + U_O)^* = |U_R + U_O|^2 \quad (7)$$

Fig. 2  
Strahlengang für  
Hologramm-  
rekonstruktion



Dies kann auch geschrieben werden als:

$$I = |U_R|^2 + |U_O|^2 + U_R^* U_O + U_R U_O^* \quad (8)$$

In den beiden ersten Termen von (8) geht die Phasenfunktion verloren; sie bleibt jedoch in den letzten zwei Termen erhalten. Diese Eigenschaft stellt eine Grundvoraussetzung für die Holographie dar.

Zur Berechnung der Amplitudentransparenz kann nun (8) in (6) eingesetzt werden. Um die Rechnung zu vereinfachen, wird angenommen, dass die Referenzwelle  $U_R$  in der Hologrammebene eine konstante und im Vergleich zu  $U_O$  grosse Intensität besitzt.  $I$  kann in einen Gleich- und Wechselterm  $I_R + \Delta I$  aufgeteilt und mit Hilfe der Taylorentwicklung linearisiert werden:

$$T = 2k(I_R + \Delta I)^{-\gamma/2} \approx k(2I_R - \gamma\Delta I) \quad (9)$$

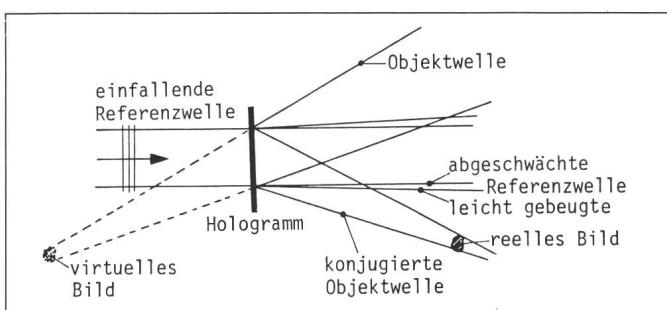
$$\text{mit } k = \frac{1}{2} (K_{DT})^{-\gamma/2} \quad (10)$$

Nach Einsetzen von (8) erhält man:

$$T/k \approx 2|U_R|^2 - \gamma|U_O|^2 - \gamma U_R^* U_O - \gamma U_R U_O^* \quad (11)$$

Wie man sieht, wird wegen der Konstanz von  $U_R$  die Objektwelle  $U_O$  im dritten Term von (11) mitsamt der Phasenlage gespeichert.

Fig. 3  
Die vier  
Ausgangswellen bei der  
Hologramm-  
rekonstruktion



Es wird daran erinnert, dass  $U_R$  konstant und  $U_O$  sowie damit auch  $T$  Funktionen  $U_O(\mathbf{r})$  und  $T(\mathbf{r})$  des Ortsvektors sind.

Wenn man eine Photoplatte, die mit dem obigen Verfahren belichtet wurde, in gewöhnlichem weißem Licht betrachtet, so wird man nur einen grauen Schleier sehen. Um das Objekt betrachten zu können, muss es wiederum mit kohärentem Licht beleuchtet werden. Zur Rekonstruktion der Objektwelle wird in der holographischen Interferometrie normalerweise dieselbe Referenzwelle wie bei der Aufzeichnung verwendet (Fig. 2). Diese Welle, man nennt sie nun Rekonstruktionswelle, wird durch das Hologramm moduliert. Unmittelbar nach dem Durchgang durch die Hologrammplatte berechnet sich die austretende Welle zu:

$$U(\mathbf{r}) = T(\mathbf{r}) \cdot U_R \quad (12)$$

$$= 2|U_R|^2 U_R - \gamma|U_O|^2 U_R - \gamma U_R^* U_O U_R - \gamma U_R U_O^* U_R$$

Die durch Beugung der Referenzwelle erzeugte Bildwelle besteht demnach aus vier Komponenten, von denen eine jede für sich interpretiert werden kann (Fig. 3):

- Der erste Term  $2|U_R|^2 U_R$  (12) sagt, dass ein Teil der einfallenden Rekonstruktionswelle eine konstante Amplitudenabschwächung erfährt und im übrigen die Hologrammplatte unverändert verlässt.

- Der zweite Term  $\gamma|U_0(\mathbf{r})|^2 U_R$  schwächt ebenfalls die Rekonstruktionswelle, führt aber wegen der Ortsabhängigkeit von  $|U_0(\mathbf{r})|^2$  zu einer leichten Beugung von  $U_R$ .
- Der dritte und wichtigste Term

$$\gamma U_R^* U_0(\mathbf{r}) U_R = \gamma |U_R|^2 U_0(\mathbf{r}) \quad (13)$$

besagt, dass ein Teil der eintreffenden Rekonstruktionswelle die ursprüngliche Objektwelle  $U_0(\mathbf{r})$ , lediglich durch einen konstanten Faktor  $\gamma |U_R|^2$  abgeschwächt, zu rekonstruieren vermag. Das Bild, das der Beobachter betrachtet, wird gemäß der optischen Nomenklatur als virtuelles Bild bezeichnet.

- Der vierte Term

$$\gamma U_R U_0^*(\mathbf{r}) U_R = \gamma U_R^2 U_0^*(\mathbf{r}) \quad (14)$$

besagt, dass nebst der Objektwelle gleichzeitig die konjugiert-komplexe Objektwelle miterzeugt wird, d.h. es wird eine neue Welle erzeugt, die vor der Aufzeichnung des Hologramms nicht vorhanden war. Da der Faktor  $\gamma U_R^2$  jedoch die (doppelte) Phase der Referenzwelle enthält, wird sich die Welle in eine andere Richtung als die ursprüngliche Objektwelle ausbreiten. Das Bild, das sie erzeugt, wird als reelles Bild bezeichnet.

Alle vier Terme sind gleichzeitig vorhanden und können sich bei entsprechendem holographischem Aufbau überlagern, so dass die eigentliche Objektwelle nicht störungsfrei beobachtet werden kann. Es ist das Verdienst von E. Leith und J. Upatnieks [2], holographische Verfahren entwickelt zu haben, die eine ausreichende Trennung der rekonstruierten Objektwelle von der rekonstruierenden Referenzwelle garantieren.

Bis hierhin wurden über die Anforderung an die Lichtquelle keine Angaben gemacht, außer dass sie kohärent sein muss. Bei der Lichtwelle muss man zwei Kohärenzkriterien erfüllen:

- die zeitliche Kohärenz, die durch eine monochromatische Lichtwelle, d.h. eine Welle mit einer einzigen Spektrallinie, erfüllt wird,
- und die räumliche Kohärenz, die nur von phasenstarren Lichtwellen erfüllt wird. Es kann leicht gezeigt werden, dass nur räumlich kohärente Lichtwellen miteinander interferieren können, die Interferenzfähig-

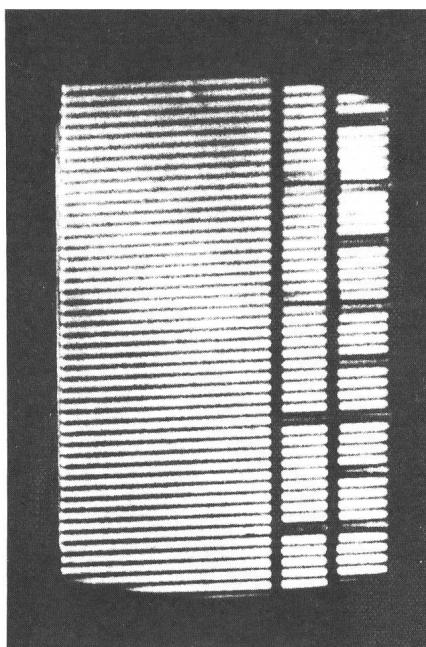


Fig. 4 Holographisches Interferogramm einer ebenen Platte

Interferenzursache: Drehung der Platte

keit ist aber eine unabdingbare Voraussetzung für die Holographie.

Bis jetzt ist der Laser die einzige Lichtquelle, die kohärentes Licht in ausreichender Intensität zur Verfügung stellt. Deshalb werden für die Holographie ausschließlich Laser verwendet, obwohl die Holographie auch mit konventionellen Lichtquellen möglich ist (Gabor hatte schließlich 1948 noch keinen Laser zur Verfügung [1]), sofern sie die obigen Kohärenzbedingungen genügend gut erfüllen.

### 3. Holographische Interferometrie

Die Eigenschaft der Holographie, Objektwellen aufzuzeichnen und zu einem späteren Zeitpunkt wiederzugeben, kann für die Interferometrie ausgenutzt werden. Das Prinzip der holographischen Interferometrie kann am einfachsten an der Doppelbelichtungsholographie gezeigt werden. Wie der Name schon sagt, wird mit einem holographischen Aufbau vom Objekt zu zwei verschiedenen Zeitpunkten eine Aufnahme auf die gleiche Hologrammplatte gemacht. Nach dem Entwickeln der Platte wird diese wieder mit derselben Referenzwelle beleuchtet, die für die Aufnahme verwendet wurde. Es werden nun gleichzeitig zwei Objektwellen rekonstruiert, die, da sie von der gleichen kohärenten Lichtquelle stammen, miteinander interferieren. Hat sich das Objekt zwis-

schen den beiden Belichtungen nicht verändert, so sind auch die beiden rekonstruierten Objektwellen gleich, insbesondere sind die beiden Phasen über dem gesamten rekonstruierten Raum gleich. Hat sich jedoch das Objekt etwas verändert, so sind auch die Phasen der beiden Objektwellen verschieden, die Phasendifferenzen können dann als Interferenzstreifen (Fig. 4) beobachtet werden.

In der Regel möchte man die Verschiebung eines Objektpunktes bestimmen. Bezeichnet man diese mit  $\Delta\mathbf{r}$ , so kann die beobachtete Phasenänderung  $\psi$  aus der Wegdifferenz der Wellen beschrieben werden (Fig. 5):

$$\psi = \mathbf{k}_L (\overline{P'_1 P_1} + \overline{P_1 P'_2}) = -\mathbf{k}_L \Delta\mathbf{r} + \mathbf{k}_0 \Delta\mathbf{r}$$

$$\psi = (\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_L) \Delta\mathbf{r} \quad (15)$$

wobei  $\mathbf{k}_L$  der Wellenvektor ist, der von der Beleuchtungsquelle zum beobachteten Punkt  $P$  führt, sowie  $\mathbf{k}_0$  derjenige vom Punkt  $P$  zum Beobachterstandpunkt. Der Betrag des Wellenvektors ist für beide gleich  $2\pi/\lambda$ . Aus (15) kann im Prinzip die Verschiebung des Objektpunktes bestimmt werden. Die praktische Ausführung wird weiter unten beschrieben.

Grundsätzlich ist die holographische Interferometrie identisch mit der klassischen Interferometrie und bringt keine wesentlich neuen physikalischen Erkenntnisse. Ihre Bedeutung liegt in

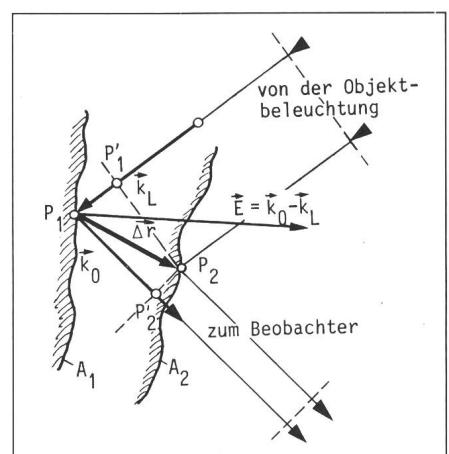


Fig. 5 Strahlengang und Vektoren für die Auswertung von holographischen Interferogrammen

- $A_1$  unverschobene Objektfläche
- $A_2$  verschobene Objektfläche
- Orte gleicher Phase
- $\Delta\mathbf{r}$  Verschiebung eines Objektpunktes
- $k_L$  Wellenvektor der einlaufenden Welle
- $k_0$  Wellenvektor der zum Beobachter laufenden Welle

der Anwendung, können doch dreidimensionale Formdifferenzen von diffus streuenden Objekten gemessen werden, was mit den klassischen Mitteln nicht möglich ist. Die Auswertung der Interferenzstreifen ist allerdings wesentlich schwieriger als bei der klassischen Interferometrie. Form und Lage der Interferenzstreifen hängen ja nicht nur von der Verschiebung der Objektoberfläche, sondern auch von der Aufnahme- und Rekonstruktionsgeometrie ab. Darum werden erhebliche Anstrengungen zur Entwicklung von geeigneten Verfahren unternommen, die mit möglichst wenig Mitteln genaue Daten über die Verschiebung oder Deformation des Objektes ergeben. Im folgenden werden drei Verfahren vorgestellt, die zum klassischen Instrumentarium der holographischen Interferometrie gehören.

## 4. Doppelbelichtungsholographie

### 4.1 Prinzip und Anwendungen

Das oben besprochene Aufnahmeverfahren wird in der Materialprüfung oder bei Entwicklungsaufgaben vielfach eingesetzt. Dank schneller Doppelpulse laser ist es möglich, holographische Messungen auch an Orten durchzuführen, wo nicht so stabile Anordnungen wie in einem Labor möglich sind. Die folgenden zwei Beispiele zeigen, wie die Doppelbelichtungsholographie in der industriellen Entwicklung und bei der Materialprüfung angewendet wird.

1. In der Kraftfahrzeugindustrie werden die Schwingungen der einzelnen *Fahrzeugbauteile*, insbesondere im Bereich des Motors, mittels der Doppelbelichtungsholographie sichtbar gemacht. Bauteile mit grossen Schwingungsamplituden erzeugen bei der Rekonstruktion sehr dichte Interferenzstreifen im dreidimensionalen holographischen Bildraum, stabile Elemente aber nahezu keine. Durch konstruktive Änderungen, deren Art sich ebenfalls aus der Form der Interferenzstreifen herauslesen lässt, können die lärmerzeugenden Schwingungen gedämpft und damit die Laufruhe der Fahrzeuge erhöht werden.

2. Mit Hilfe der Doppelbelichtungsholographie wird die Bindung zwischen Karkasse und Gummibeschichtung bei *Autopneus* geprüft. Dazu wird der Pneu während der Belastungsänderung holographiert. Allfällige Fehlstellen machen sich durch eine anor-

male Häufung von Interferenzstreifen in der Nähe des gefährdeten Punktes bemerkbar.

Die zwei Beispiele zeigen, dass unter Umständen schon eine qualitative z.B. visuelle Analyse der Interferenzstreifen ausreichende Resultate liefert. In vielen Fällen jedoch wird eine quantitative Auswertung der Interferenzstreifen gefordert, d.h. man möchte die Verschiebung von einzelnen Objekt-punkten genau messen. Ein wesentliches Problem dabei ist jedoch, dass sich die dreidimensionalen Interferenzstreifen nicht genügend genau lokalisieren lassen. Aus diesem Grunde wird ein Hologramm aus mindestens drei Richtungen betrachtet und analysiert. Mathematisch bedeutet dies, dass die Gleichung für drei verschiedene Beobachtungsrichtungen  $k_O^i$  aufgestellt werden muss:

$$\psi^i = E^i \Delta r \quad (16)$$

mit  $E^i = k_O^i - k_L$  und  $i \in \{1, 2, 3\}$

Der Vektor  $E^i$  wird als Sensitivitätsvektor bezeichnet und besagt, dass für die Beobachtungsrichtung  $k_O^i$  nur die Verschiebung parallel zum Vektor  $E^i$  gemessen werden kann. Man wird bemüht sein, die  $E^i$  möglichst senkrecht aufeinander zu wählen. Geht man nun davon aus, dass  $\psi^i$  aus den Interferenzstreifen genügend genau bestimmt werden kann, so kann mit Hilfe von (16) der Verschiebevektor  $\Delta r$  berechnet werden.

Die Hauptanstrengungen der Forschungslaboreien bestehen darin, die vielen Möglichkeiten zur Bestimmung der Phasendifferenzen  $\psi^i$  und der Änderungen in der Beobachtungsrichtung zu untersuchen. Die Fragen, die es dabei zu beantworten gilt, sind:

- Wie genau kann der Verschiebevektor  $\Delta r$  bestimmt werden?
- Welche systematischen Fehler werden durch die Auswertemethode eingeführt?
- Welche Verbesserungen sind möglich?

Es würde zu weit führen, an dieser Stelle alle möglichen Auswerteverfahren, die auf der Lösung der Gleichung beruhen, zu beschreiben. Weitergehende Informationen dazu finden sich in [3; 4; 5]. Es soll aber nicht unerwähnt bleiben, dass am Forschungszentrum der BBC Baden eine Methode entwickelt wurde, mit der Verschiebungen von weniger als 100 nm, d.h. einem

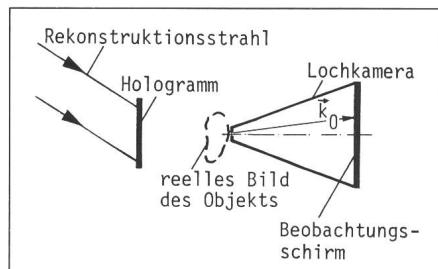


Fig. 6 Auswertung von Doppelbelichtungshologrammen durch Filtern der rekonstruierten Objektwelle mit Lochkamera

Bruchteil der für die Messung verwendeten Lichtwellenlänge, bestimmt werden können [3]. Diese Messgenauigkeit stellt eine Spitzenleistung dar.

### 4.2 Auswertung von Doppelbelichtungshologrammen

Die oben beschriebene Auswertung der Interferenzstreifen setzt voraus, dass die gesamte Objektwelle rekonstruiert wird. Durch Verändern der Beobachtungsrichtung, genauer durch Wahl von drei Sensitivitätsvektoren, kann dann anhand von (16) der Verschiebevektor  $\Delta r$  bestimmt werden. Zur Bestimmung eines Verschiebevektors sind also drei Auswertungen nötig, was oft recht aufwendig sein kann. Wenn man hingegen nur den Teil der Objektwelle rekonstruiert, der dem Objektpunkt entspricht, dessen Verschiebung man bestimmen will, so erhält man völlig andere Interferenzstreifen. Es kann gezeigt werden, dass die Form und die Dichte der Streifen direkt Funktionen des Verschiebevektors sind, der gemessen werden soll [6; 7].

Das Vorgehen zeigt die Figur 6. Wie bereits früher ausgeführt (Fig. 3), kann neben dem virtuellen auch ein reelles Bild erzeugt werden. Mit einer Lochblende wird nun der Teil des reellen Bildes ausgeblendet, dessen Verschiebung gemessen werden soll. Wegen der Verschiebung des Objektpunktes wird dessen Abbildung auf dem Beobachtungsschirm Interferenzstreifen enthalten.

Um diese Interferenzstreifen berechnen zu können, muss zuerst die Lichtverteilung innerhalb des Blendenlochs ( $r = r_B$ ) berechnet werden. Diese setzt sich zusammen aus zwei um  $\psi = k \Delta r$  in der Phase verschobenen Teilfunktionen von praktisch gleicher Amplitude:

$$U(r_B) = U_0(r_B + \Delta r/2) + U_0(r_B - \Delta r/2) \quad (17)$$

Mit Hilfe räumlicher Diracfunktionen  $\delta(\mathbf{r})$  und der Faltungsoperation lässt sich (17) auch schreiben als

$$U(\mathbf{r}_B) = U_O(\mathbf{r}_B) * D(\mathbf{r}_B) \quad (18)$$

mit

$$D(\mathbf{r}_B) = \delta(\mathbf{r}_B + \Delta\mathbf{r}/2) + \delta(\mathbf{r}_B - \Delta\mathbf{r}/2) \quad (19)$$

Die Lichtverteilung auf dem Beobachtungsschirm ( $\mathbf{r} = \mathbf{r}_s$ ) der Lochkamera kann durch das Beugungsintegral, in diesem Fall durch die Fraunhoferbeugung, beschrieben werden. Die Fraunhoferbeugung ist aber im wesentlichen eine zweidimensionale Fouriertransformation der Feldverteilung (18) in der Lochblende. Der Faltungsoperation ist im Bildbereich deshalb die Multiplikation zugeordnet.

$$U(\mathbf{r}_s) \approx \mathcal{F}[U(\mathbf{r}_B)] = \mathcal{F}[U_O(\mathbf{r}_B)] \cdot \mathcal{F}[D(\mathbf{r}_B)] \quad (20)$$

Für die Bestimmung der Verschiebung ist nur die Fouriertransformierte von  $D(\mathbf{r}_B)$  interessant. Wie sich leicht zeigen lässt, gilt für diese

$$\mathcal{F}[D(\mathbf{r}_B)] = 2 \cos(k_0 \Delta \mathbf{r}/2) \quad (21)$$

Diese Funktion moduliert die Objektfunktion. Sie lässt sich wegen ihrer periodischen Struktur leicht erkennen und auswerten. Eine einfache Analyse des Cosinusarguments zeigt, dass die Gleichung (21) Kegelschnitte 2. Ordnung auf dem Beobachtungsschirm beschreibt [8], deren Parameter Funktionen des Verschiebevektors sind.

Die Bestimmung der Verschiebevektoren von frei wählbaren Objektpunkten beschränkt sich deshalb auf die Bestimmung der Kegelschnittparameter, ein Vorgang, der durch einen Computer recht schnell und präzis durchgeführt werden kann. Dass aber schon eine rein visuelle Betrachtung der Interferenzstreifen qualitative Aussagen über die Verschiebung des Objektpunktes zulassen, zeigen die drei Beispiele der Figur 7.

## 5. Echtzeitholographie

Mit der Doppelbelichtungsholographie können nur zwei Wellenfronten pro Aufnahme miteinander verglichen werden. Oft ist aber der zeitliche Verlauf der Wellendeformation sowie de-

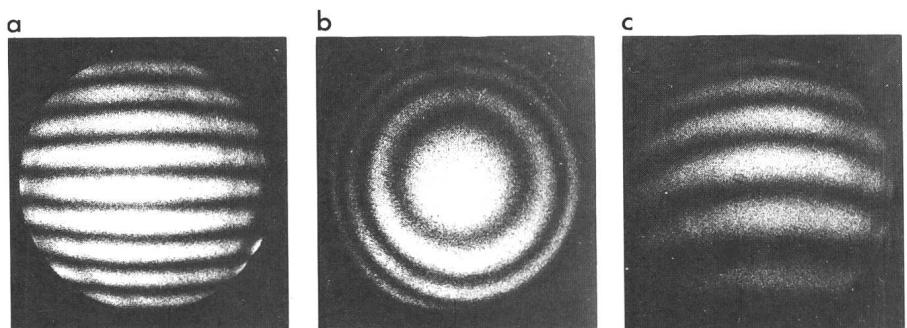


Fig. 7 Interferogramme von Doppelbelichtungshologrammen

Auswertung mit Lochkamera

- a Verschiebung parallel zur Hologrammplatte um 10 µm
- b Verschiebung senkrecht zur Hologrammplatte um 100 µm
- c Verschiebung parallel um 10 µm und senkrecht um 20 µm zur Hologrammplatte

ren Größenordnung unbekannt, so dass die Belichtungszeitpunkte für die Doppelbelichtungen meistens nicht optimal gewählt werden können. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, kennt man unter dem Begriff *Echtzeitholographie* ein Verfahren, mit dem man unmittelbar beim Entstehen von Deformationen die Interferenzstreifen beobachten und auswerten kann.

Anstelle der zwei Belichtungen wird das Objekt nur einmal holographisch aufgezeichnet. Die entwickelte Hologrammplatte wird dann an die genau gleiche Position im unveränderten holographischen Aufbau wieder eingesetzt. Die Referenzwelle wirkt nun als Rekonstruktionswelle und rekonstruiert die Objektwelle, wie sie bei der Aufnahme vorlag. Diese rekonstruierte Welle kann nun mit der vom realen Objekt abgestrahlten Welle interferieren, d.h. die beiden Wellen werden zu jedem Zeitpunkt miteinander verglichen. Allfällige Änderungen der realen Objektwelle werden sofort (in Echtzeit) durch auftretende Interferenzstreifen sichtbar. Dieses Verfahren ist äußerst empfindlich auf die genaue Repositionierung der Hologrammplatte (auf Bruchteile von Wellenlängen), sowie auf die Stabilität des holographischen Aufbaus. Deshalb können solche Experimente in der Regel nur in dafür ausgerüsteten Labors durchgeführt werden.

Ein bekanntes Anwendungsgebiet der Echtzeitholographie ist die Analyse von Schwingungsmoden von Platten irgendwelcher Geometrie. Zur Analyse wird die Platte in Ruhelage holographiert. Anschließend wird sie mit geeigneten Mitteln angeregt. Die entstehenden Schwingungen können nun beobachtet werden. Da die rekonstruierte Objektwelle die Platte in Ruhelage darstellt, können durch Fre-

quenzwobbeln alle Resonanzfrequenzen sowie deren Schwingungsmoden analysiert werden (Fig. 8).

## 6. Zeitmittelholographie

Die Zeitmittelholographie stellt einen Spezialfall der holographischen Interferometrie dar und kann nur zur Bestimmung der Deformationen von periodisch schwingenden Körpern eingesetzt werden. Trotz dieser Einschränkung wird dieses Verfahren der oben erwähnten Echtzeitholographie vorgezogen, da an den Aufbau keine extremen Stabilitätsanforderungen gestellt werden müssen.

Bei der Aufnahme der Hologramme wird immer vorausgesetzt, dass sich weder die Referenz- noch die Objektwelle während der Belichtungszeit verändern. Für schwingende Objekte kann diese Bedingung jedoch nicht erfüllt werden. Man kann aber zeigen, dass, wenn der zeitliche Schwingungsverlauf durch eine Cosinusfunktion beschrieben werden kann, das Objekt sich trotzdem holographisch aufzeich-

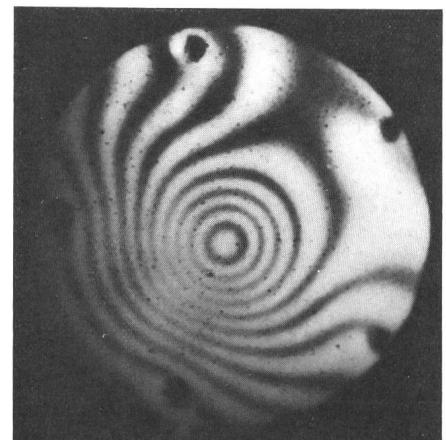


Fig. 8 Interferogramm einer schwingenden Membrane in Echtzeitholographie

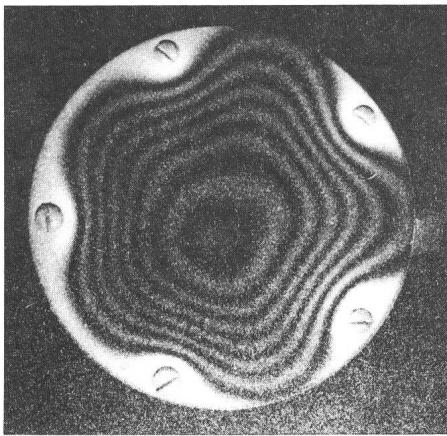


Fig. 9 Interferogramm einer schwingenden Membrane in Zeitmittelholographie

nen lässt. Nur wird man bei der Rekonstruktion des Hologramms Interferenzstreifen auf dem Objekt beobachten, die anderen physikalischen Gesetzmässigkeiten als die durch (15) beschriebenen folgen. Dies kann durch Vergleich von Figuren 8 und 9 deutlich beobachtet werden. Im allgemeinen wird die Zeitmittelholographie nur für qualitative Untersuchungen von Schwingungsverhalten angewendet.

#### Literatur

- [1] D. Gabor: A new microscopic principle. *Nature (London)* 161(1948)4098, p. 777...778.
- [2] E.N. Leith and J. Upatnieks: Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects. *Journal of the Optical Society of America* 54(1964)11, p. 1295...1301.
- [3] B. Ineichen, R. Daendliker and J. Mastner: Accuracy and reproducibility of heterodyne holographic interferometry. Proceedings of the International Conference on Applications of Holography and Optical Data Processing, Jerusalem, August 23...26, 1976; p. 207...212.
- [4] V. Fossati Bellani and A. Sona: Measurement of three-dimensional displacements by scanning a double-exposure hologram. *Applied Optics* 13(1964)6, p. 1337...1341.
- [5] E. Müller, V. Hrdlicka and D. E. Cuche: Computer-based evaluation of holographic interferograms. In: W. F. Fagan: Industrial application of laser technology. Proceedings of SPIE (The International Society of Optical Engineering) 398(1983), p. 46...52.
- [6] P.M. Boone and L.C. De Backer: Determination of three orthogonal displacement components from one double-exposure hologram. *Optik* 37(1973)1, p. 61...81.
- [7] H. Rytz: Messapparatur zur holographischen Deformationsmessung. *GFF-Mitteilungen* 40(1984)Juni, S. 31...35.
- [8] H. Rytz: Holographic measurement of three-dimensional displacement by means of a holographic plate. In: W. F. Fagan: Industrial applications of laser technology. Proceedings of SPIE (The International Society of Optical Engineering) 398(1983), p. 53...58.