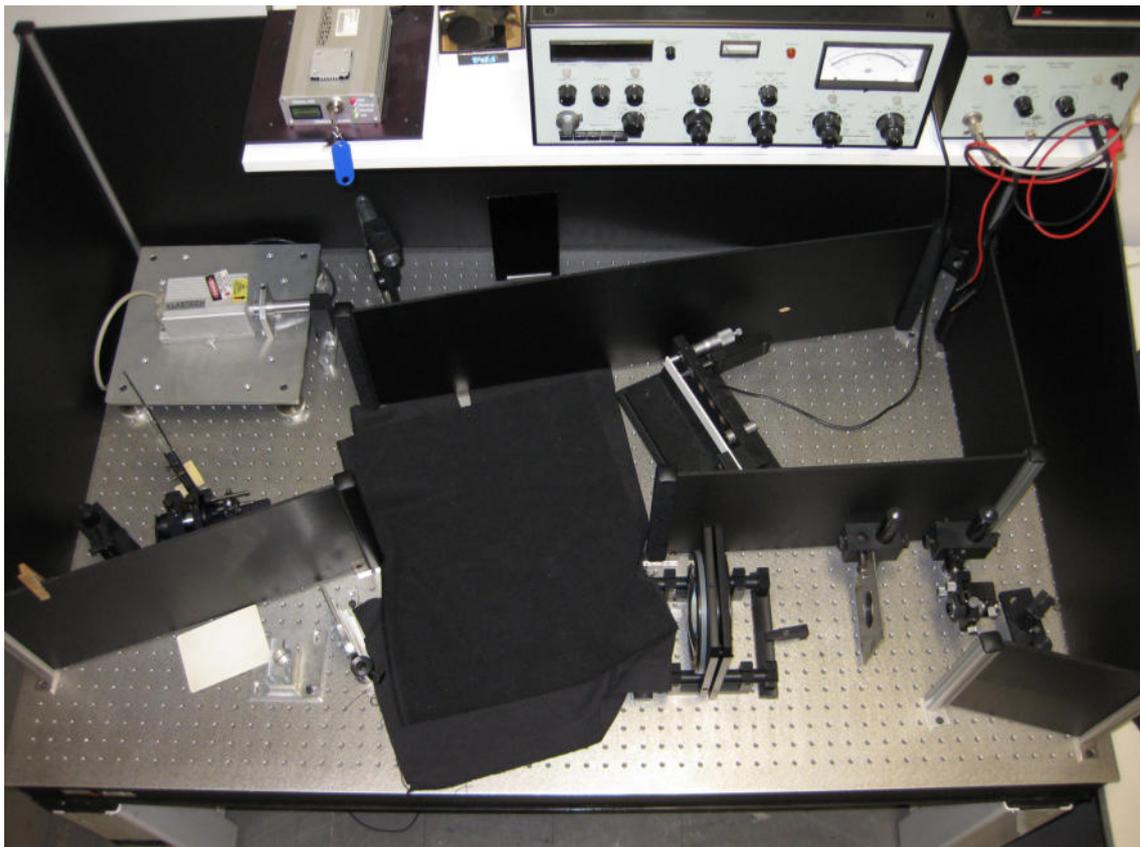


Holographische Interferometrie

Lernziele:

- Kennenlernen von lasertechnischen Bauelementen und deren Wirkung
- Vorbereitung und Durchführung einer holographischen Verformungsmessung
- Interpretation und Auswertung von Interferogrammen



Verhaltensregeln beim Arbeiten mit Lasern der Klasse 3 B

Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge, häufig auch für die Haut.

Hinweis 1:

Das direkte Blicken in den Strahl bei Lasern der Klasse 3B ist selbst dann gefährlich, wenn es nur kurzzeitig erfolgt.

Hinweis 2:

Ein Strahlbündel aus einer Laser-Einrichtung der Klasse 3B kann theoretisch sicher über einen geeigneten diffusen Reflektor betrachtet werden, wenn folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

- der minimale Beobachtungsabstand zwischen diffusem Reflektor und Hornhaut des Auges beträgt mindestens 13 cm,
- die maximale Beobachtungsdauer beträgt höchstens 10 s und
- gerichtete Strahlanteile können nicht das Auge treffen.

Hinweis 3:

Bei vielen Diffusoren ist mit gerichteten Strahlanteilen zu rechnen, wodurch die Expositionsbedingungen ungünstiger werden.

Hinweis 4:

Eine Gefährdung der Haut durch die zugängliche Laserstrahlung besteht bei Laser-Einrichtungen der Klasse 3B, wenn die Expositionsgrenzwerte der Haut überschritten werden. Dies trifft in der Regel zu, wenn die Strahldurchmesser zu klein sind oder wenn der Laserstrahl fokussiert wird.

Hinweis 5:

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 3B kann es im Laserstrahl zum Entflammen entzündlicher Materialien kommen.

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbericht	1
2. Grundlagen der Holographie	2
2.1 Aufzeichnung und Rekonstruktion eines Hologramms	2
2.2 Verfahren der holographische Interferometrie	3
2.3 Versuchsaufbau zur holographische Interferometrie	5
3. Versuchsdurchführung	11
3.1 Justage der Raumfilter	11
3.2 Strahlleistungsverhältnis	12
3.3 Belichtungszeit	13
3.4 Hologrammaufzeichnung	14
3.5 Entwicklung	16
3.6 Geometrische Daten des Versuchsaufbaus	17
3.7 Rekonstruktion und Bildausgabe	18
4. Auswertung	20
4.1 Bestimmung der Lage der Interferenzminima	20
4.2 Berechnung der theoretischen Biegelinie	21
4.3 Auswertung des Interferogramms	22

1. Vorbericht

- a.) Geben Sie die Gleichung einer ebenen elektromagnetischen Welle an und benennen Sie die in ihr auftretenden Größen.
- b.) Erklären Sie anhand einer Skizze das Entstehen der Objektwelle Σ_O .
- c.) Welche wellenoptische Effekte treten bei der Aufzeichnung und bei der Rekonstruktion eines Hologramms auf?
- d.) Erklären Sie anhand einer Skizze die Rekonstruktion der Objektwelle Σ_O . Wo entsteht das reelle und das virtuelle Bild des Objekts?
- e.) Welche Bedingung müssen der Objekt- und Referenzstrahlengang bezüglich der Länge erfüllen, damit ein Hologramm aufgezeichnet werden kann.
- d.) Welches Verfahren der holographischen Interferometrie wird in dem Versuch angewendet?

2. Grundlagen der Holographie

Die Holographie ist ein dreidimensionales Bildaufzeichnungs- und Bildwiedergabeverfahren, dessen Grundlagen schon 1947 von Dennis Gabor erarbeitet wurden. Das Fehlen einer ausreichend kohärenten Lichtquelle verhinderte jedoch die praktische Umsetzung. Diese gelang erst nach der Erfindung des Lasers, mit dem E. Leith und J. Upatnieks im Jahre 1962 erste brauchbare Hologramme herstellen.

2.1 Aufzeichnung und Rekonstruktion eines Hologramms

Im Gegensatz zur herkömmlichen Fotografie speichert man bei der Holographie die gesamte Information der elektromagnetischen Welle und zwar Amplitude und Phase. Die Amplitude registriert dabei die Helligkeit und die Phase beinhaltet die Information über die räumliche Ausdehnung des aufgenommenen Objekts.

Der zur Aufzeichnung eines Hologramms benötigte Laserstrahl wird mittels eines variablen Strahlteilers optisch in zwei Teilstrahlen unterschiedlicher Leistung aufgeteilt.

Der eine Teilstrahl dient zur Beleuchtung des Objekts. Nach dem Prinzip von Huygens wird jeder Punkt des beleuchteten Gegenstandes zum Ausgangspunkt von Elementarwellen. Aus der Überlagerung dieser Elementarwellen entsteht die Objektwelle Σ_O . In einem geeigneten Abstand von dem Objekt wird eine Glas- oder Kunststoffplatte mit einer lichtempfindlichen Schicht positioniert. Der zweite, nicht modulierte Teilstrahl, bildet die Referenzwelle Σ_R und beleuchtet direkt die lichtempfindliche Schicht. Dabei wird der Ort der lichtempfindlichen Schicht als Hologrammebene bezeichnet.

Das durch die Überlagerung der Objekt- und Referenzwelle entstehende Interferenzmuster in der Hologrammebene wird von der lichtempfindlichen Schicht aufgezeichnet. Durch einen nasschemischen Entwicklungsprozess wird das Interferenzmuster auf der Platte fixiert und man erhält ein Amplitudenhologramm. Die Entwicklung von Holofilmen unterscheidet sich im Wesentlichen nicht von der Entwicklung fotografischer Schwarz - Weiß Filme. Der grundlegende Unterschied zwischen Holofilmen und Fotofilmen liegt in der Größe der lichtempfindlichen Silberhalogenid-Kristalle in der Schicht.

Auf dem Hologramm ist das aufgenommene Objekt, nicht wie bei einer Fotografie, direkt zu sehen. Um das Bild des Objekts betrachten zu können, muss die Objektwelle Σ_O rekonstruiert werden. Hierzu wird das Hologramm mit einer Wiedergabewelle Σ_W beleuchtet. Bei der holographischen Interferometrie verwendet man als Wiedergabewelle Σ_W in der Regel die Referenzwelle Σ_R . Das Hologramm wirkt dabei wie ein stark verzerrtes Beugungsgitter und es kommt zu einer Aufteilung der Wiedergabewelle Σ_W auf die verschiede-

nen Beugungsordnungen. Dabei enthalten die höheren Beugungsordnungen die Informationen der ursprünglichen Objektwelle Σ_O . Betrachtet man nur die ± 1 . Beugungsordnung, so enthält die eine das reelle und die andere das virtuelle Bild des Objekts.

2.2 Verfahren der holographische Interferometrie

Die holographische Interferometrie ist sehr umfangreich und daher eines der Hauptanwendungsgebiete der Holographie. Sie gestattet die unmittelbare Messung der statischen und dynamischen Verformung der Oberfläche von Bauteilen. Die wesentlichen Verfahren der holographischen Interferometrie sind:

a.) Doppelbelichtungsverfahren

Da dieses Verfahren relativ einfach durchzuführen ist, wird es sehr häufig angewendet. Bei einer ersten Teilbelichtung wird eine Aufnahme von dem Objekt angefertigt. Nach der Belastung wird eine zweite Aufnahme auf der gleichen Fotoplatte durchgeführt (Doppelbelichtung), d.h. es werden auf der Fotoplatte zwei Bilder mit unterschiedlichen Verformungszuständen gespeichert. Bei der Rekonstruktion entstehen dann gleichzeitig zwei geringfügig voneinander abweichende Objektwellen Σ_O . Die zwei rekonstruierten Objektwellen Σ_O überlagern sich und erzeugen auf dem Bild des Objekts ein Interferenzmuster. Dieses Interferenzmuster enthält die Informationen über die Verformung der Objektoberfläche.

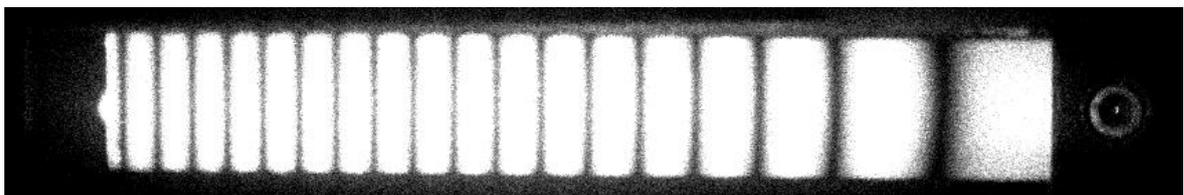


Abb. 2.1: Mit dem Doppelbelichtungsverfahren erstelltes Interferogramm

Das Interferogramm aus Abbildung 2.1 zeigt einen einseitig eingespannten Flachstahl, der bei der zweiten Aufnahme am offenen Ende (linke Seite) um ca. $5 \mu\text{m}$ verschoben wurde. Der Abstand der Interferenzstreifen ist ein Maß für die Verformung. Mit kleinerem Abstand erhöht sich die Verschiebung der Oberfläche.

b.) Zeitmittlungsverfahren (time-average-Verfahren)

Bei diesem Verfahren wird das Bauteil während der Belichtung mit einer seiner Resonanzfrequenzen angeregt. Die Belichtungszeit bei der Aufnahme ist erheblich länger als eine Schwingungsperiode. Aufgrund der geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit in den Bereichen der Umkehrpunkte (Schwingungsmaxima) verweilt das Bauteil länger in den Umkehrpunkten als in den Nulldurchgängen. Im zeitlichen Mittel über die Belichtungszeit werden daher die Umkehrpunkte bei der Aufnahme stärker berücksichtigt. Die Interferenzlinien stellen somit Bereiche gleicher Schwingungsamplitude dar.

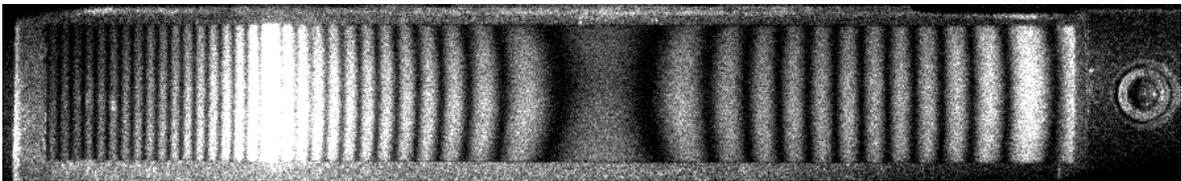


Abb. 2.2: Mit dem Zeitmittlungsverfahren aufgenommenes Interferogramm

Die Abbildung 2.2 zeigt den gleichen Flachstahl wie in Abbildung 2.1. Der Flachstahl wurde während der Aufnahme mit der Resonanzfrequenz $f_{res} = 538$ Hz sinusförmig angeregt. Da in den Schwingungsknoten die Auslenkung Null ist, sind diese im Interferogramm am Hellsten (konstruktive Interferenz) dargestellt. Mit steigender Schwingungsamplitude nimmt der Kontrast der übrigen Interferenzstreifen schnell ab.

c.) Echtzeitverfahren (real-time-Verfahren)

Bei dieser Methode wird das zu untersuchende Objekt in einem definierten Zustand aufgenommen. Nach der Entwicklung wird die Fotoplatte wieder genau in die Aufnahmeposition gebracht und mit der Referenzwelle Σ_R beleuchtet. Das virtuelle Bild des Objekts entsteht nun exakt an der Stelle, an der es bei der Aufnahme stand bzw. immer noch steht. Beleuchtet man nun zusätzlich das Objekt mit der bei der Aufnahme verwendeten Lichtwelle, dann deckt sich das vom Hologramm erzeugte virtuelle Bild mit den vom tatsächlich vorhanden Objekt gestreuten Lichtstrahlen. Wird jetzt das Objekt verformt, dann überlagert sich die vom Objekt real gestreuten Objektwelle mit der Objektwelle des rekonstruierten virtuellen Bildes. Die beobachteten Interferenzlinien auf der Objektoberfläche sind wieder ein Maß für die Bauteilverformung. Mit dem Verfahren kann die Änderung der Verformung in Echtzeit beobachtet werden.

2.3 Versuchsaufbau zur holographische Interferometrie

Der in den Abbildungen 2.3 und 2.4 dargestellte Versuchsaufbau befindet sich auf einem schwingungs isolierten Tisch. Zur Befestigung der Bauelemente verfügt die schwingungs-gedämpfte Tischplatte über eine Gewindematrix. Wird das Tischgestell mit Druckluft ver-sorgt, dann wird die Tischplatte mittels Membran-Luftfeder-Isolatoren angehoben und so-mit gegen störende Schwingungen aus der Umgebung isoliert.

Der verwendete Singelmode-Dauerstrichlaser mit Kohärenzlänge von mehreren Metern ist ein frequenzverdoppelter Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 532nm und einer Ausgangsleistung von ca. 280 mW. Mit einem externen Shutter kann für Mess- und Jus-tierarbeiten der Strahlaustritt freigeschaltet werden. Weiterhin wird mit dem Shutter die Belichtungszeit bei der Hologrammaufnahme gesteuert.

Die Strahlaufteilung (s. Abbildung 2.5) in Referenz- und Objektstrahl erfolgt mittels eines variablen Strahlteilers. Dieser besteht aus einer in radialer Richtung verschieden stark auf-gedampften Spiegelschicht. Der von der Spiegelschicht transmittierte Teil der Strahlung ist der Referenzstrahl und der reflektierte Anteil ist der Objektstrahl. Durch Drehen des Strahlteilers an der gerändelten Mantelfläche kann das gewünschte Leistungsverhältnis zwischen Objekt- und Referenzstrahl eingestellt werden. Die unaufgeweiteten Laserstrah-len werden mittels Spiegel zur jeweiligen Strahlaufweitung geführt.

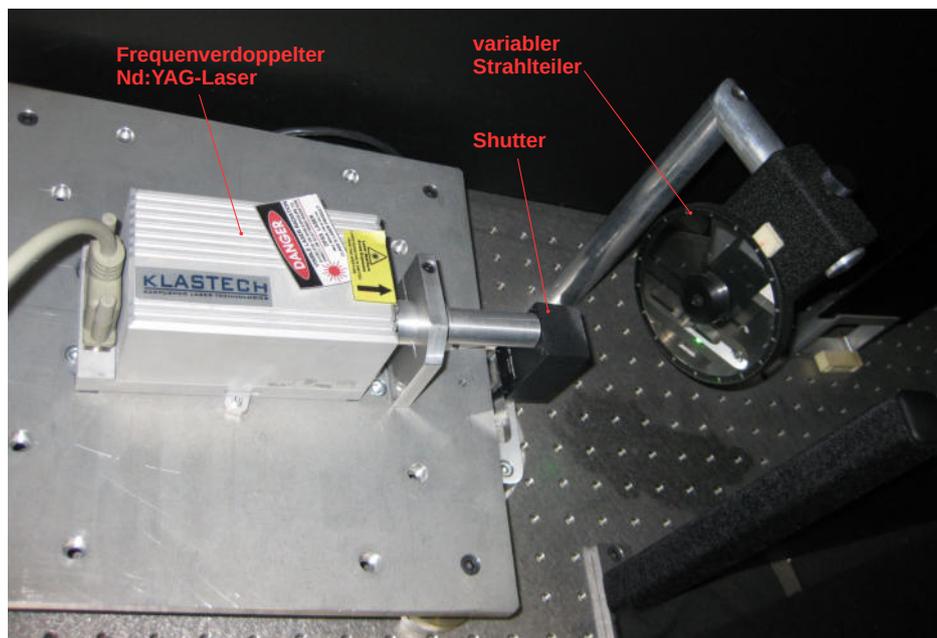


Abb. 2.5: Foto Laser, Shutter und variabler Strahlteiler

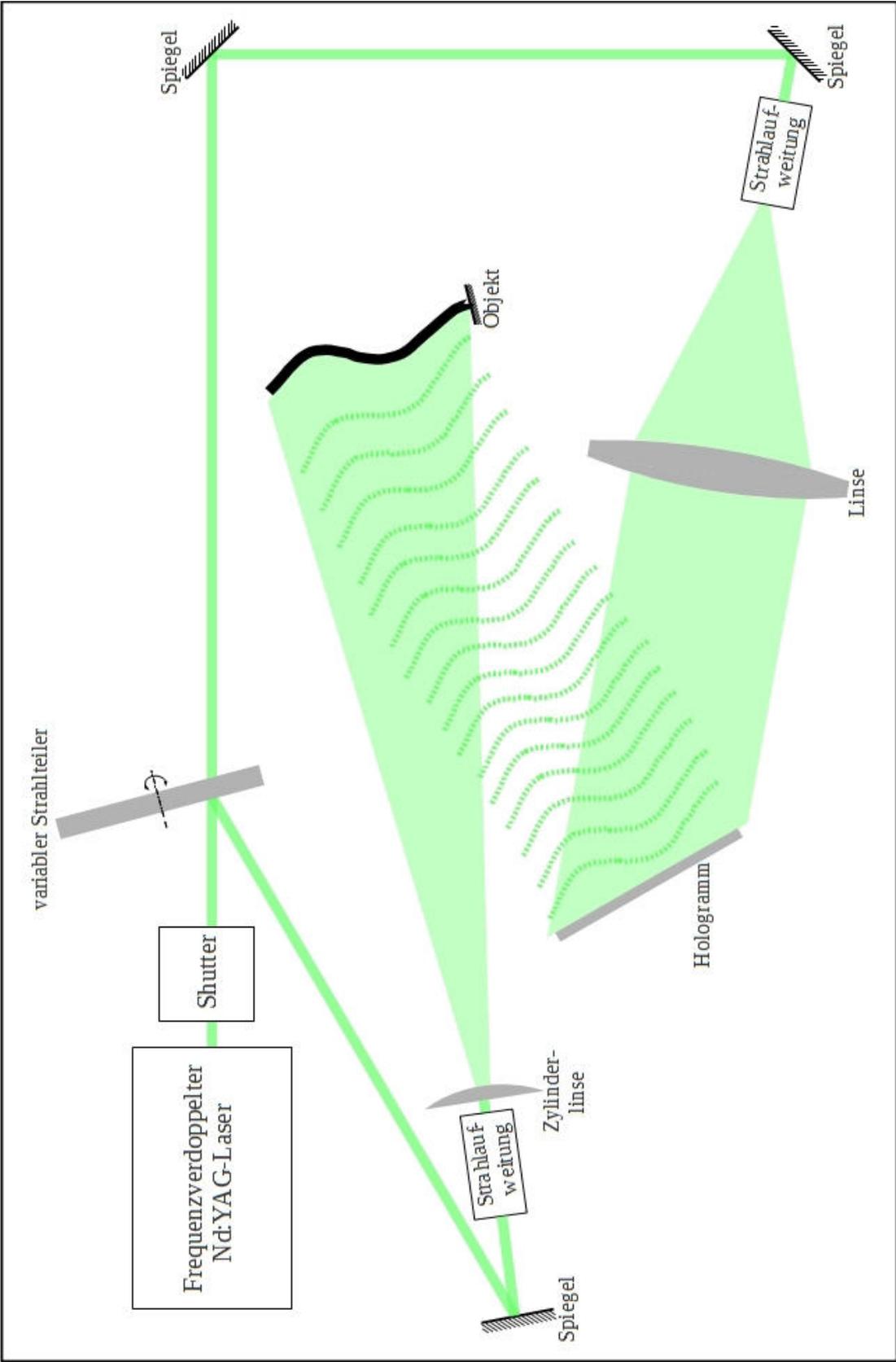


Abb. 2.3: Skizze Laboraufbau zur holographischen Interferometrie

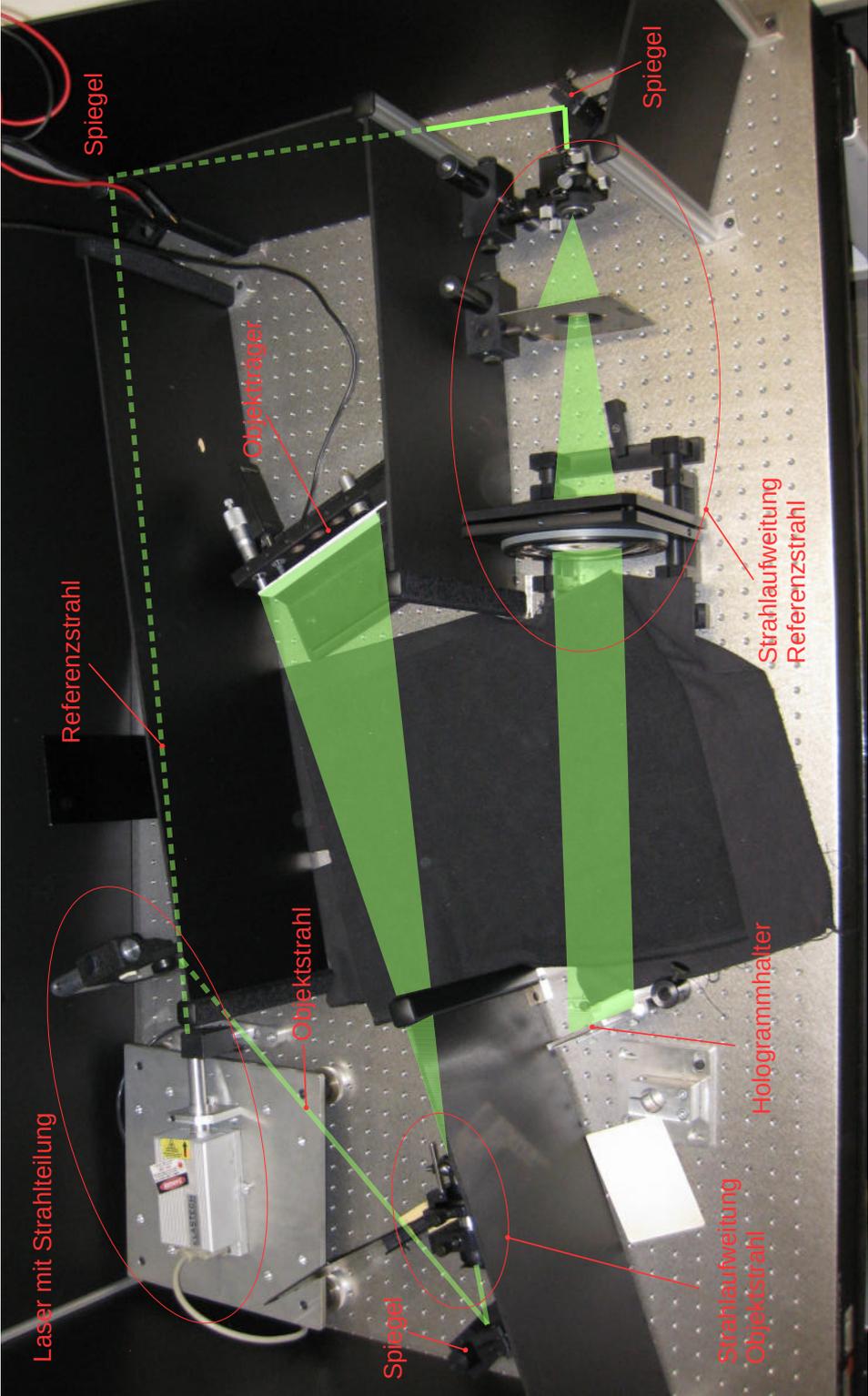


Abb. 2.4: Laboraufbau zur holographischen Interferometrie

Die Strahlaufweitung erfolgt durch Mikroskopobjektive mit Raumfiltern. Der Raumfilter ist eine dünne Metallfolie mit einer Bohrung von ca. $5\mu\text{m}$ Durchmesser welche in den Fokus des Mikroskopobjektiv justiert werden muss. Unerwünschte Beugungseffekte, die durch Blenden oder Staub bzw. Kratzer auf den optischen Flächen entstehen, werden somit entfernt. Eine ausführliche Beschreibung der Wirkungsweise eines Raumfilters zeigt die Abbildung 2.9.

Um eine möglichst effektive Ausleuchtung der Hologrammebene und des Objekts zu erhalten, werden die nach der Strahlaufweitung divergenten Wellen geometrisch umgeformt. So wird mittels einer weiteren Linse die divergente Referenzwelle wieder in eine ebene Welle, jedoch mit größerem Strahldurchmesser, gewandelt. Dies wird erreicht, indem der Brennpunkt des Mikroskopobjektivs mit dem Brennpunkt der Linse zusammenfällt. Die Anordnung wird als (umgekehrtes) Kepler-Fernrohr bezeichnet und ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

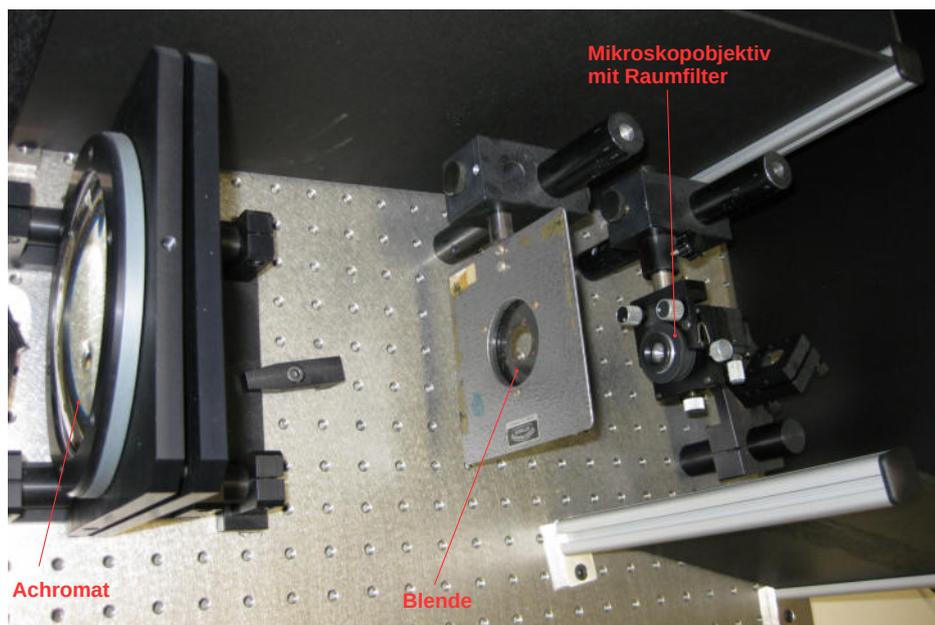


Abb. 2.6: Strahlaufweitung Referenzstrahl

Für eine möglichst helle Ausleuchtung der rechteckförmigen Oberfläche des Biegebalkens wird, wie in Abbildung 2.7 gezeigt, in den Objektstrahlengang eine Zylinderlinse eingebracht. Hierdurch erhält man einen elliptischen Strahlquerschnitt (s. Abbildung 2.8).

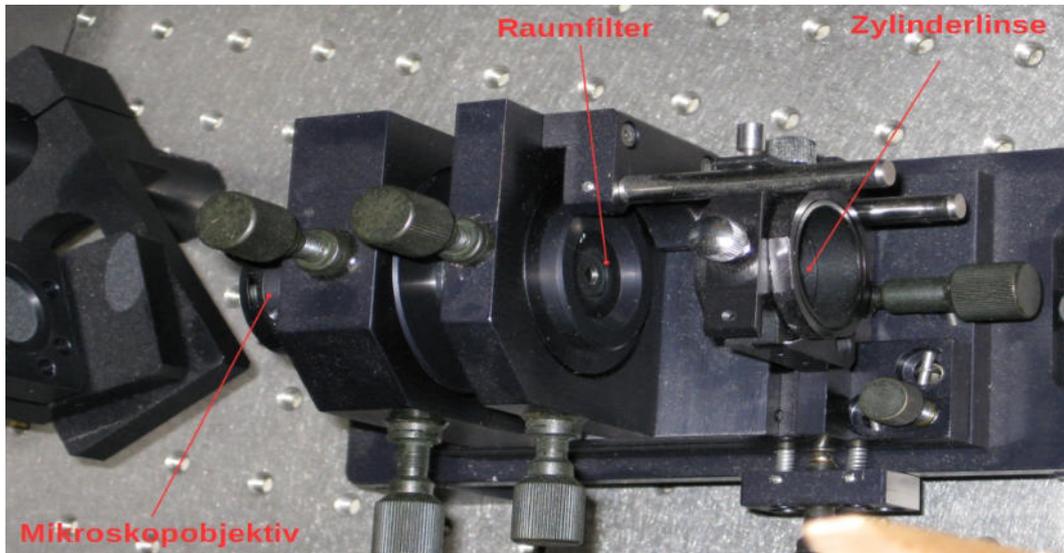


Abb. 2.7: Strahlaufweitung Objektstrahl

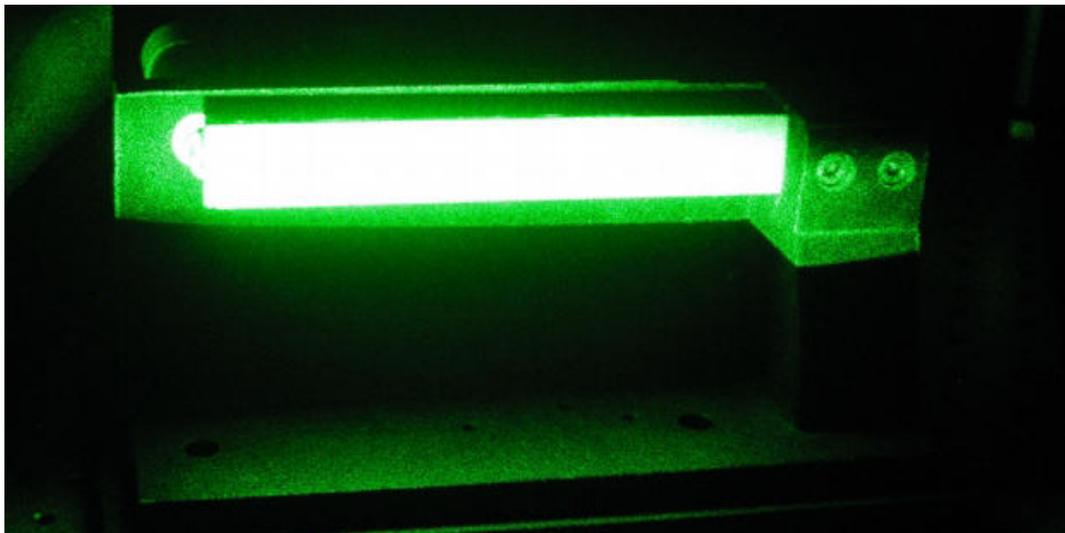
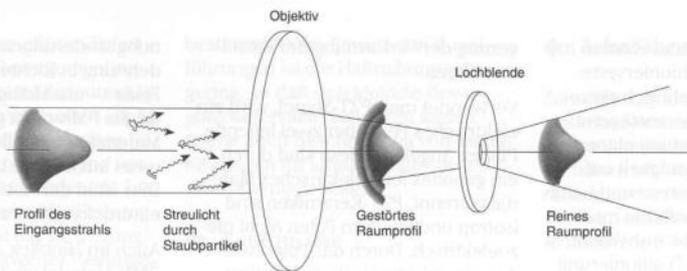


Abb. 2.8: Ausgeleuchteter Biegebalken

Die belichteten Photoplaten werden in einer Dunkelkammer nasschemisch entwickelt. Zur Bildaufzeichnung steht eine CCD-Kamera mit Rechner und Drucker zur Verfügung.

Erläuterungen: Raumfilter



Raumfilter werden eingesetzt, um Zufallsfluktuationen aus dem Intensitätsprofil eines Laserstrahls zu entfernen. Das ist besonders wichtig bei kritischen Anwendungen, wie in der Holographie und der optischen Datenauswertung.

Streustrahlung entsteht durch optische Defekte und Luftpartikel. Diesen Effekt kann man sichtbar machen, indem man einen Laserstrahl aufweitet und auf einem weißen Karton abbildet: Die Wirbel, Löcher und Ringe, die das ideale gleichmäßige Punktmuster überlagern, sind *räumliches Rauschen*.

Raumfiltern ist ein sehr einfaches Konzept: Ein ideal kohärenter, kollimierter Laserstrahl verhält sich wie eine unendlich weit entfernte Punktquelle. Das Raumfiltern setzt voraus, daß der Strahl fokussiert wird. Auf diese Weise kann man ein Bild der Quelle mit allen Ungenauigkeiten im optischen Strahlenweg erzeugen. Diese Ungenauigkeiten treten in konzentrischen Ringen um die

optische Achse auf. Eine Lochblende schließt das Rauschen größtenteils aus. Das ideale Gaußprofil eines Laserstrahls $I(r)$ wird durch Intensitätsfluktuationen δI durch Streuungen verursacht. δI ändert sich rapide über eine Durchschnittdistanz d_n , die viel kleiner als der $1/e^2$ -Radius a ist. Der Abstand d_n ist auch als durchschnittliche räumliche Wellenlänge des Laserstrahlrauschens bekannt.

Wird ein gaußförmiger Strahl durch eine positive Linse mit der Brennweite f fokussiert, ist das Bild in der Brennebene (das optische Leistungsspektrum = OPS) eine umgekehrte „Landkarte“ der räumlichen Wellenlängen, die im Laserstrahl auftreten. Kurzes Wellenlängenrauschen (d_n) erscheint als konzentrischer Ring mit dem Radius $f\lambda/d_n$, der in der optischen Achse zentriert ist. Eine lange räumliche Wellenlänge bei einem idealen Gaußprofil stellt das Bild direkt auf der optischen Achse dar.

Eine auf der Strahlachse zentrierte Lochblende blockiert die uner-

wünschten verrauschten Ringe. Dabei wird nur ein geringer Teil der Laserleistung weggenommen. Der Leistungsanteil, der durch eine Lochblende mit dem Durchmesser D tritt, errechnet sich wie folgt:

$$\frac{P(D)}{\text{Gesamtleistung}} = 1 - e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\pi a D}{\lambda f} \right]^2}$$

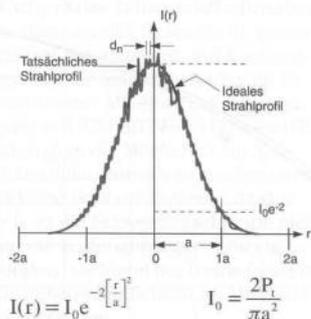
Das geringste Wellenlängenrauschen, das durch die Lochblende übertragen wird, beträgt:

$$d_n(\text{min}) = 2f\lambda/D$$

Newport empfiehlt eine Lochblende mit dem Durchmesser D_{opt} :

$$D_{\text{opt}} = f\lambda/a$$

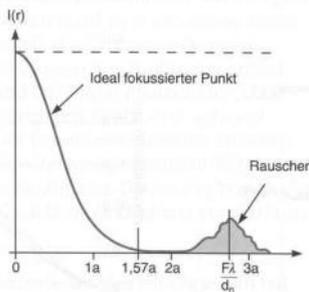
Mit solch einer Lochblende werden 99,3 % der absoluten Strahlleistung übertragen. Räumliche Wellenlängen, die kleiner als $2a$ sind (Durchmesser des Eingangsstrahls), werden blockiert. Da d_n immer viel kleiner ist als der Strahldurchmesser, kommt der gefilterte Strahl dem idealen Gaußprofil sehr nahe.



$$I(r) = I_0 e^{-2 \left[\frac{r}{a} \right]^2} \quad I_0 = \frac{2P_t}{\pi a^2}$$

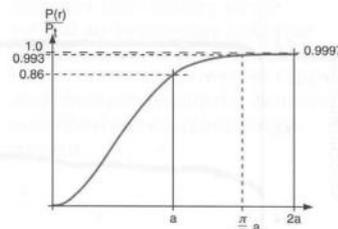
$$I(\text{tatsächlich}) = I(r) + \Delta I_{\text{Rauschen}}$$

- a = Strahlradius bei $1/e^2$
- P_t = Gesamtleistung des Lasers
- d_n = Durchschnittliche „Wellenlänge“ der Unterschiede in der Rauschintensität
- $d_n < a$



$$I(r) = I_0 e^{-2 \left[\frac{r}{a} \right]^2} \quad a = \frac{\lambda f}{\pi a}$$

- f = Brennweite der Objektivlinse
- λ = Wellenlänge des Lasers
- r = Radiusdistanz innerhalb OPS
- a = Radius der OPS-Gaußverteilung bei $I(r) = I_0 e^{-2}$



$$D_{\text{opt}} = \frac{\lambda f}{a}$$

- D = Durchmesser der Lochblende
- f = Brennweite der Objektivlinse
- a = Eingangsradius des Strahles auf der Linse

Abb. 2.9: Erläuterungen zur Raumfilterfunktion der Fa. Newport GmbH

3. Versuchsdurchführung

Mit dem roten Kippschalter am Steuergerät kann der Shutter geöffnet und der Laserstrahl freigegeben werden. Kündigen Sie den anderen Versuchsteilnehmern immer das Öffnen des Shutters an. Setzen Sie die Laserschutzbrillen auf und kontrollieren Sie die korrekte Justierung des Aufbaus.



Abb. 3.1: Steuergerät Shutter

3.1 Justage der Raumfilter

Die Aufnahme von Hologrammen erfordert einen gut justierten Hologrammaufbau. Die Bauelemente der Strahlführung sind teilweise recht empfindlich gegen Dejustage. Vor der Belichtung müssen daher die Strahlengänge, und hier besonders die Raumfilter, kontrolliert und ggf. nachjustiert werden. Bei Betrachten des Strahlprofils nach der Raumfilterung auf einen Schirm muss sich, wie in Abbildung 3.2 a) dargestellt, ein homogenes Strahlprofil ergeben. Ergibt sich ein ähnliches Strahlprofil wie in b) dargestellt, muss der Raumfilter neu justiert werden. Wenden Sie sich in diesem Fall an den Versuchsbetreuer.

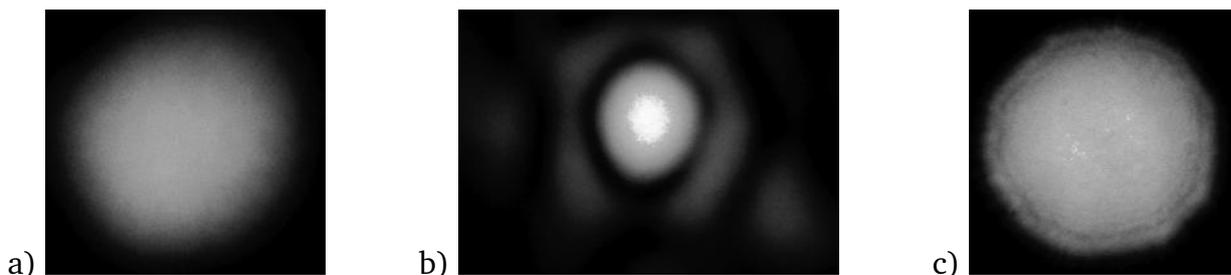


Abb. 3.2: Strahlprofil nach der Raumfilterung

- a) gute Justierung
- b) schlechte Justierung
- c) ohne Raumfilter

3.2 Strahlleistungsverhältnis

Das richtige Verhältnis der Strahlungsleistung von Objektstrahl P_O zu Referenzstrahl P_R in der Hologrammebene ist eine Grundvoraussetzung für das Zustandekommen aussagefähiger Hologramme. Strahlungsleistungsverhältnisse von P_O/P_R zwischen 1:6 und 1:8 bringen bei diesem Versuchsaufbau die besten Ergebnisse. Die Messung der Strahlungsleistung erfolgt mit dem Leistungsmesser FieldMax II und dem Sensor OP-2 VIS.

Positionieren Sie den Sensor in der Hologrammebene und richten Sie die Sensorfläche in Richtung des Objekts aus. Schalten Sie das Messgerät ein und kontrollieren Sie mit der λ -Taste, ob der Leistungsmesser auf die verwendete Laserwellenlänge eingestellt ist. Die Messungen müssen im abgedunkelten Labor erfolgen. Durch erneutes kurzes Drücken des Einschalttasters kann die Hintergrundbeleuchtung des Displays eingeschaltet werden. Mit der **Zero**-Taste wird das restliche Umgebungslicht bei der Messung unterdrückt.

Zur Einstellung des Strahlleistungsverhältnisses beginnt man mit der Messung des Objektstrahls. Hierzu blockiert man mit einer Blende den Referenzstrahl und bestimmt die Leistung des Objektstrahls. Im Anschluss wird der Objektstrahl blockiert und der Referenzstrahl gemessen. Liegt das Strahlleistungsverhältnis außerhalb des angegebenen Bereichs, muss durch Drehen am Strahlteiler die Strahlleistung angepasst werden. Beobachten Sie während der Verdrehung des Strahlteilers die Änderung der Leistung des Referenzstrahls. Im Anschluss kontrollieren Sie das Strahlteilerverhältnis durch erneutes Messen des Objektstrahls. Dieser Vorgang muss so oft wiederholt werden, bis das gewünschte Leistungsverhältnis erreicht ist.

Ist ein passendes Leistungsverhältnis gefunden, muss zur Bestimmung der Belichtungszeit die Gesamtstrahlungsleistung P_{ges} in der Hologrammebene gemessen werden. Entfernen Sie hierfür die Blenden aus dem Objekt- und Referenzstrahlengang und messen sie die Gesamtstrahlungsleistung P_{ges} in der Hologrammebene.

3.3 Belichtungszeit

Neben der Gesamtstrahlungsleistung P_{ges} benötigt man für die Berechnung der Belichtungszeit die technischen Daten des verwendeten Hologfilms der Fa. Slavich:

Typ	Wellenlängenbereich [nm]	Energiedichte H_e [$\mu\text{J}/\text{cm}^2$]	Auflösung [Linien/mm]
VRP-M	488-532	75	3000

Tab. 3.1: Eigenschaften der lichtempfindlichen Schicht

Der Durchmesser der Sensorfläche beträgt $D_{Sensor} = 0,8$ cm. Aus den Daten kann mit Hilfe der folgenden Formel die Belichtungszeit ermittelt werden:

$$t = \frac{H_e \cdot A_{Sensor}}{P_{ges}} \quad (3.1)$$

mit

- H_e - Energiedichte [$\mu\text{J}/\text{cm}^2$ bzw. $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$]
- A_{Sensor} - Sensorfläche [cm^2]
- P_{ges} - Gesamtstrahlungsleistung [μW]

Wie bereits in Punkt 2.2 erläutert, werden bei dem Doppelbelichtungsverfahren zwei unterschiedliche Belastungszustände des zu untersuchenden Objekts auf der Fotoplatte gespeichert. Die errechnete Belichtungszeit muss daher für die Teilaufnahmen halbiert werden. Stellen Sie die so ermittelte Belichtungszeit an dem Steuergerät des Shutters (s. Abbildung 3.1) ein und aktivieren Sie die durch Umlegen des mittleren Kippschalters von der Stellung **MAN** auf **TIME** die Zeitschaltfunktion.

3.4 Holgrammaufzeichnung

Damit der Hologrammaufbau während der Belichtungszeit unempfindlich gegen Erschütterungen und Gebäudeschwingungen ist, vergewissern Sie sich, dass der schwingungsisiolierte Tisch mit Luft versorgt ist.

Machen Sie sich mit den räumlichen Gegebenheiten gut vertraut, dies erleichtert die Arbeit im Dunkeln!

Einstellen der Verformung

Wie in Abbildung 3.3 dargestellt befindet sich auf der Rückseite der Einspannung des Biegebalkens zum Einstellen der Verformung eine Mikrometerschraube. Neben der Mikrometerschraube ist ein Messtaster angebracht. Neben der Mikrometerschraube ist ein Messtaster angebracht.

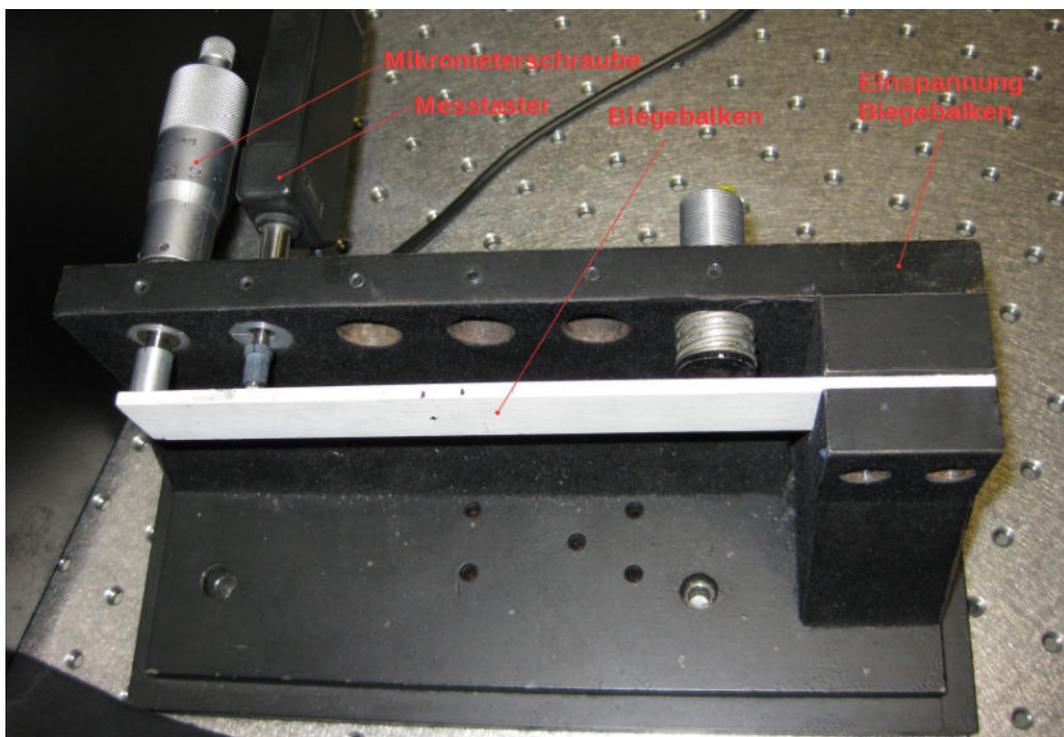


Abb. 3.3: Einspannung Biegebalken

An der Anzeige des Messtasters (s. Abbildung 3.4) kann die Verschiebung (in mm) abgelesen werden. Drehen Sie die Mikrometerschraube so weit zurück, bis an der Anzeige keine Änderung mehr beobachtet werden kann. Der Biegebalken befindet sich nun im entlasteten Zustand. Drehen Sie jetzt die Mikrometerschraube in die entgegengesetzte Richtung bis an der Anzeige eine geringe Verschiebung (wenige μm) angezeigt wird. Durch zweimaliges Drücken der REF-Taste wird nun die Anzeige auf Null gesetzt. In dieser leicht vorgespannten Einstellung wird die erste Belichtung durchgeführt.



Abb. 3.4: Anzeige Messtaster

Einlegen des holographischen Films

Für die Belichtung wird das Raumlicht ausgeschaltet. Da der verwendete Hologfilm im roten Spektralbereich nicht empfindlich ist, kann eine entsprechende Beleuchtung (rotes Licht) eingeschaltet werden.

Jetzt darf der Hologfilm aus der Verpackung genommen werden. Bevor er in den Hologrammhalter eingespannt wird, muss die Seite mit der lichtempfindlichen Schicht festgestellt werden. Dazu tastet man mit einem feuchten Finger eine Ecke auf der Vorder- und Rückseite ab. Die lichtempfindliche Schicht befindet sich auf der leicht klebrigen Seite und soll in die Richtung des Objekts zeigen. Legen Sie nun den Film in die Ausfräsung des Hologrammhalters und achten Sie auf einen korrekten Sitz. Nun wird die Klappe des Hologrammhalters geschlossen und mit der beiliegenden Klammer gesichert.

Durchführen der Belichtung

Bevor die erste Teilbelichtung durchgeführt wird, wartet man ca. 30 s und achtet in dieser Zeit auf Erschütterungen (z. B. Fahrstuhl). Sind keine Erschütterungen festzustellen kann die Belichtung durch Auslösen des Shutter mit Hilfe der Fernauslösung durchgeführt werden.

Nach der ersten Teilbelichtung wird an der Mikrometerschraube eine Verschiebung w_{bel} von ca. 3-4 μm eingestellt, wieder ca. 30 s gewartet, und die zweite Teilbelichtung durchgeführt. Direkt nach der Belichtung wird der Film aus dem Halter genommen und wieder lichtdicht in der Verpackung verstaut.

Notieren Sie sich den angezeigten Wert der Verschiebung w_{bel} , denn er ist wichtig für die Auswertung!

3.5 Entwicklung

Der Hologfilm wird in der Dunkelkammer entwickelt. An der Stoppuhr sind folgende Zeiten einzustellen bzw. zu überprüfen:

- Nr.1: 2 min entwickeln
- Nr.2: 2 min zwischenwässern
- Nr.3: 2 min fixieren
- Nr.4: 5 min schlußwässern

Schalten Sie die rote Dunkelkammerbeleuchtung ein und das weiße Licht aus. Nun kann der Hologfilm wieder aus der Verpackung genommen und an einer Ecke mit der Entwicklungszange gefasst werden. Dabei sollte die lichtempfindliche Schicht nach oben zeigen. Die Zange verbleibt während dem gesamten Entwicklungsprozess an dem Film.

Legen Sie den Film in die Schale mit dem Entwickler und starten Sie die Stoppuhr mit der roten Taste. Bei der Entwicklung muss der Film in dem Entwickler und dem Fixierbad mit der Zange immer leicht hin und her bewegt werden. Nach Ablauf der Entwicklungszeit nehmen Sie den Film aus dem Entwickler, lassen ihn kurz abtropfen und halten durch erneutes Drücken der roten Taste die Stoppuhr an. Die Uhr springt nun ohne zu starten weiter auf die nächste Zeiteinstellung.

Legen Sie jetzt den Film zum Zwischenwässern in die Schale mit dem laufenden Wasser und starten Sie wieder mit der roten Taste die Stoppuhr. Führen Sie die weiteren Entwicklungsschritte wie beschrieben durch. Mit dem Schlußwässern ist der Entwicklungsprozess abgeschlossen. Schwenken Sie nun den Film in einer verdünnten Spülmittellösung und lassen ihn abtropfen. Im Anschluss wird der Film mit einem Heißluftgebläse auf niedrigster Temperaturstufe getrocknet.

3.6 Geometrische Daten des Versuchsaufbaus

Die Abbildung 4.2 zeigt die Winkelbeziehungen am Interferogramm. Bestimmen Sie die folgenden, für die Auswertung unbedingt benötigten, Daten direkt am Versuchsaufbau:

a.) Winkel α zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsrichtung (Quelle)

Der Winkel α ist der Winkel, den der Objektstrahl mit der Beobachtungsrichtung einschließt.

$$\alpha = \dots\dots\dots$$

b.) Winkel ω zwischen Sensitivitätsvektor S und Verschiebung $d(x)$

Da die Verschiebung $d(x)$ näherungsweise parallel zur Kraft F ist und die Richtung der Kraft F durch die Achse der Mikrometerschraube vorgegeben wird, kann hierüber der Winkel ω bestimmt werden.

$$\omega = \dots\dots\dots$$

c.) Länge des Biegebalkens l_{ges}

Für die Berechnung der Biegelinie ist nur der sichtbare Teil des Biegebalkens, also von der Einspannung bis zum offenen Ende, ausschlaggebend.

$$l_{ges} = \dots\dots\dots$$

d.) Ort des Messtasters x_{mt}

Für die Berechnung der maximalen Auslenkung des Biegebalkens wird der Abstand des Messtasters x_{mt} von der Einspannung benötigt.

$$x_{mt} = \dots\dots\dots$$

3.7 Rekonstruktion und Bildausgabe

Zur Rekonstruktion positionieren Sie das getrocknete Hologramm wieder mit der lichtempfindlichen Schicht in Richtung des Biegebalkens in den Hologrammhalter. Decken Sie dem Balken mit einem Tuch ab und blockieren Sie den Objektstrahl mit der Blende. Drehen Sie den Strahlteiler in die Stellung bei welcher der Referenzstrahl die geringste Leistung besitzt.

Vorsicht: Blicken Sie auf keinen Fall in Richtung des Referenzstrahls!

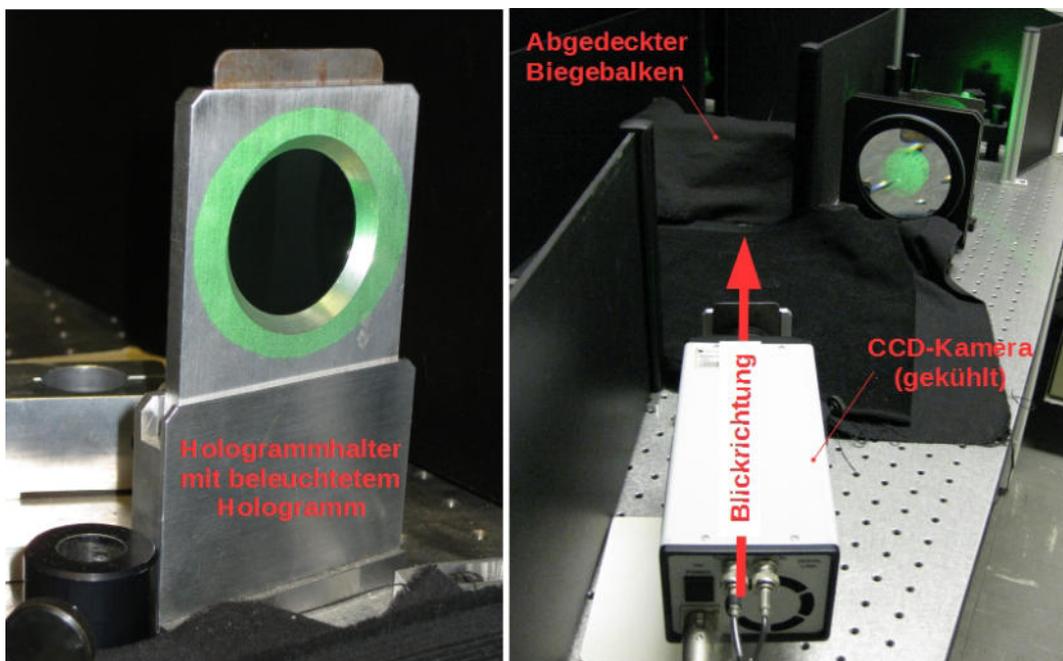


Abb. 3.5: Rekonstruktion des Hologramms

Blicken Sie nun durch das Hologramm in Richtung des Biegebalkens. Es sollte das mit Interferenzstreifen überzogene virtuelle Bild des Biegebalkens zu sehen sein. Ist kein Bild erkennbar, kann es möglich sein, dass das Hologramm falsch in den Halter eingelegt wurde. In diesem Fall drehen und wenden Sie das Hologramm in unterschiedlichen Richtungen und kontrollieren in jeder neuen Position, ob nun ein mit Interferenzstreifen überzogenes Bild zu sehen ist.

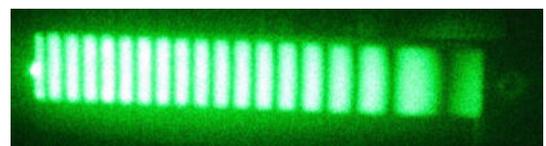


Abb. 3.6: Interferogramm

Für die Auswertung benötigen Sie einen Ausdruck des Interferogramms. Hierfür wird die CCD Kamera, wie in Abbildung 3.5 gezeigt, direkt hinter dem Hologrammhalter aufgestellt und an der Rückseite eingeschaltet. Die LED neben dem Schalter muss rot/grün blinken oder ständig grün leuchten. Leuchtet die LED ständig rot, dann ist die Verbindung zwischen Kamera und Rechner nicht in Ordnung. Ist die Verbindung in Ordnung, kann das Programm Easy Control gestartet werden.

Mit dem -Button wird die Kamera in den Live-Modus geschaltet. Justieren Sie nun die Kamera so, dass das komplette Bild des Biegebalken angezeigt wird. Die Helligkeit wird durch Verdrehen des Strahlteilers angepasst. Gegebenenfalls kann der Bildkontrast durch teilweises Abdecken des Hologramms mit einer Blende verbessert werden. Für die Bildaufnahme wird die Kamera mit dem -Button aus dem Livemodus in den Einzelbildmodus geschaltet.

Da ein direkter Ausdruck aus dem Programm ein zu kleines Bild liefert, muss dieses vorher abgespeichert werden. Hierzu wählt man in der Menüleiste **Image** → **Export** und wechselt in dem geöffneten Fenster **Export Image** in das Verzeichnis *E:\holographische_interferometrie*. Zum Speichern wählen Sie als Filetype *8bit Bitmap File (*.bmp)* und geben Sie den Filenamen in der Form *tt-mm-jj-Gruppe.bmp* ein.

Zum Drucken des Bildes öffnen Sie die Worddatei *holo_doppel.doc*, löschen das dargestellte Interferogramm und fügen Ihre Bilddatei in den Positionsrahmen ein. Speichern Sie die Datei unter den Dateinamen *tt-mm-jj-Gruppe.doc* ab und drucken den Hologrammauswertungsbogen aus. Beachten Sie bei der Auswertung, dass das Interferogramm auf dem Ausdruck nicht maßstäblich dargestellt wird.

4. Auswertung

4.1 Bestimmung der Lage der Interferenzminima

Markieren Sie auf dem im Labor ausgedruckten Bild des Interferogramms alle Interferenzminima und messen Sie deren Abstand von der Einspannung.

Durch den Ausdruck ergibt sich jedoch eine Maßstabsveränderung. Mit Hilfe der im Labor ermittelten Gesamtlänge l_{ges} des Biegebalkens müssen Sie die gemessenen Abstände auf die realen Abstände x_i umrechnen.

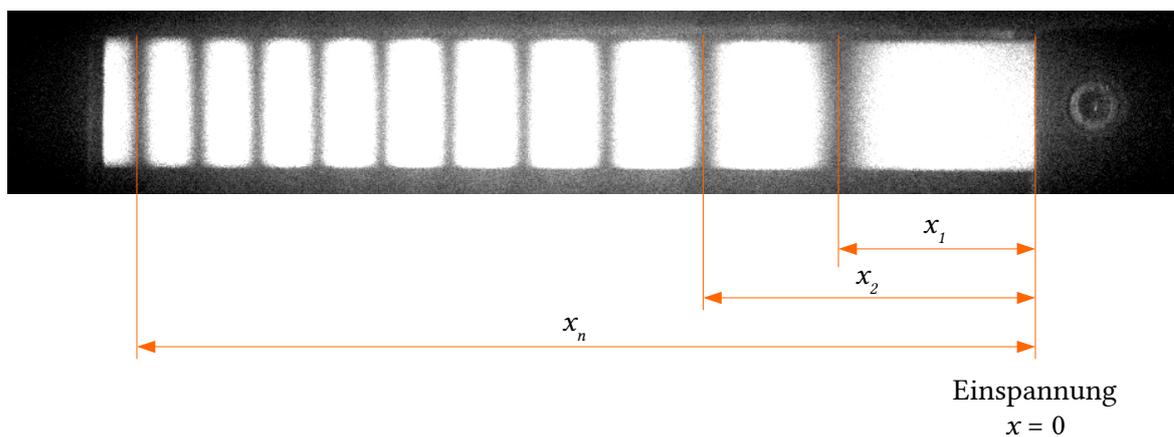


Abb. 4.1 Lage der Interferenzminima

Die realen Abstände x_i werden im Folgenden für die Berechnung und Darstellung der Biegelinie benötigt.

4.2 Berechnung der theoretischen Biegelinie

Berechnen Sie mit Hilfe der Formel 4.1 für einen einseitig eingespannten Balken die theoretische Biegelinie.

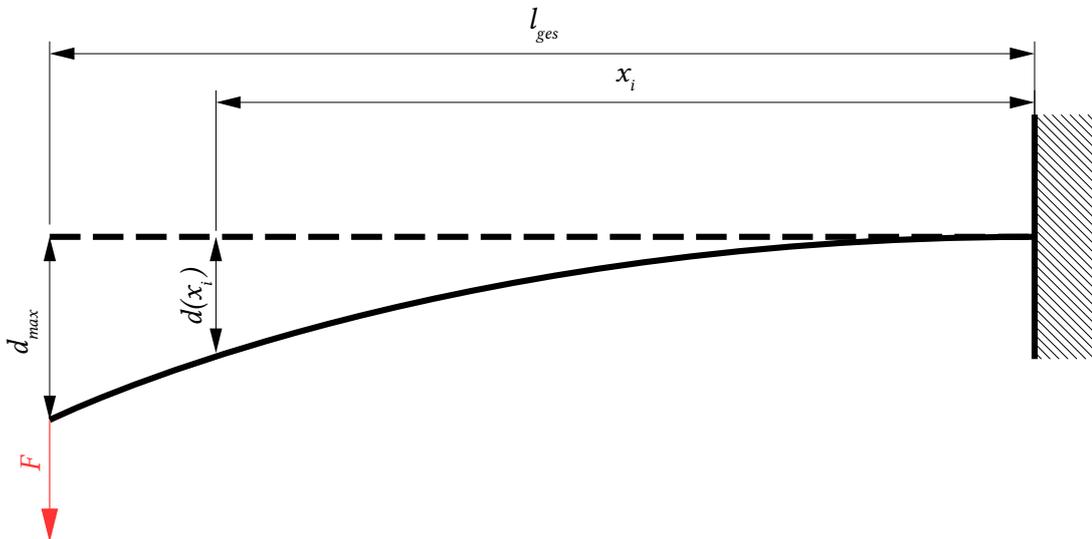


Abb. 4.2: Darstellung zur Berechnung der Biegelinie

$$d(x_i) = \frac{d_{max}}{2} \left[2 - 3 \frac{l_{ges} - x_i}{l_{ges}} + \left(\frac{l_{ges} - x_i}{l_{ges}} \right)^3 \right] \quad (4.1)$$

mit

- $d(x_i)$ - Auslenkung des Biegebalkens an der Stelle x_i [μm]
- d_{max} - max. Auslenkung des Biegebalkens [μm]
- l_{ges} - Gesamtlänge des Biegebalkens [mm]
- x_i - Abstand i-ter dunkler Interferenzstreifen von der Einspannung [mm]

Da, wie in Abb. 3.3 zu sehen, die Position der Mikrometerschraube nicht mit der des Messtasters übereinstimmt, muss die max. Auslenkung d_{max} zuerst berechnet werden. Für $d(x_i)$ setzen sie hierzu die bei der Belichtung eingestellte Verschiebung d_{bel} und für x_i den Abstand x_{mt} zwischen Einspannung und Messtaster ein.

Berechnen Sie nun den Biegeverlauf und stellen ihn in einem Diagramm mit einem möglichst großen Maßstab dar.

4.3 Auswertung des Interferogramms

Die Abbildung 4.3 zeigt die Winkelverhältnisse am Biegebalken. Zur Interpretation der Interferenzstreifen geht man davon aus, dass der Biegebalken aus einer Vielzahl von Punkten, an denen das Licht gestreut wird, zusammengesetzt ist. Betrachtet man einen beliebigen Punkt P , so wird dieser in Folge der Verschiebung $d(x)$ in die neue Position P' überführt.

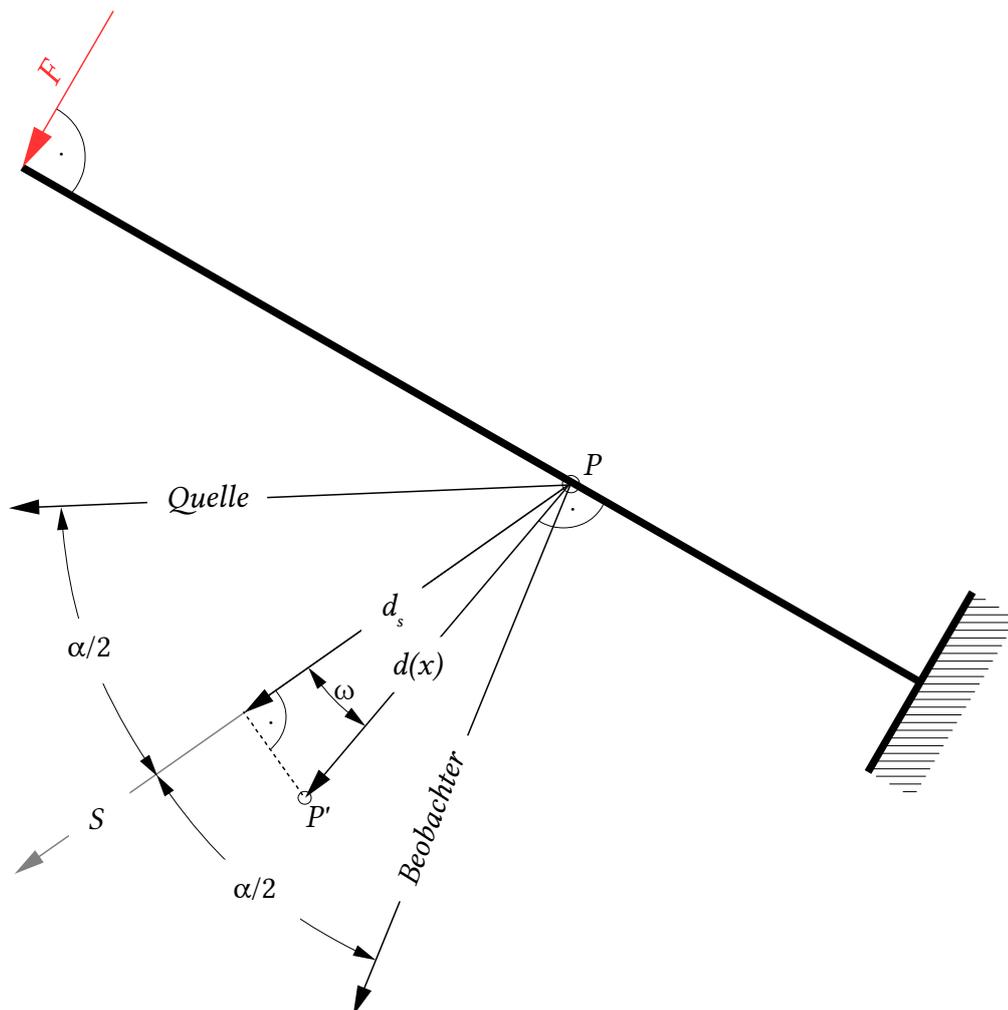


Abb. 4.3: Winkelverhältnisse am Biegebalken

Die von einer feststehenden Lichtquelle ausgehenden Wellen (Beleuchtungswelle des Objekts) werden bei der Belichtung an den unverschobenen Objektpunkt P und verschobenen Objektpunkt P' gestreut. Diese Objektpunkte wirken bei der Rekonstruktion wiederum als Lichtquellen. Infolge der Verschiebung $d(x)$ besitzen sie jedoch unterschiedliche opti-

sche Weglängen und weisen daher im Beobachtungspunkt (z.B. Auge des Betrachters) eine Phasendifferenz auf. Diese Phasendifferenz ist für die Entstehung der Interferenzstreifen verantwortlich.

Der Sensitivitätsvektor \mathcal{S} (Summenvektor aus den Einheitsvektoren der Beleuchtung- und Beobachtungsrichtung) liegt in Richtung der Winkelhalbierenden des Winkels α und gibt die Richtung der größten Empfindlichkeit an. Der Messaufbau ist also dann am empfindlichsten, wenn schon kleine Verschiebungen eine große Anzahl von Interferenzstreifen hervorruft. Daher ist der Winkel ω möglichst klein zu halten.

Zur Auswertung des Interferogramms ordnet man dem Punkt, bei dem die Verschiebung auf dem Objekt Null ist (Mittelpunkt hellster Streifen), die Interferenzordnung $n = 0$ zu. Wie in der Abbildung 4.4 zu sehen, liegt dieser Punkt bei dem einseitig eingespannten Balken genau an der Einspannung.

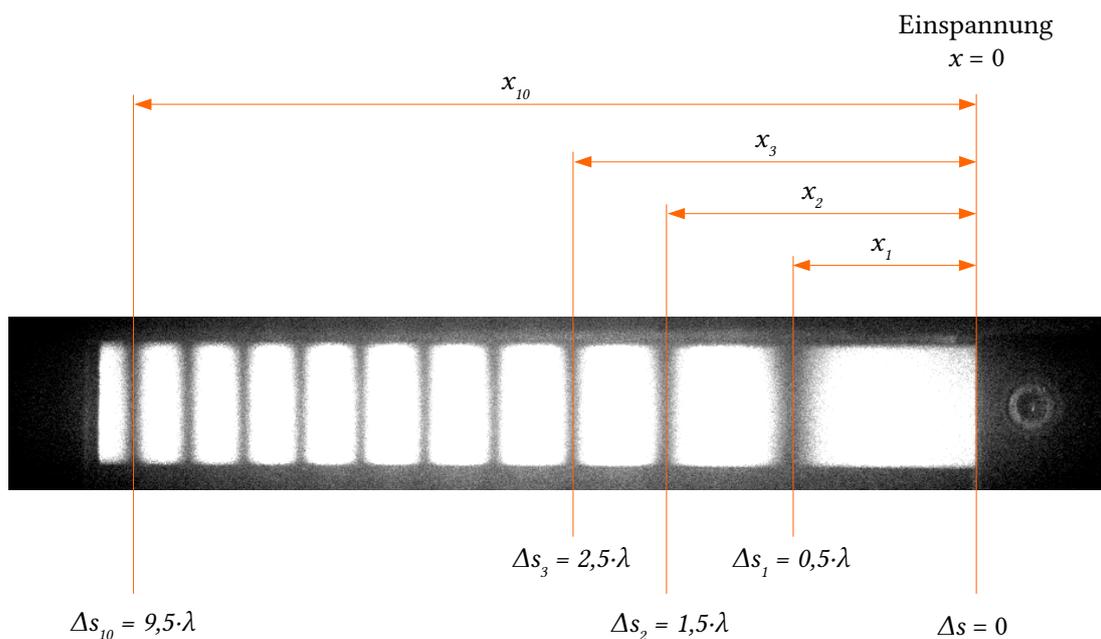


Abb. 4.4: Auswertung Interferogramm

Zwischen zwei hellen, bzw. zwei dunklen Interferenzlinien beträgt die Wegdifferenz auf dem Biegebalken $\Delta s = \lambda$. Die Verschiebung an dem i -ten dunklen Interferenzstreifen $d(x_i)$ in Beobachtungsrichtung kann mit Hilfe der folgenden Formel berechnet werden:

$$d(x_i) = \frac{\Delta s_i}{2 \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \omega} \quad (4.2)$$

mit

- $d(x_i)$ - Auslenkung des Biegebalkens an der Stelle x_i [μm]
- Δs_i - Wegdifferenz [μm] (s. Abbildung 4.4)
- α - Winkel zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsrichtung
- ω - Winkel zwischen Sensitivitätsvektor \mathbf{S} und Verschiebung $d(x_i)$

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass man bei der Rekonstruktion des Hologramms die Objektwellen des unverformten und des verformten Bildes nicht mehr trennen kann. Daher kann aus dem Interferogramm die Richtung der Verschiebung nicht mehr festgestellt werden, also nur noch der Betrag der Verschiebung bestimmt werden.

Berechnen Sie für jeden dunklen Interferenzstreifen die Verschiebung $d(x_i)$ und tragen Sie die berechneten Werte in das gleiche Diagramm aus Aufgabe 4.2 ein. Vergleichen Sie die zwei Kurven und kommentieren das Ergebnis.