

# Optik

Sonderabdruck 35. Band (1972) Seite 223-236

WISSENSCHAFTLICHE VERLAGSGESELLSCHAFT MBH STUTTGART

---

## **Ein holographisches Realzeit-Interferometer zur Messung von Phasenänderungen transparenter Objekte\***

Von *H. Becker* und *U. Grigull*

Institut A für Thermodynamik, Technische Universität München

Eingegangen am 26. November 1971

### **Inhalt**

Die holographische Interferometrie ist besonders gut geeignet, um optische Weglängendifferenzen in transparenten Objekten zu messen. Es wird ein sogenanntes Realzeit-(real-time-)Interferometer beschrieben und diskutiert, das sich durch sehr gute Langzeitstabilität und die Möglichkeit, hohe Interferenzstreifendichten aufzulösen, auszeichnet. Ausführlich wird auf die verschiedenen Möglichkeiten eingegangen, ein Interferenzstreifensystem vorzugeben und die dabei meist auftretende Verschiebung des Objektbildes zu vermeiden. Die einzelnen Fehlerquellen werden angegeben und untersucht. Für die genaue Rejustierung der Hologramme wurde ein einfaches Verfahren gefunden. Schließlich wurden Interferogramme einer schlierigen Glasplatte sowohl mit dem holographischen Interferometer als auch mit einem Mach-Zehnder-Interferometer aufgenommen und miteinander verglichen. Es ergaben sich keine meßbaren Unterschiede.

### **Abstract**

**A Holographic Real-Time-Interferometer for Measuring Phasechanges in Transparent Objects.** The holographic interferometry is particularly well suited for measurements of optical path differences in transparent objects. A real-time-interferometer, characterised by a very good long-term stability and permitting a good resolution of high interference-fringe-density, is described. In detail, various possibilities are discussed to yield a system of interference fringes and to avoid the usual shift of the image of the object. The various deficiencies are indicated and investigated. A simple procedure was found for exactly re-adjusting the holograms. Interferograms were obtained from a Schlieren-inhabited glass plate, both with a holographic interferometer and a Mach-Zehnder-interferometer. Comparison showed now measurable differences.

### **Allgemeines**

Seit langem bedient man sich zur Ausmessung von zweidimensionalen Druck-, Temperatur- und Konzentrationsfeldern in transparenten Medien

---

\* Diese Arbeit ist ein Teilergebnis eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsvorhabens. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft wird an dieser Stelle für ihre finanzielle Unterstützung gedankt.

interferometrischer Methoden. Die klassischen Interferometer verlangen alle einen großen Justieraufwand, da die optischen Weglängen der beiden Teilbündel bis auf Lichtwellenlängen genau gleich sein müssen. Außerdem erfordern sie optische Elemente von höchster Qualität und meist auch einen erschütterungsfreien Aufbau.

Durch die Einführung des Lasers als Lichtquelle wurden die Anforderungen an die Justiergenauigkeit bereits sehr reduziert; bei Verwendung der Holographie [1], [2] für interferometrische Zwecke kommt man nicht nur mit optischen Elementen normaler Güte aus, sondern es werden der Interferometrie prinzipiell neue Möglichkeiten eröffnet:

Die holographische Interferometrie mißt die Veränderungen eines Objekts gegenüber einem Referenzzustand, dessen Wellenfront im Hologramm gespeichert ist. Handelt es sich um zwei stationäre Zustände, so ist das sogenannte Doppelbelichtungsverfahren [3], [4] die geeignetste Methode. Man belichtet eine photographische Platte zwei-, unter Umständen auch mehrfach, so daß sie mehrere Hologramme enthält. Bei der Rekonstruktion überlagern sich die rekonstruierten Wellenfronten und ergeben ein Interferogramm, dessen Interferenzstreifen durch die Änderung der Objektwellenfronten zwischen den Aufnahmen verursacht werden.

Selbstverständlich würden auch Änderungen der Referenzwellenfront und Änderungen im optischen Aufbau zwischen den beiden Aufnahmen Interferenzstreifen verursachen. Man muß daher für Stabilität während der Zeit zwischen den Aufnahmen, die oft sehr kurz sein kann, sorgen.

Sollen die Veränderungen des Objekts gegenüber dem Referenzzustand kontinuierlich gemessen werden, muß man auf die direkte Beobachtung durch das entwickelte Hologramm des Vergleichszustandes hindurch übergehen, auf das sogenannte real-time-Verfahren [5], [6], [7]. Dieses Verfahren arbeitet folgendermaßen: Von dem Objekt wird ein Hologramm aufgenommen und entwickelt. Falls das Hologramm exakt die gleiche Lage wie bei der Belichtung einnimmt, wird durch die Rekonstruktion eine Wellenfront erzeugt, die mit der des ungestörten Objektes identisch ist. Diese rekonstruierte Wellenfront überlagert sich der tatsächlich vom Objekt kommenden Wellenfront und es ergibt sich somit wieder ein Interferogramm, in dem sich alle Änderungen des Objektes repräsentieren. Auch hier ist wieder die Konstanz aller anderen Elemente seit der Aufnahme des Hologramms vorausgesetzt.

Das Verfahren der direkten Beobachtung ist im Prinzip der Interferometrie nach Mach-Zehnder sehr ähnlich. Bei dieser wird die Wellenfront des Objekts mit einer ebenen oder höchstens sphärischen Referenzwelle verglichen. Denkbar wäre auch noch eine zylindrische Strahlgeometrie. Bei dem holographischen Interferometer dient, wie gesagt, die Wellenfront eines beliebigen Objektzustandes als Vergleichswelle. Es ist daher in der Anwendung universeller und billiger. Daß sich mit dieser Methode auch nichttransparente und nichtspiegelnde Objekte interferometrisch untersuchen lassen, ist ein weiterer Vorteil. Bei transparenten Objekten kommt man mit Küvettengläsern normaler Güte aus, da ja nicht mit einer ebenen Wellenfront verglichen werden muß, sondern nur die Änderungen gegenüber dem Vergleichszustand registriert werden. Aus dem gleichen Grund ist es auch möglich, Untersuchun-

gen bei Unter- oder Überdruck in der Küvette durchzuführen, was bei einem konventionellen Interferometer wegen der Durchwölbung der Küvettenfenster bereits zu einem unerwünschten Interferenzringssystem führt, falls nicht im Referenzstrahlengang eine genau gleiche Kompensationsküvette aufgestellt wird.

### Das holographische Real-time-Interferometer

Für geplante optische Untersuchungen unter hohen Drücken wurde von uns ein holographisches Interferometer gebaut, das nach dem real-time-Verfahren arbeitet. Um die notwendige mechanische und thermische Stabilität und eine ausreichende Erschütterungsfreiheit zu erreichen, wurden sämtliche optischen Elemente auf einer  $2 \times 1$  m großen und 25 cm starken Granitplatte (z. B. *Kiemle* [8]) montiert. Diese Platte ist auf vier Gummipuffern in den Knotenpunkten ihrer Grundbiegeschwingungen gelagert. Die Puffer wurden so gewählt, daß das System Platte-Gummipuffer in vertikaler Richtung eine Resonanzfrequenz von etwa 7 Hz, in horizontaler von etwa 2 Hz hat.

Der optische Grundaufbau selbst ist in Abb. 1 skizziert: Das vom He-Ne-Laser (8 mW Strahlleistung) kommende Lichtbündel wird durch den halbdurchlässigen Spiegel TS in den Meßstrahl M und den Referenz- bzw. Rekonstruktionsstrahl R aufgeteilt und durch die mit je einer Mikroblende versehenen Mikroskopobjektive MO sind in Strahlrichtung fein verschiebbar und um zwei Achsen senkrecht zur Strahlrichtung drehbar, so daß der Brennfleck leicht auf das Loch der Mikroblende justiert werden kann. Die Mikroblende selbst kann in ihrer Ebene verschoben werden. Durch die Spiegel Sp2 und Sp3 werden die Weglängen der beiden Strahlengänge einander angeglichen. Die Linsen L parallelisieren

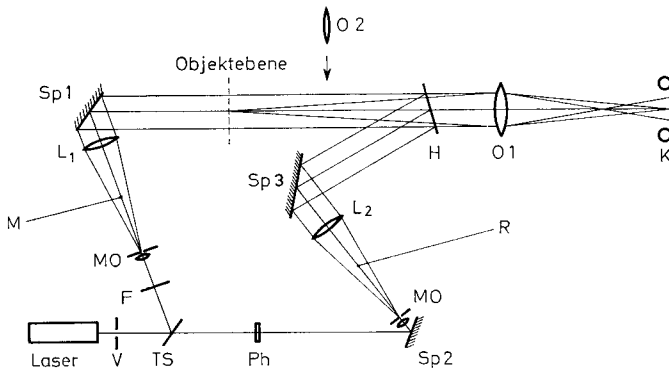


Abb. 1. Schema des holographischen Interferometers. V: Verschuß; TS: Teilerspiegel; Ph: Phasenschieber; F: Filter; Sp: Spiegel; MO: Mikroskopobjektiv mit Mikroblende; L: Linse; O: Objektiv; H: Hologramm; K: Kameragehäuse; M: Meßstrahlengang; R: Referenz- bzw. Rekonstruktionsstrahlengang.

das von den Mikroblenden kommende divergente Lichtbündel. Der Winkel unter dem sich die beiden Teilstrahlen in der Hologrammebene schneiden, soll zwischen  $20^\circ$  und  $60^\circ$  liegen. Dies dürften optimale Werte sein. Bei einem kleineren Winkel nimmt zwar der Hologrammwirkungsgrad (Intensität des rekonstruierten Strahles durch Intensität des rekonstruierenden Strahles) noch etwas zu, doch auch die Intensität des Streuuntergrundes (Agfa-Gevaert, Technische Information); ferner werden die Dimensionen der Apparatur unverhältnismäßig groß. Macht man den Winkel wesentlich größer, nimmt der Hologrammwirkungsgrad stark ab. Außerdem muß man beachten, daß das Hologramm nach dem Entwickeln um so genauer rejustiert werden muß, je größer der Winkel zwischen Meß- und Rekonstruktionsstrahl ist (vergl. unten).

Die Hologrammnormale fällt mit der Winkelhalbierenden zwischen Meß- und Rekonstruktionsstrahl zusammen. Dadurch wird vermieden, daß durch das Schwinden der Gelatineschicht beim Entwicklungsprozeß die Intensität der Rekonstruktion beeinträchtigt wird [9]: Die Interferenzflächen stehen senkrecht in der Gelatineschicht und daher wird ihre Richtung durch das Schwinden der Schicht nicht verändert.

Da der Rekonstruktions-Wirkungsgrad für die verwendeten Amplitudenhologramme nur einige Prozent beträgt, ist es in manchen Fällen günstig, durch das Filter **F** die Intensität des Meßstrahls der des rekonstruierten Vergleichsstrahls anzupassen und somit den Kontrast der Interferenzstreifen zu erhöhen. Als sehr zweckmäßig erwies sich der Phasenschieber **Ph**, der aus einer Glasplatte besteht, die um eine Achse in ihrer Ebene senkrecht zur Strahlrichtung gedreht werden kann. Durch diesen Phasenschieber ist der Phasenunterschied zwischen Meß- und rekonstruiertem Vergleichsstrahl beliebig wählbar.

Das Objektiv  $O_1$  schließlich bildet eine bestimmte Ebene des Objektes auf den Film ab. Zum Schutz gegen Störungen durch Luftturbulenzen wurde die ganze Anlage mit einem Konvektionsschutz umgeben.

Bewußt wurde auf das Einfügen einer Streuscheibe in den Meßstrahlengang vor oder hinter dem Objekt verzichtet. Sie böte den Vorteil, daß die Information über einen bestimmten Objektpunkt auf einen größeren Bereich des Hologramms verteilt würde und daher die Rekonstruktion nicht so empfindlich gegen Beschädigungen des Hologrammes und Fehler der photographischen Schicht wäre. Außerdem ermöglicht eine Streuscheibe vor dem Objekt, dieses mit verschiedenen Durchstrahlungsrichtungen zu untersuchen, was aber mehr bei dem Doppelbelichtungsverfahren interessieren dürfte, da bei instationären Vorgängen, für die unser real-time-Interferometer besonders geeignet ist, meist sowieso nur in einer Richtung beobachtet wird.

Der große Nachteil einer Streuscheibe vor dem Objekt ist der, daß das Interferogramm dann stets einen Mittelwert über einen gewissen Raumwinkelbereich, dessen Größe von der Kamera-Apertur abhängt, wiedergibt. Dadurch wird die Auswertung des Interferogrammes, bei der man im allgemeinen eine ganz bestimmte Durchstrahlungsgeometrie annimmt, erschwert, in manchen Fällen sogar unmöglich gemacht. Außerdem sind in diesem Fall

die Interferenzstreifen selten auf dem Objekt lokalisiert. Falls die Streuscheibe hinter dem Objekt steht, treten diese Nachteile nicht auf, dafür ist man in der Wahl der auf den Film abzubildenden Ebene auf die Ebene der Streuscheibe festgelegt. Die Fokussierebene sollte aber bekanntlich schon dann im Objekt liegen, wenn dieses nur mittlere Brechzahlgradienten aufweist [10].

In jedem Fall erzeugt die Streuscheibe auf den Interferogrammen eine gewisse Granulation und schränkt dadurch die maximal auflösbare Streifen-dichte ein [11].

### Erzeugung von Interferenzstreifen

Bei manchen zu untersuchenden Objekten ist die Richtung der Brechzahlgradienten nicht im voraus bekannt. Beim Mach-Zehnder-Interferometer z. B. gibt man in diesem Fall ein Interferenzstreifensystem vor und bestimmt mit der Richtung und der Größe der Verschiebung der einzelnen Interferenzstreifen die Richtung und die Größe der lokalen Brechzahlgradienten des Objekts. Mit unserem holographischen Interferometer läßt sich ohne weitere optische Hilfsmittel ein System paralleler Interferenzstreifen prinzipiell auf dreierlei Weise erzeugen: Durch Drehen des Spiegels Sp3, des Spiegels Sp1 (Abb. 1) oder des Hologrammes selbst. Das Drehen des Spiegels Sp3 ist häufig der günstigste Weg. Voraussetzung für das Entstehen streng paralleler Interferenzstreifen ist, daß nicht nur der Meßstrahl, sondern auch der Referenzstrahl ein paralleles Lichtbündel ist, also eine Anordnung wie in Abb. 1. Der Referenzstrahl muß parallel sein, damit auch die rekonstruierte Wellenfront wieder ein exakt paralleles Bündel ergibt.

Dies läßt sich leicht an Hand der üblichen Betrachtung (z. B. [12]) der Lichtwelle in der Ebene des Hologrammes zeigen. Es sei ein Koordinatensystem nach Abb. 2 vereinbart: Das Hologramm liege in der z-y Ebene.

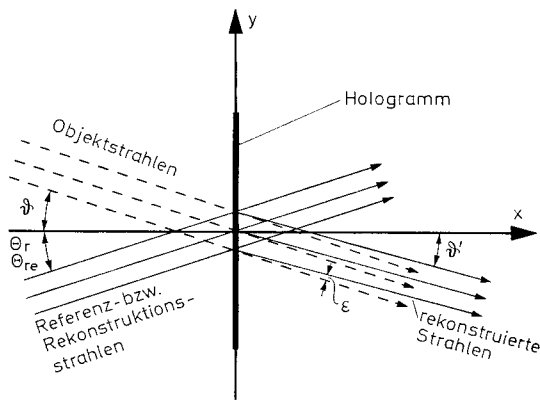


Abb. 2. Lage des Hologrammes und der Lichtbündel im Koordinatensystem.

Alle Strahlenbündel seien jeweils in sich und zur x-y Ebene parallel. Die durchgezogen gezeichneten Strahlen des Referenz- bzw. Rekonstruktionsstrahlenganges schließen mit der x-Achse den Winkel  $\Theta_r$  bzw.  $\Theta_{re}$  ein, die gestrichelten Objektstrahlen den Winkel  $\vartheta$  und die rekonstruierten Strahlen den Winkel  $\vartheta'$ . Diese Annahmen stellen keine Einschränkung der Allgemeinheit dar, da diese Überlegungen der Betrachtung der vektoriellen Komponenten entsprechen. Die vom Objekt kommende Welle  $u_0$  werde beschrieben durch  $u_0 = A \exp(i\varphi_0)$ , die Referenzwelle durch  $u_r = B \exp(i\varphi_r)$ . A und B sind die jeweiligen Amplituden und  $\varphi_{(y,z)}$  die Phasen der jeweiligen Wellenfronten in der Ebene des Hologrammes. Die zeitabhängigen Faktoren sind weggelassen. Die Transmission T der photographischen Schicht nach der Entwicklung sei der Intensität der Strahlung proportional:

$$T \sim (u_0 + u_r) (u_0 + u_r)^* \quad (1)$$

$(u_0 + u_r)^*$  ist die zu  $(u_0 + u_r)$  konjugiert komplexe Welle. Damit wird also:

$$T \sim A^2 + B^2 + AB \exp [i(\varphi_0 - \varphi_r)] + AB \exp [-i(\varphi_0 - \varphi_r)] \quad (2)$$

Bei der Rekonstruktion werden das Hologramm mit der Welle  $u_{re} = C \exp(i\varphi_{re})$  beleuchtet, wobei C die Amplitude und  $\varphi_{re}$  die Phase der zur Rekonstruktion dienenden Wellenfront bedeuten. Damit verlassen folgende Wellen das Hologramm:

$$u_{re} \cdot T \sim (A^2 + B^2) C \exp(i\varphi_{re}) + ABC \exp [i(\varphi_0 - \varphi_r + \varphi_{re})] + ABC \exp [-i(\varphi_0 - \varphi_r - \varphi_{re})]. \quad (3)$$

Der erste Term ergibt die ungebeugt durch das Hologramm gehende Rekonstruktionswelle, der zweite Term die eigentliche rekonstruierte Welle, deren Phase für  $\varphi_r = \varphi_{re}$  mit der der Welle  $u_0$  identisch ist, der dritte Term die konjugierte Welle.

Abgesehen von einem konstanten additiven Term ist

$$(\varphi_{re} - \varphi_r) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot y \cdot (\sin \Theta_{re} - \sin \Theta_r) \quad (4)$$

Da sich bei einem parallelen Strahlenbündel der Winkel  $\Theta$  über den ganzen Strahlenquerschnitt nicht ändert, wird bei der rekonstruierten Welle zur Phase  $\varphi_0$  ein zu y proportionaler Betrag addiert, falls  $\Theta_{re} \neq \Theta_r$ , d. h. die rekonstruierte Welle schließt mit der ursprünglichen Welle  $u_0$  einen konstanten Winkel  $\varepsilon = \vartheta' - \vartheta$  ein, da sich eine elektromagnetische Welle senkrecht zu den Flächen konstanter Phase ausbreitet. Der Winkel  $\vartheta'$  läßt sich aus der Beziehung:

$$\sin \vartheta' = \sin \vartheta + \sin \Theta_r - \sin \Theta_{re} \quad (5)$$

berechnen.

Nimmt man für den Referenz- und den Rekonstruktionsstrahlengang ein divergentes Bündel, so ist weder  $\varphi_r$  noch  $\varphi_{re}$  noch  $(\varphi_{re} - \varphi_r)$  direkt propor-

tional zu  $y$ , d. h. die rekonstruierte Welle ist nicht mehr exakt eben und der Winkel, unter dem sie das Hologramm verläßt, ist über die Fläche des Hologrammes nicht konstant.

Die zweite Möglichkeit, ein System paralleler Interferenzstreifen zu erzeugen, besteht darin, das Hologramm um eine beliebige Achse zu drehen. Auch in diesem Fall sollen alle Strahlenbündel in sich parallel sein, da die obigen Betrachtungen ganz analog gelten, man muß nur berücksichtigen, daß das Koordinatensystem an das Hologramm gebunden ist. Dreht man das Hologramm z. B. um die  $z$ -Achse um den Winkel  $\alpha$ , so ändert sich  $\Theta_{re}$  um den gleichen Betrag, nicht aber  $\vartheta$  und  $\Theta_r$ , da diese Winkel durch die Aufnahme bereits festgelegt sind. Wäre der Sinus eine lineare Funktion, so ergäbe sich wie man aus Gl. (5) unter Berücksichtigung der Hologrammdrehung leicht sieht, keine Winkeldifferenz zwischen den rekonstruierten Strahlen und dem Objektbündel und somit auch keine Interferenzstreifen. Je größer jedoch die Winkel  $\Theta$  und  $\vartheta$  sind, um so stärker weicht die Sinusfunktion von der Linearität ab und um so mehr Streifen entsprechen einer bestimmten Drehung des Hologrammes. Auch durch Drehungen um die  $x$ -Achse werden um so mehr Streifen erzeugt, je größer  $\Theta$  und  $\vartheta$  sind.

Dieser Effekt ist auch die Erklärung dafür, daß das Hologramm nach dem Entwickeln um so genauer rejustiert werden muß, je größer der Winkel zwischen Objekt und Referenzbündel ist.

Die beiden beschriebenen Wege der Streifenvorgabe haben auch die gleichen Nachteile: das rekonstruierte Bild eines Objektes ist gegenüber dem Objekt verschoben, und zwar um  $\varepsilon \cdot l$ , wobei  $l$  der Abstand des Objektpunktes vom Hologramm ist und  $\varepsilon$  der Winkel zwischen den rekonstruierten Strahlen und den Objektstrahlen.

Bei der dritten Möglichkeit, parallele Interferenzstreifen vorzugeben – durch Drehen des Spiegels  $Sp_1$  – fallen naturgemäß das rekonstruierte Bild und das Objekt zusammen, da Referenz- und Rekonstruktionsstrahl identisch sind und daher für alle Hologrammpunkte  $\Theta_{re} = \Theta_r$  ist. In diesem Fall kann der Referenzstrahl auch divergent sein, d. h. man kann auf die Linse  $L_2$  der Abb. 1 verzichten und das Mikroskopobjektiv auch zwischen den Spiegel  $Sp_3$  und das Hologramm stellen.

Doch auch bei dieser Art der Streifenerzeugung tritt ein Bild der Objektkontur auf, das stören kann. Es wird durch den Meßstrahl selbst erzeugt: Bei der Aufnahme des Hologrammes interferiert nicht nur das parallele Bündel des Meßstrahlenganges mit dem Referenzstrahlengang, sondern von den Konturen des Objektes geht eine Beugungswelle aus, deren Interferenz mit dem ungebogenen Meßstrahl in der Ebene des Hologrammes ein Fresnel'sches Beugungsbild ergibt. Dieses Beugungsbild ist mit einem nach der Gabor'schen „on-axis-method“ erzeugten Hologramm vollständig identisch. Die Beleuchtung mit dem Meßstrahl rekonstruiert ein Bild der Objektkontur, das allerdings ein photographisches Negativ des Objektes ist. Die obigen Betrachtungen über die Änderung der Einfallsrichtung des Rekonstruktionsstrahles gelten hier ganz genauso und eine Drehung des Spiegels  $Sp_1$  bewirkt daher eine Verschiebung des rekonstruierten Bildes gegenüber dem

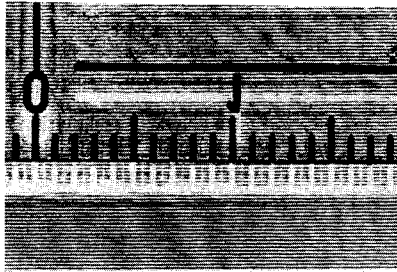


Abb. 3. Interferenzstreifenfeld und Bildverschiebung, entstanden durch Drehen des Spiegels Sp1. Objekt: ein Plexiglasmaßstab.

Objekt. Abb. 3 zeigt ein durch Drehen des Spiegels Sp1 entstandenes Streifenfeld, auf dem das verschobene Objektbild deutlich zu erkennen ist. Als Objekt diente ein Plexiglasmaßstab.

Eine weitere Schwierigkeit, die sich bei dem 3. Weg der Streifenzeugung ergibt, ist folgende: Normalerweise will man bei der Messung das Objekt in einer ganz bestimmten Richtung durchstrahlen; meistens soll die Eintrittsrichtung der Strahlen parallel zu bestimmten Objektflächen sein. Drehen des Spiegels Sp1 ändert diese Richtung und ein Nachjustieren des Objekts ist nicht möglich, da dann wieder das rekonstruierte Bild und das Objekt nicht zusammenfallen.

Umgehen läßt sich diese Schwierigkeit, indem man den Spiegel Sp1 vor der Aufnahme des Hologramms, dem gewünschten Streifenfeld entsprechend verdreht, das Hologramm aufnimmt und dann den Spiegel wieder so rejustiert, daß das Licht in der erforderlichen Richtung auf das Modell fällt. Durch dieses Vorgehen erhält man sozusagen ein Interferometer mit fest eingepprägtem Streifenfeld. Nimmt man mehrere Hologramme mit jeweils verschiedener Spiegelstellung auf, so läßt sich durch das Einsetzen des entsprechenden Hologramms in das Interferometer auch das Streifenfeld dem zu erwartenden Brechzahlgradienten optimal anpassen.

### Nachteilige Wirkungen der Bildverschiebung

Durch die mit einer Streifenvorgabe verbundene Bildverschiebung können sich die Bildkonturen den erwünschten Interferenzstreifen überlagern (vergl. Abb. 3) oder bei nichttransparenten Objektträgern sogar deren Entstehen verhindern. Bei vielen Anwendungsfällen kann man den Spiegel jedoch so drehen, daß die Bilder in Bereiche verschoben werden, in denen sowieso nicht gemessen werden soll. Bei Abb. 3 z. B. ließe sich ein Streifenfeld gleicher Richtung und gleicher Dichte durch Verschieben des Bildes nach „oben“ erreichen, so daß der Bereich unter dem Maßstab ungestört bliebe.

Vor allem bei Streifenvorgabe durch Drehen des Spiegels Sp3 und des Hologramms ergibt sich aus der Bildverschiebung folgende Komplikation: Da das rekonstruierte Bild gegenüber dem Objekt verschoben ist, werden die optischen Weglängen an verschiedenen Objektpunkten miteinander vergli-



chen. Ist das Objekt optisch stark inhomogen oder sind seine Oberflächen nicht genügend plan oder sind die optischen Elemente zwischen der Mikrolinse und dem Objekt allzu schlecht, so entstehen keine parallelen Interferenzstreifen mit konstantem Abstand mehr. Auf der anderen Seite könnte dieser Effekt gerade dazu benützt werden, wie bei einem sog. „Shearing-Interferometer“ die Größe dieser Inhomogenitäten zu messen.

Falls der Referenzstrahl ein paralleles Bündel ist, läßt sich prinzipiell eine durch Drehen des Spiegels Sp3 oder des Hologrammes entstandene Bildverschiebung durch eine entsprechende Verschiebung des Hologrammes wieder rückgängig machen.

Es gibt aber auch zwei Wege, die Bildverschiebungen gänzlich zu vermeiden; allerdings braucht man ein weiteres gutes Objektiv O2. Beiden Möglichkeiten liegt folgender Gedanke zugrunde: Da die Lageänderung des Bildes proportional zu  $\varepsilon \cdot l$  ist, verschwindet sie, falls  $l$  gegen Null geht. Man kann das Hologramm schlecht in die Ebene des Objektes stellen, aber es ist erstens möglich, daß Objekt durch ein Objektiv O2 (Lage in Abb. 1 angedeutet) auf das Hologramm abzubilden. Dann entsteht weder bei Drehen des Spiegels Sp1 noch des Spiegels Sp3 eine Verschiebung der rekonstruierten Bilder. Der Nachteil dieser Methode ist der, daß das Objektiv O1 eine relativ große Apertur haben muß, um das Objekt schließlich auf den Film abzubilden, weil die Strahlen hinter dem Hologramm je nach der Brennweite des Objektivs O2 mehr oder weniger stark divergieren.

Zweitens kann man das Objekt auf eine Mattscheibe vor dem Hologramm abbilden und kommt dann mit einem Objektiv O1 von normaler Apertur aus. Dann dürfen jedoch die Interferenzstreifen nur durch Drehen des Spiegels Sp 1 erzeugt werden, da eine Drehung des Spiegels Sp3 wieder eine Verschiebung des rekonstruierten Bildes bewirkt. Die Mattscheibe hat hier einzig den Zweck, die Entstehung eines Fresnel'schen Beugungsbildes des Objektes auf dem Hologramm zu verhindern. Sie schränkt aber, wie bereits erwähnt, die maximal auflösbare Streifendichte ein.

### Interferometrie mit dem „Nullfeld“

Selbstverständlich treten alle mit der Erzeugung eines Streifenfeldes verbundenen Schwierigkeiten nicht auf, wenn man mit einem sogenannten Nullfeld arbeitet: Interferenzstreifen sollen erst bei Änderungen des Objektes selbst entstehen. Dies dürfte der ideale Anwendungsfall des holographischen Interferometers sein.

Beim Arbeiten mit einem Streifenfeld ist es meist unwesentlich, ob die Streifendichte ein wenig größer oder kleiner ist und daher sind die Anforderungen an die Langzeitstabilität des Aufbaus und an die Rejustierung des Hologramms nach dem Entwickeln nicht ganz so streng. Anders beim Nullfeld: Hier zerstören bereits kleinste Änderungen das Nullfeld. Dank der großen Masse und der geringen Resonanzfrequenz unseres Granitstückes hatten wir weder mit der Stabilität über längere Zeiten, noch mit Gebäudeerschütterungen Schwierigkeiten, obwohl unmittelbar vor unserem Labor eine vielbefahrene Straße liegt.

Problematisch war anfangs das Rejustieren der Hologramme, das mit verschiedenen justierbaren Haltern nie völlig befriedigend gelang. Ein Ausweg wäre gewesen, das Hologramm nicht aus dem Halter zu nehmen, sondern es an Ort und Stelle zu entwickeln, wie schon verschiedentlich vorgeschlagen worden ist (z. B. [13]). Wir gelangten jedoch auf einem anderen Weg zum Ziel: Wir gaben die Rejustierbarkeit des Halters auf und sorgten durch eine konsequente Dreipunktaufgabe dafür, daß es möglich ist, das Hologramm wieder in die ursprüngliche Lage zu bringen: Die photographische Platte wird vor der Belichtung auf einem Metallrahmen festgeklemmt. Drei Stifte, die aus der Fläche des Rahmens herausragen, sorgen für einen definierten Abstand von der Fläche des eigentlichen Hologrammhalters, gegen den der Rahmen durch Blattfedern gedrückt wird. Der untere Rand des Rahmens liegt auf zwei Stiften auf, die in den Halter eingelötet sind; ein weiterer Stift definiert die seitliche Lage des Rahmens.

Nach anfänglichen Mißerfolgen, die aber alle auf mangelnde Stabilität des Halters – etwa auf einen wackeligen Reiter – zurückgeführt werden konnten, stellte sich nach dem Einlegen des Hologramms fast immer ein Nullfeld ein, das auch über mehrere Tage erhalten blieb.

Ob es sich tatsächlich um ein Nullfeld oder um ein Streifenfeld sehr geringer Streifendichte handelt, läßt sich durch Drehen des Phasenschiebers recht empfindlich prüfen.

Auch die Stabilität des Halters ist auf einfache Weise kontrollierbar: Ergeben sich durch nicht allzu großen Druck gegen den Halter bereits bleibende Änderungen im Interferenzfeld, so muß der Halter stabiler gebaut werden. Ist das Nullfeld nach dem Entwickeln einmal nicht erhalten geblieben und zeigen sich ein bis zwei Interferenzstreifen, so kann man das Nullfeld am einfachsten durch Drehen des Spiegels  $Sp_3$  erzeugen.

### Weitere mögliche Fehlerquellen

Neben mangelnder Stabilität und ungenügender Rejustierung des Hologrammes gibt es noch eine Reihe weiterer Fehlerquellen: Wie bei allen Laserinterferometern verursachen wegen der hohen Kohärenz des Lichtes Staub und Kratzer auf den optischen Elementen ausgeprägte Beugungsbilder, die sich den erwünschten Interferenzstreifen überlagern und deren Auswertung erschweren. Bei genügend sorgfältigem Arbeiten lassen sich aber Staub und Kratzer in ausreichendem Umfang vermeiden.

Obwohl man bei einem holographischen Interferometer – wie eingangs erwähnt – mit optischen Elementen normaler Güte durchaus auskommt, können allzu schlechte Teile zu Fehlern bei der Auswertung der Interferogramme führen. Wir haben oben bereits gezeigt, daß man kein gerades, paralleles Interferenzstreifenfeld mit konstantem Streifenabstand vorgeben kann, wenn die Optik des Meßstrahlenganges zwischen der Mikroblende und dem Untersuchungsobjekt allzu schlecht ist. Die Anforderungen ergeben sich aus der gewünschten Streifendichte und bei Drehung des Spiegels  $Sp_1$  aus dem Abstand zwischen dem Spiegel und dem Objekt; bei Drehung des Spiegels

Sp3 (falls nicht ein Objektiv O2 verwendet wird) aus dem Abstand zwischen dem Hologramm und dem Objekt.

Ein weiteres Gütekriterium für die optischen Teile vor dem Objekt ergibt sich sowohl beim Arbeiten mit einem vorgegebenen Streifenfeld als auch beim Nullfeld daraus, daß man bei der Auswertung der Interferogramme eine bestimmte Durchstrahlungsgeometrie des Objektes annimmt. Wie groß die Fehler der Optik und damit die Abweichungen von dieser Strahlgeometrie tatsächlich sein dürfen, hängt neben der gewünschten Meßgenauigkeit vor allem von der Größe der zu messenden Brechzahlgradienten und der Geometrie selbst ab. Erfahrungsgemäß sind die sich ergebenden Einschränkungen aber nicht so groß, daß man nicht mit „normalen“ Linsen und Spiegeln auskäme.

Ergeben Fehler der Optik „vor“ dem Objekt mehr oder minder starke Abweichungen in der Durchstrahlungsrichtung des Objekts, so führen Fehler „hinter“ dem Objekt zu Verzeichnungen bei der Abbildung des Objektes auf den Film und zu Unterschieden in der optischen Weglänge zwischen den einzelnen Lichtwegen. Aus diesem Grund setzen wir ein gut korrigiertes Objektiv O1 ein. Zu den optischen Elementen „hinter“ dem Objekt gehört auch das Hologramm selbst, dessen Träger eine Glasplatte ist. Die handelsüblichen Hologrammplatten sind alle mehr oder weniger stark schlierig. Merklich besser, aber keineswegs völlig planparallel sind die sogenannten ultraflachen Platten. Messen kann man die Güte der Glasscheiben z. B. durch Beobachten der Interferenzstreifen gleicher Dicke im reflektierten Licht. Die Fehler, die durch das Glas des Hologramms verursacht werden, sind näherungsweise alle proportional dem Abstand zwischen dem Hologramm und dem Objekt. Bei sehr hohen Ansprüchen kann man sie daher – ähnlich wie die Bildverschiebung bei der Streifenfeldvorgabe – dadurch vermeiden, daß man das Objekt mit einem Objektiv O2 (Abb. 1) auf das Hologramm abbildet.

Ein Teil des auftreffenden Lichtes wird an der Rückseite der Hologrammplatten reflektiert und ergibt, da die Glasplatten nicht planparallel sind, zusammen mit dem einfallenden Licht die Interferenzstreifen gleicher Dicke, die natürlich in der photographischen Schicht des Hologramms bei der Belichtung mit aufgezeichnet werden und je nach ihrer Richtung und Dichte später die Auswertung der Interferogramme stören. Diese Interferenzstreifen lassen sich nach einem Vorschlag von *Gates* [14] durch Aufkleben einer selbstklebenden schwarzen Folie auf die Rückseite der Glasplatte fast völlig vermeiden. Wir selbst haben allerdings noch bessere Erfahrungen mit einem Stück schwarzen Kartons gemacht, der durch Glyzerin in optischen Kontakt mit der Rückseite des Hologramms gebracht wird. Bei dieser Methode werden nicht so leicht Luftblasen eingeschlossen wie bei der selbstklebenden Folie.

### Experimentelle Erprobung

Für die praktische Erprobung unseres Interferometers verwendeten wir die Scientia 10 E 70- bzw. 10 E 75-Platten von Agfa-Gevaert, die ohne besondere Vorbehandlung normal belichtet und entwickelt wurden. Wir beobachteten keine durch den Herstellungsprozeß in der Gelatineschicht „eingefrorenen“

Spannungen, die dann zu lokalen Störungen der Phase der Rekonstruktion führen, wie sie z. B. von *Butters et al.* [15] von Kodak 649 F-Platten berichtet wurden. Derartige Spannungen traten bei uns nur auf, wenn die Platten unsachgemäß getrocknet wurden.

Maximale Intensität der Rekonstruktion ergibt sich, falls die mittlere Amplitudentransparenz des Hologrammes zwischen 0,4 und 0,6 liegt [16]. Als günstigstes Intensitätsverhältnis zwischen Meß- und Rekonstruktionsstrahlenbündeln fanden wir  $J_r/J_m \approx 4$ . Bei diesem Intensitätsverhältnis ist einerseits die Aufzeichnung schon genügend linear, andererseits fällt die Intensität der Rekonstruktion noch nicht merklich ab.

Um die obengenannte Schwärzung zu erreichen, mußten unsere  $4,5 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$  großen Hologramme etwa  $1/15 \text{ sec}$  lang belichtet werden. Für die Belichtung der Interferogramme auf feinkörnigem  $13/10$  DIN-Film kamen wir dagegen mit  $1/100 \text{ sec}$  gut aus. Der Abbildungsmaßstab war 1:1.

Die Streifendichte, die sich im Interferogramm noch gut auflösen läßt, ermittelten wir durch Verdrehen eines Spiegels. Es ergab sich, daß die Grenze der Auflösbarkeit mit 20 Linien pro Millimeter noch nicht erreicht ist. Derart hohe Liniendichten werden in praxi sehr selten benötigt.

Zur Demonstration der Fähigkeit des holographischen Interferometers, Unzulänglichkeiten der Optik vor dem Objekt zu kompensieren, wurde eine schlierige Test-Glasplatte mehrmals untersucht. Eine Glasplatte war gewählt worden, da sich ihre Inhomogenitäten zeitlich nicht ändern. Zuerst wurde in der Apparatur nach Abb. 1 (ohne Objektiv O2) ein Hologramm angefertigt, entwickelt und wieder an den Aufnahmeort gestellt. Durch dieses Hologramm wurde das inzwischen an den Ort des Objektes gestellte Test-Glas fotografiert. Ein so entstandenes Interferogramm zeigt die Abb. 4. Für die etwas „flockige“ Struktur in den Streifen sind offenbar Inhomogenitäten der Gelatineschicht des Hologrammes verantwortlich, da auch eine unbelichtete Platte bereits eine derartige räumliche Modulation eines durchtretenden Lichtbündels verursacht.

In einem zweiten Versuch war vor dem Ort des Objektes schon bei der Aufnahme des Hologrammes eine weitere schlierige Glasplatte gestellt wor-

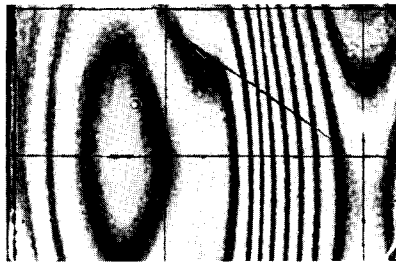


Abb. 4. Interferogramm einer schlierigen Test-Glasplatte (Objekt), aufgenommen durch ein Hologramm der leeren Apparatur. Falls man ein Hologramm mit dem Störglas der Abb. 5 im Meßstrahlengang (zur Simulation von optischen Störungen) aufnimmt und durch dieses dann die Testplatte fotografiert, ergibt sich ein zu Abb. 4 identisches Interferogramm.

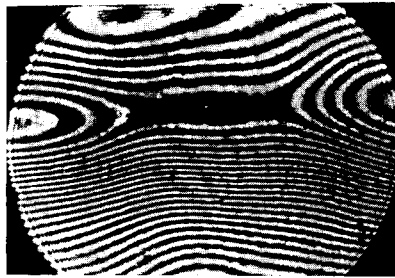


Abb. 5. Interferogramm des bei Abb. 4 erwähnten Störglases.

den. Diese Platte sollte Störungen durch unvollkommene oder unter Druck durchgebogene Küvettenfenster simulieren. Das Interferogramm (Abb. 5) dieses Störglases zeigt die Größe der Inhomogenitäten. Wieder wurde auf die gleiche Weise wie oben ein Interferogramm des Testglases angefertigt.

Außerdem wurde noch ein Interferogramm des Testglases in einem normalen Mach-Zehnder-Interferometer aufgenommen. An allen drei Interferogrammen des Testglases wurden die Orte der Maxima und Minima der Interferenzstreifen photometrisch ausgemessen. Im Rahmen der Meßgenauigkeit, die für alle Aufnahmen gleich war (besser als  $1/10$  Streifenbreite), stimmten die Auswertungen völlig überein.

### Schlußfolgerungen

Durch die Holographie wird der Anwendungsbereich der Interferometrie transparenter Objekte erweitert, z. B. auf Phänomene, die in einer Küvette bei Unter- oder Überdruck ablaufen. Das beschriebene holographische Interferometer ist ein für die praktische Anwendung gut geeignetes Gerät. Man kann sowohl mit einem Nullfeld als auch mit Streifenvorgabe arbeiten. Die Stabilität und Erschütterungsfreiheit sind hervorragend und ermöglichen die Anwendung des real-time-Verfahrens. Dadurch können instationäre Vorgänge in ihrem gesamten Ablauf verfolgt werden. Die auswertbare Dichte der Interferenzstreifen und die für die Interferogramme notwendigen Belichtungszeiten sind für die meisten Meßprobleme, wie sie z. B. auf dem Gebiet der Wärme- und Stoffübertragung auftreten, ausreichend.

### Literatur

- [1] E. N. Leith and J. Upatnick, *J. Opt. Soc. Am.* 53 (1963) 1377.
- [2] E. N. Leith and J. Upatnick, *J. Opt. Soc. Am.* 54 (1964) 1295.
- [3] L. O. Heftinger, R. F. Wuerker and R. E. Brooks, *J. Appl. Phys.* 37 (1966) 642.
- [4] M. Nisida and H. Saito, *Sci. Papers Inst. Phys. Chem. Res. (Tokyo)* 59 (1965) 5.
- [5] B. P. Hildebrand and K. A. Haines, *Appl. Opt.* 5 (1966) 172.
- [6] K. A. Stetson and R. L. Powell, *J. Opt. Soc. Am.* 55 (1966) 1694.
- [7] J. M. Burch and D. A. Palmer, *Optica Acta* 8 (1961) 73.
- [8] H. Kiemle and D. Röss, „Einführung in die Technik der Holographie“, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt/M. (1969).
- [9] D. H. R. Vilkomerson and D. Bostwick, *Appl. Opt.* 6 (1967) 1270.

- [10] *W. Hauf* and *U. Grigull*, Optical Methods in Heat Transfer. In *Advances in Heat Transfer 6* (1970) 230 ff. (Academic Press Inc. New York).
- [11] *L. H. Tanner*, *J. Sci. Instr.* *1* (1968) 517.
- [12] *L. Rosen*, *Appl. Phys. Lett.* *9* (1966) 337.
- [13] *J. O. Bolstad*, *Appl. Opt.* *6* (1967) 170.
- [14] *J. W. C. Gates*, *J. Sci. Instr.* *1* (1968) 989.
- [15] *J. N. Butters*, *D. Denby* and *J. A. Lundertz*, *J. Phys. E.* *2* (1969) 116.
- [16] *A. A. Friesem*, *A. Kozma* and *G. F. Adams*, *Appl. Opt.* *6* (1967) 851.