

Holografische Interferometrie

Motivation

In vielen technischen Anwendungen, z.B. in der Präzisions-Fertigungstechnik optischer Instrumente, ist es notwendig, kleinste Verformungen von makroskopischen Objekten zu bestimmen. Zu diesem Zweck gibt es verschiedene optische Verfahren. In diesem Versuch soll die Methode der holografischen Interferometrie angewendet und auf ihre Tauglichkeit hin beurteilt werden. Konkret untersucht wird hierzu die Ausdehnung eines Piezoaktors.

Grundlagen

Allgemeine Holografie

Bei einer holografischen Aufnahme wird der Film nicht nur mit dem Wellenfeld des aufzunehmenden Objekts, sondern auch mit einer Referenzwelle bestrahlt. Ein chemischer Prozess bewirkt, dass die Transmissivität an jedem Punkt auf dem Film von der Phasendifferenz der beiden Wellenfelder abhängt. Bei Beleuchtung des Films mit dem Referenzwellenfeld erscheint dem Betrachter das vollständige dreidimensionale Objektwellenfeld als virtuelles Bild.

Das holografische Abbildungsgesetz

Bei Belichtung des Hologramms eines Hohlspiegels im Reflexionsaufbau (s. Abb. 1) gilt die Beziehung:

$$\left(\frac{1}{z_B} - \frac{1}{z_C}\right) = \left(\frac{1}{z_G} - \frac{1}{z_R}\right)$$

z_B : Bildweite, z_C : Krümmungsradius der Konstruktionswelle, z_G : Gegenstandsweite, z_R : Krümmungsradius der Referenzwelle

Hauptversuch

Das virtuelle Bild wird mit dem realen Objektbild zur Interferenz gebracht. Dabei entstehen Intensitätsmaxima bei einer Phasendifferenz von: $\delta = 2\pi\lambda$.

Mit $\vec{S} = \vec{e}_q(P) + \vec{e}_B(P)$ gilt dann:

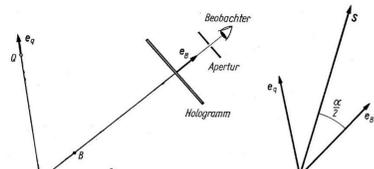
$$N\lambda = \vec{S} \cdot \vec{x} = |\vec{S}| |\vec{x}| \cos(\theta)$$

mit $\theta = \angle(\vec{S}, \vec{x})$ dem Winkel

zwischen \vec{S} und \vec{x} ,

N der Anzahl der Interferenzstreifen,

λ der Wellenlänge des Laserlichts.



Quelle: [1]. Q ist die Lichtquelle, P der betrachtete Punkt auf dem Objekt, \vec{d} der Vektor, der die Verschiebung des Objekts beschreibt (in der Rechnung mit \vec{x} bezeichnet), $\vec{e}_q(P)$, $\vec{e}_B(P)$ sind Einheitsvektoren in Richtung der Quelle bzw. des Beobachters

Michelson- Interferometer

Für die Referenzmessung (s. Abb. 2) gilt:

$$2\lambda = 2x$$

Mit:

Z : Anzahl durchgelaufener Interferenzstreifen,

λ : Wellenlänge des Laserlichts,

x : Längenänderung

Piezoelektrischer Effekt

Legt man an einen Festkörper eine Spannung an, so bilden sich innerhalb der Festkörperstruktur mikroskopische Dipole aus. Die Wechselwirkungen zwischen diesen Dipolen bewirken eine gerichtete Verformung des Festkörpers. Die Ausdehnung des Festkörpers verhält sich hier nahezu linear zur Spannung.

Durchführung

Vorversuch

In einem Vorversuch wurden zunächst in einem Reflexionsaufbau (s. Abb. 1 und Foto 1) Testhologramme aufgenommen. Dann wurde anhand des Hologramms eines Hohlspiegels das holografische Abbildungsgesetz verifiziert, um den Aufbau zu überprüfen. Hierzu wurde das Hologramm von beiden Seiten belichtet und es wurden jeweils die Fokalfpunkte lokalisiert.

Referenzmessung

Mit dem Michelson-Interferometer (s. Abb. 2) wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt. Eine Schraube wurde in das Innengewinde des Piezoaktors geschraubt und ein Spiegel darauf befestigt. Sodann wurde die Spannung am Piezoaktor in drei Messreihen jeweils bis auf 30 V hoch- und wieder runtergeregt und die Zahl der durchgelaufenen Streifen bestimmt.

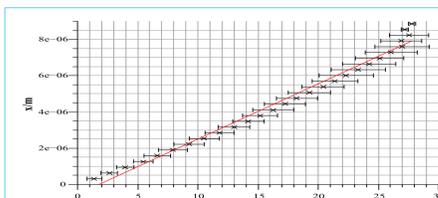
Hauptversuch

Der Reflexionsaufbau erwies sich schließlich als doch nicht geeignet. Insbesondere war es nicht möglich, Bild und Objekt gleichzeitig zu betrachten, ohne auch direkt in den Laser zu schauen.

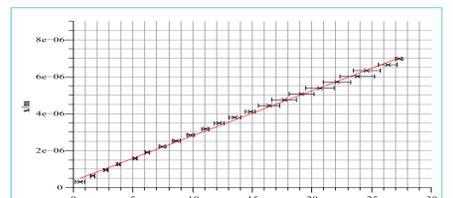
Daher wurde ein Transmissionsaufbau (s. Abb. 3) gewählt und die sog. Echtzeittechnik angewendet: Es wurde ein Hologramm eines Objektes aufgenommen und nach der Entwicklung wurden Film und Objekt beleuchtet. Das rekonstruierte Objektwellenfeld des Films und das reale Objektwellenfeld überlagerten sich. Um Interferenzstreifen (s. Foto 2) beobachten zu können, musste die Oberfläche des Schraubenkopfs poliert werden.

Für die Auswertung wurden die Aufnahmen von zwei Kameras (eine auf das Messgerät, die andere auf die Streifen gerichtet) synchronisiert. Diesmal wurde in fünf Messreihen die Spannung auf 30 V hoch- und wieder heruntergeregt. Zudem wurden die Abstände von Piezoaktor, Linse und Objektiv gemessen.

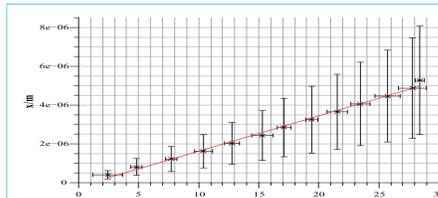
Messergebnisse



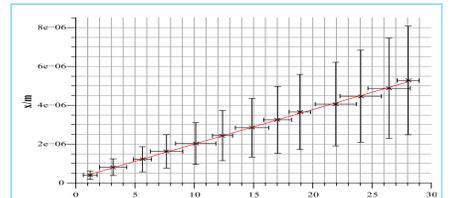
Auslenkung des Piezoaktors beim Erhöhen der Spannung im Michelson-Aufbau (s. Abb. 2) Graph 1



Auslenkung des Piezoaktors beim Verringern der Spannung im Michelson-Aufbau (s. Abb. 2) Graph 2



Auslenkung des Piezoaktors beim Erhöhen der Spannung im Transmissionsaufbau (s. Abb. 3) Graph 3



Auslenkung des Piezoaktors beim Verringern der Spannung im Transmissionsaufbau (s. Abb. 3) Graph 4

Aufbau/Bilder

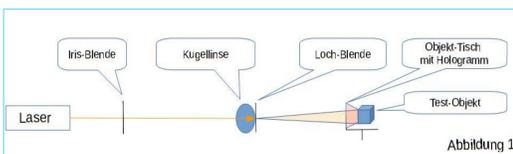


Abbildung 1

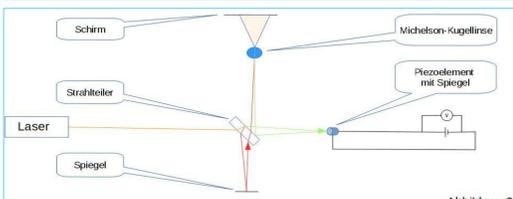


Abbildung 2

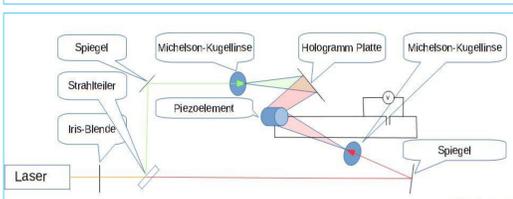


Abbildung 3



Foto 1



Foto 2

Auswertung

Die Messdaten des Vorversuchs bestätigen das Abbildungsgesetz im Rahmen der Messgenauigkeit.

Für den Hauptversuch wurde aus den Längenmessungen der Winkel θ bestimmt.

Für beide interferometrischen Versuche wurde als horizontaler Fehlerbalken die Standardabweichung angegeben. Der vertikale Fehlerbalken ergibt sich aus der Winkelmessung. Sodann wurde eine lineare Regression gemäß $x = kU + x_0$ durchgeführt (s. Grundlagen). Diese ergibt:

	Michelson-Interferometer	Hauptversuch
Erhöhen der Spannung	$k_1 = (3,52 \pm 0,08) \cdot 10^{-7} \text{ m/V}$ $R^2 = 0,98$	$k_3 = (1,82 \pm 0,07) \cdot 10^{-7} \text{ m/V}$ $R^2 = 0,994$
Verringern der Spannung	$k_2 = (2,44 \pm 0,03) \cdot 10^{-7} \text{ m/V}$ $R^2 = 0,998$	$k_4 = (1,77 \pm 0,07) \cdot 10^{-7} \text{ m/V}$ $R^2 = 0,9993$

Laut Herstellerangaben dehnt sich der Piezoaktor bei 150 V um 50 μm aus, was $k_0 = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ m/V}$ entspricht. Die von uns bestimmten Fehlerintervalle beinhalten diesen Wert nicht, sondern weichen zwischen 8 % und 47 % davon ab.

Fazit

Alle Versuche konnten erfolgreich durchgeführt werden. Die Ergebnisse des Hauptversuchs weichen jedoch deutlich von der Referenzmessung und den Herstellerangaben ab. Mögliche Gründe sind:

- Justagefehler
- Fehler beim Bestimmen des Winkels
- Ungenaues Messen der Interferenzstreifen, da es teilweise schwer zu bestimmen war, wann genau ein Streifen durchgelaufen war

Der Versuch zeigt, dass das Verfahren und der verwendete Versuchsaufbau zur Deformationsbestimmung geeignet sind. Sie stellen jedoch hohe Präzisionsanforderungen (Positioniergenauigkeit kleiner als die Wellenlänge) an die Experimentatoren wie auch an das Material. Diese konnten in unserem Versuch nicht vollständig erfüllt werden.

Literatur/Danksagung

- [1] Wernicke, Osten: Holografische Interferometrie
- [2] Toal: Introduction to Holography
- [3] Ackermann, Eichler: Holography. A practical approach

Unser Dank gilt:

- Frau Dr. Möller für ihre häufige Hilfe mit den Chemikalien
- Herrn Ulrich und Herrn Domanski für ihre stete Hilfsbereitschaft
- Lukas Bovermann, für seine kompetente und aufmunternde Begleitung