

Versuch: Interferometrie (22.11.2002)

Inhalt:

- | | | |
|----|--------------------------|----------|
| 1. | Einführung zum Versuch | Seite 1 |
| 2. | Messungen und Auswertung | Seite 1 |
| 3. | Resümee | Seite 10 |

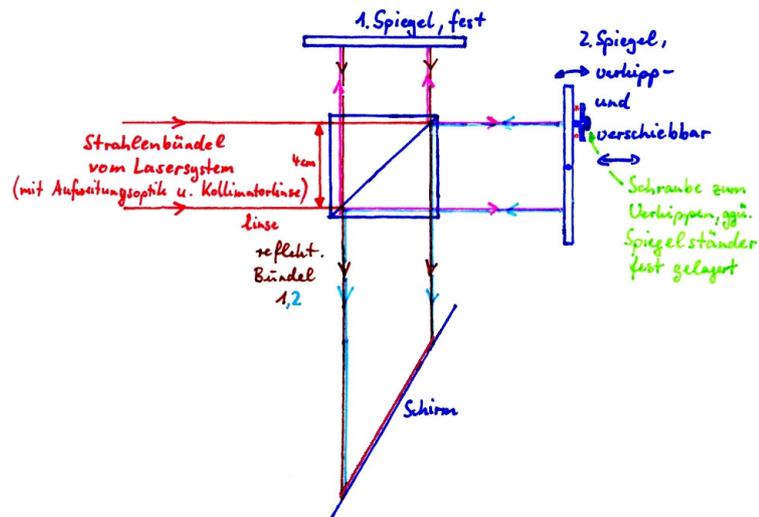
1. Einführung zum Versuch

Interferometrie – was ist das und wofür braucht man das? Wir können in diesem einleitenden Absatz noch keine genaueren Erklärungen geben – aber dafür eine kleine generelle Einführung. Schon am Namen des Verfahrens sieht man, dass es hier um Interferenz geht – also um die Überlagerung von Wellen verschiedener Ausbreitungsrichtung, „Form“ oder Wellenlänge, die zur zumindest zeitweisen gegenseitigen Auslöschung oder Verstärkung der Wellen an verschiedenen Punkten im gemeinsamen Wellenfeld führt. Was aber hier im Versuch betrachtet werden soll, sind stationäre (also zeitunabhängige) Auslöschungs- und Verstärkungseffekte, die bei der Überlagerung zweier kohärenter Lichtwellenbündel in Abhängigkeit der Phasenbeziehung der Wellen zueinander (die ja bei Kohärenz an festen Orten zeitlich konstant ist) an verschiedenen Orten entstehen. Bringt man zwei kohärente Lichtbündel nicht direkt zur Überlagerung, sondern lässt die beiden vorher von Objekten reflektieren, so wird sich bei Veränderung des Zustands der Reflexionsoberflächen aufgrund veränderter Gangunterschiede auch eine Veränderung des Interferenzbildes ergeben. Man kann also relativ direkt von der erzeugten Veränderung des Interferenzmusters auf die Veränderung der Reflexionsoberflächen schließen. Dies macht das Verfahren gerade zur Prüfung von Verformungseigenschaften von Materialien etc. interessant. Die hohe Genauigkeit des Messverfahrens rechtfertigt seinen mittlerweile verbreiteten Einsatz in der Industrie.

2. Messungen und Auswertung

2.1 Michelson-Interferometer

Im ersten Versuchsteil wurde ein einfaches Michelson-Interferometer aufgebaut. Mit dessen Hilfe sollte die Ganghöhe einer Feingewindeschraube gemessen werden, die zum Verkippen eines Spiegels, wie er im Versuch zum Einsatz kommt, verwendet wird. Bevor wir allerdings zu dieser Messung kommen, soll kurz noch einmal die Funktionsweise des Aufbaus erläutert werden (vgl. dazu auch nachfolgende Skizze).



Der Strahl eines Lasers, der bekanntlich Licht mit vergleichsweise hoher Kohärenzlänge liefert, wird zunächst aufgeweitet und mit einer Sammellinse parallelisiert. Letzteres erreicht man, indem man die Linse (im Versuch Brennweite 500mm) so justiert, dass sich die Austrittsöffnung des Aufweitungssystems (welches bereits fest montiert war) gerade in ihrem Brennpunkt befindet. Die einfachste Möglichkeit, dies zu erreichen ist es, hinter der Linse einen Spiegel aufzustellen und den Durchmesser des reflektierten Strahls in der Ebene der Austrittsöffnung zu betrachten. Die Linse wird dann so verschoben, dass dieser Durchmesser minimal ist.

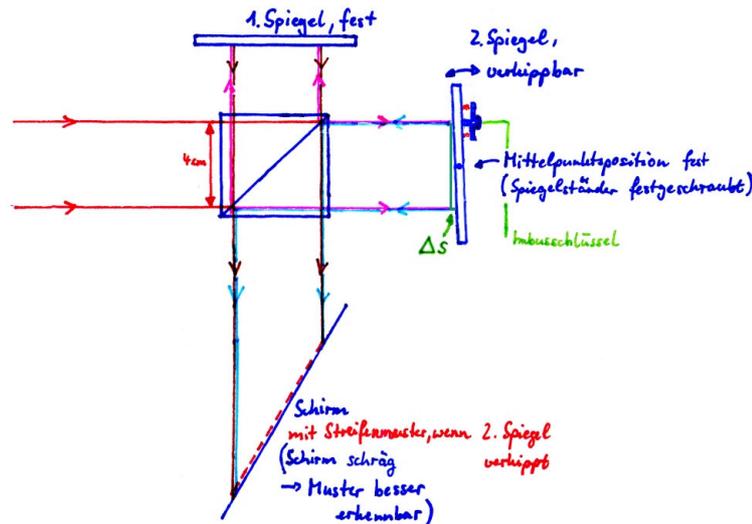
Der aufgeweitete und parallele Strahl trifft dann auf einen Strahlteiler, der ihn in zwei Teilbündel zerlegt, die jeweils an einem Spiegel reflektiert werden und dann wiederum auf den Strahlteiler treffen. Dort werden sie jeweils (teilweise) in Richtung des Schirmes gelenkt, wo sie sich überlagern.¹ Im Allgemeinen² wird nun der Weg, den die auf je einem Schirmpunkt auftreffenden Strahlen aus den beiden Bündeln zurückgelegt haben, nicht exakt der gleiche sein. In diesem Fall kommt es zu Interferenzmustern auf dem Schirm, d.h. zur Entstehung von Intensitätsmaxima und -minima. Dieser Effekt kann leicht anhand der Welleneigenschaften des Lichts verstanden werden: Beträgt nämlich der Gangunterschied zweier sich überlagernder Strahlen null oder ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge, so treffen die „Wellenberge“ von Strahl 1 mit den „Wellenbergen“ von Strahl 2 zusammen, wodurch sich natürlich eine Verstärkung der Intensität ergibt (konstruktive Interferenz). Entsprechend führt die Überlagerung von „Bergen“ mit „Tälern“ (d.h. ein Gangunterschied zwischen den beiden Strahlen von ungeradzahligem Vielfachen der halben Wellenlänge) zu einer gegenseitigen Auslöschung (falls die Amplituden der Wellen gleich sind, ansonsten: Abschwächung), also zu einem Intensitätsminimum (destruktive Interferenz). Aufgrund dieser Effekte kann man aus dem Interferenzmuster auf den Gangunterschied der beiden Lichtstrahlen schließen (s.u.).

In der von uns verwendeten Versuchsanordnung ist einer der Spiegel fest, während man den anderen über entsprechende Stellschrauben in horizontaler und vertikaler Richtung verkippen kann. Als Schirm diente uns die Unterseite einer Computertastatur, die in möglichst flachem Winkel in den Strahlengang gestellt wird, um die Interferenzmuster weit auseinander zu ziehen und damit leichter beobachtbar zu machen.

¹ Beim Michelson-Interferometer entsprechen also die beiden Spiegel den in 1.) genannten „reflektierenden Objekten“, die Oberfläche des einen Spiegels kann verkippt werden.

² Das heißt, wenn die Anordnung real betrieben wird, also die opt. Komponenten keine idealen Strahlengänge garantieren und die Anordnung nicht wie im Bild exakt rechtwinklig aufgebaut ist.

Solange nun beide Spiegel und der Strahlteiler exakt senkrecht im Strahlengang stehen, sollte man im Idealfall auf dem Schirm lediglich eine einheitlich rote Fläche sehen. In der Praxis treten jedoch, wie schon gesagt, immer Interferenzmuster auf, weil bereits Ungenauigkeiten/Verkippungen der optischen Komponenten in der Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Lichtes, hier 632,8nm, ausreichende Gangunterschiede verursachen. Für den folgenden Versuch spielt aber die absolute Anzahl an Interferenzstreifen keine Rolle, sondern man betrachtet die Änderung dieser Anzahl bei kleinen Verkippungen des variablen Spiegels um die vertikale Achse (vgl. dazu folgende Skizze).



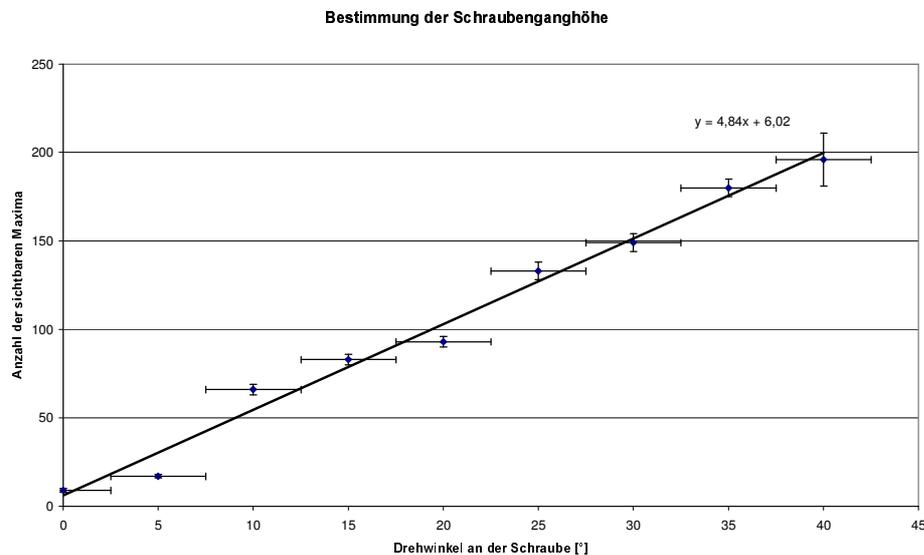
Zunächst stellt man dazu den zweiten Spiegel mittels der zwei dort angebrachten Schrauben (für horizontale/vertikale Verkippung) so ein, dass die Streifenzahl minimal wird und zählt die beobachteten Intensitätsmaxima. Hier und im Folgenden achtet man stets darauf, dass das gesamte Interferenzbild auf dem Schirm zu sehen ist und man es auch jeweils komplett auszählt. Der Spiegel wird dann durch Drehen an der „Vertikal-Schraube“ verkippt, und zwar dreht man die Schraube mit dem Inbusschlüssel immer um 5° weiter. Für jede Spiegelstellung (d.h. für jeden Schraubendrehwinkel α) wird dabei wieder die Zahl der Interferenzmaxima bestimmt.

Folgende Tabelle fasst unsere Ergebnisse zusammen:

α [°]	Zahl der Maxima
0	9 ± 1
5	17 ± 1
10	66 ± 3
15	83 ± 3
20	93 ± 5
25	133 ± 5
30	149 ± 5
35	180 ± 5
40	196 ± 15

Anmerkung: Gerade bei den größeren Winkeln ist das Auszählen der Maxima aufgrund der geringen Breite und Helligkeit relativ schwierig und es können durchaus Zählfehler auftreten. Daher haben wir jedes Interferenzmuster zweimal gezählt (jeder von uns einmal) und verwenden hier die Mittelwerte. Aus den jeweiligen Differenzen zwischen den beiden Zählungen wurden die Fehler abgeschätzt.

Tragen wir nun die Anzahl der Maxima gegen den Winkel α auf, so ergibt sich folgendes Diagramm.



Die Fehlerbalken in y-Richtung ergeben sich dabei aus obiger Tabelle. Weiterhin nehmen wir an, dass die Einstellung des Drehwinkels mit Hilfe von Geodreieck und Inbusschlüssel nur relativ unpräzise auf ca. ± 2 bis 3° erfolgen kann (im Diagramm entsprechen die Fehlerbalken daher $\pm 2,5^\circ$). Die Messung wurde bei $\alpha=40^\circ$ beendet, da die Streifendichte bei noch stärkerer Verkipfung so stark zunimmt, dass man das Muster kaum noch auszählen könnte.

Nun kann man zu diesem Wert (z.B. mit der linearen Regressionsfunktion eines Tabellenkalkulationsprogrammes) eine Regressionsgerade bestimmen. Dabei ergibt sich folgende Beziehung zwischen der Streifenzahl N und dem Winkel α :

$$N(\alpha) = 4,84 \cdot \alpha + 6,02$$

Weiterhin findet man für den weiter unten benötigten (statistischen) Steigungsfehler dieser Geraden

$$\Delta m = 0,22.$$

Überlegen wir uns nun, wie man aus diesem Ergebnis die gesuchte Ganghöhe der Stellschraube bestimmen kann. Dazu muss man beachten, dass ein Intensitätsminimum auf dem Schirm immer dann entsteht, wenn sich die Weglängen der Bündel an dieser Stelle gerade um $\lambda/2$ oder um ein ungeradzahliges Vielfaches davon unterscheiden. Betrachten wir nun die beiden Strahlen, die gerade an den Rändern des kippbaren Spiegels reflektiert werden. Sie interferieren mit den Randstrahlen des am festen Spiegel reflektierten Bündels. Ein Schraubenvorschub von $\lambda/2$ bewirkt nun aufgrund der zentralen Lagerung des Spiegels, dass der rechte Randstrahl (auf dieser Seite befindet sich die Schraube) einen um λ kürzeren Weg zurücklegen muss (Hin- und Rückweg!), während sich der Weg für den linken Randstrahl gerade um eine Wellenlänge vergrößert. Insgesamt erscheinen demzufolge bei der genannten Schraubendrehung zwei neue Interferenzstreifen auf dem Schirm.

Mit diesen Überlegungen lässt sich schließlich die gesuchte Ganghöhe berechnen. Dazu bestimmen wir aus obiger Geradengleichung zunächst die Anzahl ΔN der Streifen, die bei einer Umdrehung der Schraube (360°) dazukommen:

$$\Delta N = N(360^\circ) - N(0^\circ) \approx 1742 \pm 79$$

Der Fehler ergibt sich dabei sofort aus dem oben angegebenen Steigungsfehler der Regressionsgeraden.

Damit ergibt sich der Gewindevorschub bei einer vollen Umdrehung der Schraube, also die gesuchte Ganghöhe (der verwendete He-Ne-Laser hat wie erwähnt eine Wellenlänge von $\lambda=632,8\text{nm}$):

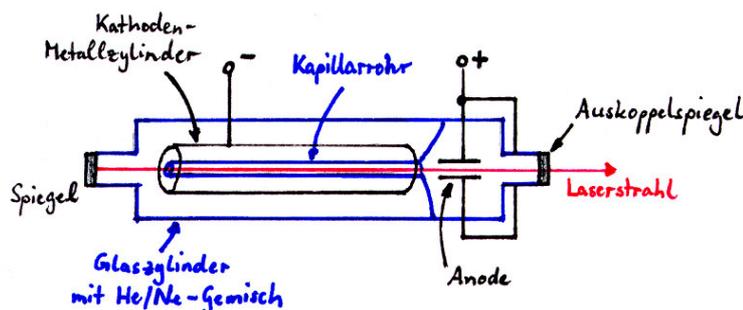
$$h = \frac{\Delta N}{2} \cdot \frac{\lambda}{2} \approx 0,28\text{mm} \pm 0,01\text{mm}$$

Offensichtlich liegt also der Normwert für eine solche Feingewindeschraube von $h=0,25\text{mm}$ nicht mehr im Bereich unseres Fehlers. Dabei muss man allerdings bemerken, dass der statistische Fehler der Regressionsgeraden auf einer einfachen Standardabweichung und damit lediglich auf einem Konfidenzniveau von 68,3% beruht. Mit einer höheren Sicherheit von 95,5% (doppelte Standardabweichung) erhält man einen so großen Fehler, dass der Normwert im Toleranzbereich liegt. Ferner geht in unsere Abschätzung ein möglicher systematischer Fehler nicht ein, den wir aber im Nachhinein nicht mehr beziffern können: Die gesamte Rechnung geht davon aus, dass die beiden Randstrahlen die gleiche Entfernung vom Zentrum des Spiegels haben, wie die Schraube. Leider können wir nicht mit Sicherheit ausschließen, dass dies in unserem Fall tatsächlich nicht so gegeben war.

2.2 Bestimmung der Kohärenzlänge des Lasers

Bekanntlich kann überhaupt nur dann Interferenz beobachtet werden, wenn das verwendete Licht eine ausreichend große Kohärenzlänge besitzt. Diese Kohärenzlänge und ihre Auswirkungen auf das Interferenzmuster soll im Folgenden untersucht werden.

Um zu verstehen, worin die Gründe für das in der eigentlichen Messung bestimmte Verhalten des Lasers liegen, ist es notwendig, sich die Funktionsweise des Gerätes vor Augen zu führen. Betrachten wir dazu die folgende Schemazeichnung eines He-Ne-Lasers:



Ein solcher Laser besteht aus einem mit einem Helium-Neon-Gasgemisch gefüllten Glaskolben, der beidseitig durch einen Spiegel verschlossen ist und in den zwei Elektroden eingeschmolzen sind. Ferner findet sich im Kolben noch ein dünnes Kapillarrohr aus Glas zwischen Anode und Kathode. Von den beiden Spiegeln ist einer praktisch vollständig reflektierend, der andere dient als sog. Auskoppelspiegel und transmittiert ca. 10% der auf ihn treffenden Lichtintensität. Ferner sind die Spiegel so beschichtet, dass sie bevorzugt Licht einer bestimmten Farbe reflektieren (im Falle eines He-Ne-Lasers Rot), das Licht anderer Farben wird (so gut wie technisch möglich) von der Reflexion ausgeschlossen.

Beim Einschalten des Lasers wird zunächst eine hohe Gleichspannung (ca. 12 000 V) zwischen Anode und Kathode angelegt. Diese führt zu einer Gasentladung durch die Kapillare, wobei E-

lektronen in Gasatomen auf höhere Energieniveaus angeregt werden. Diese Gasentladung brennt während des Betriebs stationär, wobei die Spannung nach dem Zünden auf etwa 2500V reduziert werden kann. Es kommt zu einer Besetzungsinversion, d.h. die Mehrzahl der Atome befindet sich schließlich im angeregten Zustand.

Wenn nun ein Atom wieder in den Grundzustand übergeht, sendet es Licht einer bestimmten Wellenlänge (die etwa der Energie der Anregung entspricht) aus. Ein entsprechendes Photon kann dann auch andere noch angeregte Atome ebenfalls zu (kohärenter) Emission von Licht der gleichen Wellenlänge stimulieren, wodurch es zu einer Steigerung der Intensität kommt. Dieser Effekt wird dadurch noch verstärkt, dass das Licht zum größten Teil zwischen den beiden Spiegeln hin- und herläuft, so dass seine Intensität weiter zunimmt (immer mehr Atome werden zur Emission stimuliert; die Gasentladung sorgt dafür, dass aber stets genug Atome im angeregten Zustand vorhanden sind). Lediglich der vom Auskoppelspiegel transmittierte Teil ist der dann schließlich nutzbare Strahl.

Grundsätzlich ist es natürlich möglich, dass verschiedene Elektronenübergänge in den Gasatomen auftreten und daher auch Licht unterschiedlicher Wellenlängen emittiert wird. Allerdings wird durch die erwähnte Beschichtung der Spiegel erreicht, dass praktisch nur das Licht aus einem bestimmten Übergang die beschriebene Verstärkung erfährt. Aus diesem Grund ist das vom Laser emittierte Licht in erster Näherung monochromatisch.

Bei näherer Betrachtung allerdings ist aufgrund der Unschärferelation und anderen Effekten (in erster Linie wegen Dopplereffekt) auch das aus einem bestimmten Übergang stammende Licht nicht exakt monochromatisch, sondern die Linie hat eine bestimmte Breite³. Allerdings können im Laserresonator (so nennt man die gesamte Anordnung mit den beiden Spiegeln) nicht alle Wellenlängen dieser Linie in gleicher Weise verstärkt werden. Vielmehr kommt es nur dann zur Verstärkung, wenn sich die an den Spiegeln einlaufenden und reflektierten Wellen nicht durch Interferenz selbst auslöschen. Dazu muss zwischen der Länge des Resonators L (=Abstand der bei-

den Spiegel) und der Frequenz die Beziehung $\nu = n \cdot \frac{c}{2L}$ ($n \in \mathbb{N}$) gelten (c : Lichtgeschwindig-

keit). Die Frequenzen ν für die das gilt werden als longitudinale Moden bezeichnet. Damit ist klar, dass es zwar grundsätzlich unendlich viele solche Moden gibt, dass aber nur diejenigen anschwingen können und verstärkt werden, deren Frequenz innerhalb der Breite der vom ursprünglichen Elektronenübergang ausgesandten Linie liegt. Bei einem He-Ne-Laser sind dann zum Beispiel drei bis vier Moden im Laserlicht enthalten (eine Hauptmode mit höchster Intensität und zwei oder maximal drei mit niedrigerer Intensität). Damit ist das Laserlicht nicht monochromatisch, sondern enthält mehrere diskrete Wellenlängen. Der Frequenzabstand dieser Moden ist, wie

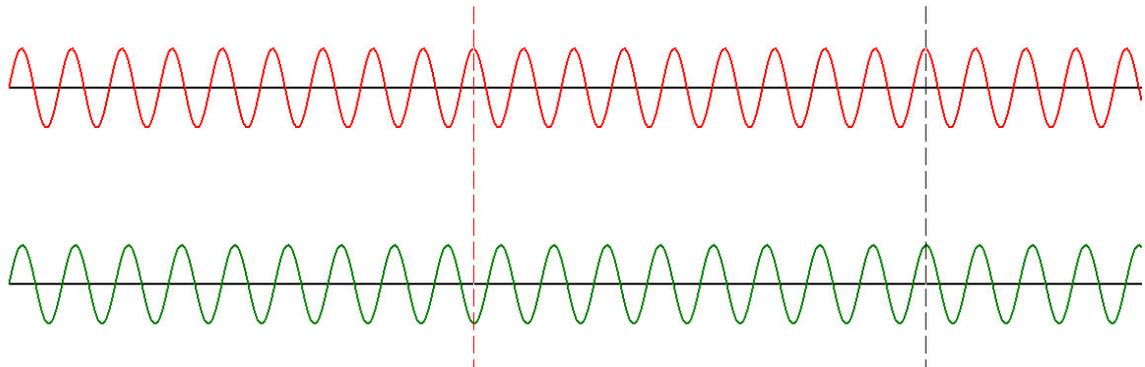
man leicht aus obiger Resonanzbedingung erkennt, konstant: $\Delta\nu = \frac{c}{2L}$.

Bei einem Interferenzexperiment erzeugt nun jede dieser Moden sozusagen ein eigenes Interferenzmuster. Diese Muster liegen aufeinander, wenn die beiden Interferometerarme exakt gleich lang sind, da die Wellenlängen so gut wie gleich sind, und damit auch die Interferenzeffekte an den Schirmpunkten⁴. Bei unterschiedlichen Armlängen hingegen kommt es durch die ganz geringfügig verschiedenen Wellenlängen dazu, dass sich die Muster gegeneinander verschieben.

³ Den Teil der Linienbreite, der durch die Unschärferelation verursacht wird, nennt man auch **natürliche Linienbreite**.

⁴ Dies macht man sich folgendermaßen klar: Im Grundzustand (Arme gleich lang, Spiegel nicht verkippt, Optik ideal) sind die Ganglängen zweier auf dem Schirm zusammentreffender Strahlen einer Wellenlänge (von Spiegel 1 und Spiegel 2 den Strahlteiler und dann den Schirm erreichend) gleich, d.h. das ist der Fall konstruktiver Interferenz an allen Schirmpunkten. Wird einer der Spiegel nun verkippt, so ist allein das Verhältnis der dadurch erzeugten Gangunterschiede zur Wellenlänge entscheidend für den Interferenzeffekt, und alle Wellenlängen sind ja so gut wie gleich. Es entstehen also für die verschiedenen Moden gleiche Interferenzeffekte.

Warum? Betrachten wir zunächst einen Extremfall: Es kann passieren, dass eine gewisse Armlängenerhöhung (eines Armes) für eine Wellenlänge λ_1 einen zusätzlich eingeführten Gangunterschied⁵ (Achtung: Hin- und Rückweg rechnen!) von $n \cdot \lambda_1$, für eine andere Wellenlänge λ_2 aber einen Gangunterschied von $n \cdot \lambda_1 + \lambda_2/2$ bedeutet. Das heißt, dass sich das Interferenzmuster für die Mode mit λ_1 in diesem Falle nicht ändert, sich das Muster für λ_2 aber invertiert, wodurch statt eines Musters dann (bei gleicher Intensität der Moden) nur noch eine einheitliche rote oder schwarze Fläche zu sehen wäre. Die folgende Abbildung stellt diesen Extremfall für zwei Wellen geringfügig verschiedener Wellenlänge noch einmal bildlich dar, wobei Phasensprünge am Spiegel nicht mit betrachtet werden⁶. Auch sind die Wellen ohne Armverlängerung nicht zwangsläufig am Spiegel bei gleicher Armlänge gleichphasig, wie im Bild im Ursprung.



Es ist jedoch klar, dass es hier nicht auf diese „initiale Phase“ im Bild ankommt, sondern auf die zusätzliche *Ganglängendifferenz*, die durch die Erhöhung der Länge eines Armes eingeführt wird, und genau das soll man am Bild sehen: Ist die Ganglängenerhöhung im Bild gleich der Entfernung von links bis zur roten Linie, so ist der Extremfall von oben erreicht. Man kann sich an der Zeichnung auch qualitativ klar machen, was passiert, wenn man im Versuch einen Arm von der Ausgangsposition „gleiche Armlänge“ an zusätzlich verlängert, indem man den justierbaren Spiegel auf dem Versuchsbrett nach hinten rückt: Die einzelnen Interferenzbilder für die verschiedenen Wellenlängen liegen am Anfang optimal und mit wachsender Verlängerung immer schlechter übereinander. Dadurch nimmt der Kontrast (im Folgenden auch mit „Qualität“ bezeichnet) des Bildes ab und erreicht schließlich ein Minimum im oben beschriebenen extremalen Fall (er verschwindet jedoch nicht ganz, da im realen Fall die unterschiedlichen Moden und damit deren Interferenzbilder unterschiedliche Intensität haben). Erhöht man alsdann die Armlänge noch weiter, so wird das Bild wieder besser, bis bei der Ganglängendifferenz an der schwarzen Markierung im Bild die Auswirkungen der Verschiebung auf die Wellen mit λ_1 , λ_2 wieder synchron sind und die Qualität in etwa der von ganz am Anfang entspricht.

Die Ganglängenerhöhung, bei der das **erste** Qualitätsminimum für das Bild auftritt, wird in der Lasertechnik als Kohärenzlänge bezeichnet⁷.

Wir wollen nun die Kohärenzlänge unseres Lasers mithilfe des schon aufgebauten Michelson-Interferometers nach dem gerade beschriebenen Prinzip bestimmen. Hierzu haben wir im Versuch zunächst den verstellbaren Spiegel gleich weit entfernt vom Strahlteiler wie den arretierten auf der Versuchsplatte verschraubt und ihn dann so verkippt, dass ein deutlich erkennbares Muster mit relativ wenigen Streifen auf dem Schirm zu sehen war. Dann haben wir den verstellbaren

⁵ (zwischen den einzelnen Strahlen von Spiegel 1 und den damit jeweils interferierenden Strahlen von Spiegel 2)

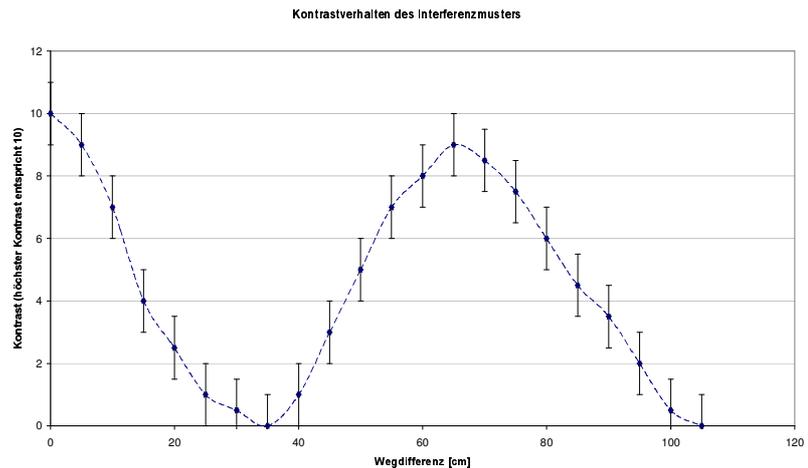
⁶ Der Phasensprung findet an beiden Spiegeln in gleicher Weise statt. Also ist das Interferenzbild, das man mit Beachtung des Phasensprunges bekommen würde genau das, was man sich ohne Beachtung des Phasensprunges an beiden Spiegeln überlegt.

⁷ Im Allgemeinen bezeichnet man in der Physik dagegen den maximalen Wegunterschied, bei dem noch Interferenz beobachtet werden kann, als Kohärenzlänge.

Spiegel sukzessive immer um einen Rasterabstand weiter weg vom Strahlteiler fixiert und die Qualitätsveränderung des Bildes mit wachsendem Abstand beurteilt. Nach einem Testdurchlauf, in dem wir uns das Qualitätsspektrum bewusst gemacht haben, begann dann die eigentliche Aufzeichnung der Qualitäts-Mess- bzw. Schätzreihe: Jedem Wert für die Ganglängendifferenz von n-5cm (Lochrasterabstand der Platte: 2,5cm; Hin- und Rückweg beachten!) wurde ein Qualitätswert für das Bild von 0-10 (0: maximal schlecht, 10: maximal gut) zugewiesen.

Heraus kamen folgende Werte und das zugehörige Diagramm:

Wegdifferenz [cm]	Kontrastqualität
0	10
5	9
10	7
15	4
20	2,5
25	1
30	0,5
35	0
40	1
45	3
50	5
55	7
60	8
65	9
70	8,5
75	7,5
80	6
85	4,5
90	3,5
95	2
100	0,5
105	0



Den Fehler für die Wegdifferenz wurde haben wir mit $\pm 2\text{mm}$ abgeschätzt (wobei die Fehlerbalken im Diagramm kaum noch sichtbar sind). Hierbei nehmen wir den Lochabstand auf dem optischen Tisch als fehlerlos an (er dürfte hinreichend exakt sein) und berücksichtigen nur die Genauigkeit, mit der der Spiegel immer an der gleichen Stelle des Langloches verschraubt wurde. Die sehr subjektive Bewertung des Kontrasts auf der Skala rechtfertigt einen Fehler von ± 1 in y-Richtung.

Die entstandene Kurve hat ihr erstes Minimum bei einer Wegdifferenz von:

$$\Delta x = 35\text{cm (Kohärenzlänge),}$$

wobei hier bei einem Blick auf die Fehlerbalken natürlich gesagt werden muss, dass der Fehler für die Kohärenzlänge (denn das Minimum könnte ja auch an anderen Stellen sein, wo die Fehlerbalken zumindest so weit hinunterreichen, wie der Fehlerbalken bei 35cm nach oben reicht) zu

$$\Delta(\Delta x) = +5\text{cm} / -10\text{cm}$$

abzuschätzen ist.

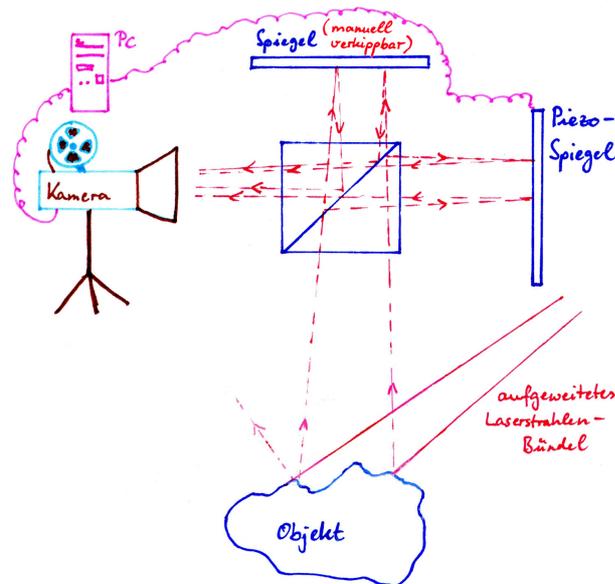
Man sieht an der Kurve sehr schön, dass – wie schon oben erklärt – nach dem ersten Qualitätsminimum wieder nach einigem Verschieben ein Maximum folgt usw.

2.3 Speckle-/Shearing-Interferometer: Funktionsweise und Anwendung im Versuch

Das Shearing-Interferometer konnte leider aufgrund Zeitmangel nicht mehr von allen Gruppen aufgebaut werden, somit haben wir nur bei einem Experiment damit zugehört. Dennoch wollen wir im Folgenden die Arbeitsweise erklären.

Mittels der Shearing-Interferometrie ist es z.B. möglich, Verformungen von Objekten unter Krafteinwirkung zu vermessen. Das soll hier auch an einem Aluminiumklotz, der durch Festziehen einer eingebauten Mikrometerschraube verformt werden kann, demonstriert werden.

Wir machen uns zunächst wieder den Aufbau dieses Interferometers anhand folgender Skizze klar:



Das Licht, das in den Strahlteiler eingestrahlt wird, kommt nun nicht mehr wie beim Michelson-Interferometer von einer Linse, die die Laserstrahlen nach der Aufweitungsoptik kollimiert, sondern von dem zu untersuchenden Objekt, das direkt aus dem Aufweitungssystem genommenes Laserlicht in den Strahlteiler hineinreflektiert. Dennoch ist das Funktionsprinzip insofern ähnlich dem des Michelson-Interferometers, als auch hier zwei Spiegel das Licht auf den Strahlteiler zurückwerfen, von denen einer mechanisch und der andere elektrisch (!) justierbar ist (Piezo-Spiegel). Die entstehenden Strahlengänge sind mannigfaltig; das vom Strahlteiler kommende Licht bzw. zumindest ein Ausschnitt davon erreicht schließlich eine CCD-Kamera, deren Bilder direkt zu einem PC übertragen werden. Das Programm, das die Bilder auswertet, ist auch in der Lage, den Piezo-Spiegel anzusteuern und in kleinsten Schritten zu **verschieben**.

Grundsätzlich ist es nun plausibel, dass eine (relativ kleine) Änderung der Objektoberfläche Gangdifferenzen in den betroffenen Strahlengängen bewirkt und somit eine zumindest lokale Veränderung des Interferenzbildes zur Folge hat. Die geänderten Bilder soll das Auswerteprogramm aufnehmen, mit den vorherigen vergleichen und daraus die Verformung quantifizieren bzw. entsprechende Diagramme ausgeben.

Besonders einfach wird die Berechnung der Verformung, wenn die sich an einem Punkt im Interferenzmuster ergebenden zusätzlichen Gangdifferenzen den Distanzen, um die die Oberflächenteile gewölbt werden, entsprechen. Das erreicht man folgendermaßen: Zunächst lässt man die Bilder der Kamera, die weit genug vom Objekt entfernt sein muss, damit sie scharfgestellt werden kann, live vom PC darstellen, und stellt das Objektiv scharf. Dann wird mittels der Inbusschrauben am manuell verstellbaren Spiegel zunächst das vom einen Spiegel kommende Bild mit dem anderen in Deckung gebracht; schließlich verschiebt man mittels der Höhenschraube an demselben Spiegel die Bilder so gegeneinander, dass ein Bild von der Unterseite des Objekts (hier: Alu-

Blocks) mit einem von der Oberseite überlagert wird. Da die Unterseite des Blocks von der oben angebrachten Mikrometerschraube quasi nicht verformt wird, stellt das Bild der Unterseite also eine statische Referenz für die Verschiebungen dar; der oben angesprochene Fall ist erreicht. Man nennt das Interferometer dann auch Speckle-Interferometer. Kann man diesen Vorteil nicht erreichen, hat man also ein Shearing-Interferometer, in dem zwei nicht unabhängige Bilder überlagert werden, so bekommt man in der Auswertung nicht das Verformungsprofil, sondern dessen erste Ableitung.

Jetzt aber zur weiteren Ausführung unseres Interferometrie-Experiments:

Zunächst weiß das Programm natürlich nicht, welche Intensitätsverschiebung durch eine gewisse Veränderung der Gangdifferenz ausgelöst wird. Daher wird das Programm zunächst kalibriert, d.h. der Computer verschiebt den Piezospiegel selbstständig in kleinen Schritten und registriert dabei, welche Intensitätsverschiebungen bei welcher Ganglängendifferenz, die durch die Verschiebung erzeugt wird, auftreten. Vor der Kalibration ist die Blende der Kamera so einzustellen, dass möglichst wenig Übersteuerungen (rote Flecken) im Livebild auf dem PC auftauchen. Während des Kalibrationsprozesses muss man im Raume Ruhe wahren, um Erschütterungen zu minimieren; auch ist jegliche Bewegung der Luft zu vermeiden, da unterschiedliche Luftdichten einen unterschiedlichen Brechungsindex im Raum zur Folge haben. Beachtet man dies nicht, so ist das Interferenzbild während der Kalibration zu instabil, und die Kalibrationskurve, die vom Computer aufgenommen wird, ist verrauscht. Auch im weiteren Vorgehen ist darauf zu achten, dass die Versuchskonstellation (bis auf die Verformung des Alublocks, die wir dann messen wollen) unverändert bleibt.

Ist die Kalibration beendet, so muss zuerst der Zustand des Bildes bei unverformtem Alublock als Referenz vom Programm aufgenommen werden. Nach einem Klick auf die hierfür vorgesehene Schaltfläche „beobachtet“ das Programm auch gleich in Echtzeit alle vom Referenzpunkt aus auftretenden Veränderungen im Bild; man sieht das Livebild dabei im Programm. Man dreht nun die Mikrometerschraube am Block hinein, bis eine deutliche Veränderung sichtbar ist, und speichert dann den aktuellen Verformungszustand. Aus dem aufgenommenen Bild können nun beliebige interessante Bereiche ausgewählt und weiterverarbeitet werden; neben einer Kontrastfilterung bietet das Programm dann eine vollständige Auswertungsmöglichkeit mit der Funktion „Demodulieren“, die direkt ein Höhenprofil aus den Messungen errechnet. Dieses kann man als Schnitt inkl. μm -Skala oder aber als 3D-Plot visualisieren lassen.

3. Resümee

Insgesamt kann man aus dem Versuch mitnehmen, dass – wie schon eingangs angedeutet – das Verfahren der Interferometrie seinen Vorteil darin hat, dass durch die Erzeugung eines Interferenzbildes sehr kleine Gangunterschiede im Lichtweg (z.B. durch Verformung des hier untersuchten Alublocks) in sehr große Farbunterschiede im Interferenzbild umgesetzt werden. Dies bewirkt eine sehr viel größere Messgenauigkeit für Verformungen, als bei „direkten“ Messverfahren, mit denen man Oberflächen untersuchen könnte. Der Computer kann laut Anleitung so viele Helligkeitsstufen im Interferenzbild unterscheiden, dass es noch möglich ist, Verformungen auf ca. $1/10$ der Wellenlänge, d.h. grob 50nm , genau zu messen. Verglichen mit der Messgenauigkeit lohnt sich also der Aufwand des Versuchsaufbaus. Selbst bei händischem Auszählen der Interferenzstreifen, wo man also nur zwischen zwei Helligkeitswerten (hell/dunkel) unterscheidet, liegt die Maximalgenauigkeit der Gangunterschiedsmessung noch ungefähr in der Größenordnung der Laserwellenlänge.