

Versuch 18: Interferometrische Längenmessung am Beispiel der Magnetostriktion

Im Versuch wird ein Michelson-Interferometer aufgebaut und Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke erzeugt. Das Interferometer wird zur Messung kleiner Längendifferenzen eingesetzt. Dies wird hier am Beispiel der Magnetostriktion (das ist die Längenänderung ferromagnetischer Stoffe bei Änderung ihrer Magnetisierung) demonstriert. Durch den Aufbau des Interferometers mit Hilfe eines Lasers soll die Wirkungsweise eines Lasers kennengelernt werden. (Schwerpunkt dieses Versuches ist die Funktionsweise eines Lasers sowie der Aufbau eines Interferometers und nicht die Magnetostriktion!)

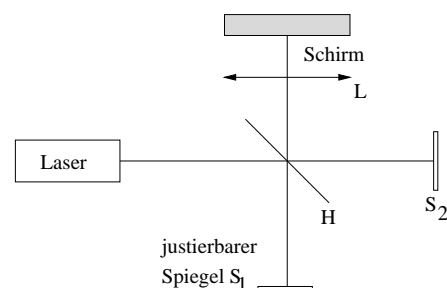
Vorkenntnisse

Interferenz – Kohärenz – Kohärenzlänge – Kohärenzzeit – Kohärenzbedingung (Größe der Lichtquelle, Öffnungswinkel, Wegunterschied der beiden interferierenden Wellenzüge) – Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke – Newtonsche Ringe – Interferometer (Michelson-Interferometer, Fabry-Perot-Interferometer) – Laser – magnetische Feldstärke – magnetische Suszeptibilität – Entmagnetisierungsfaktor

Physikalische Grundlagen

Aufbau des Michelson-Interferometers

Durch Spiegelung des Spiegels S_1 am halbdurchlässigen Spiegel H entsteht bei S_2 eine Interferenz erzeugende Schicht, wie sie bei Interferenzen an Platten unter den Überschriften „Interferenzen gleicher Neigung“ und „Interferenzen gleicher Dicke“ behandelt werden. (Bei Interferenzen gleicher Neigung bezieht sich diese auf die Lichtstrahlen, man muss also divergierende Strahlen verwenden, während bei Interferenzen gleicher Dicke paralleles Licht benötigt wird.)



Je nach Stellung des Spiegels S_1 bewirkt dabei seine Bewegung auf H zu ein Herausquellen oder Verschwinden der Interferenzringe gleicher Neigung in der Mitte, weil die „Luftplatte“ $|S_1H| - |S_2H|$ dünner oder dicker wird. *Man überlege sich diesen Zusammenhang genau!*

Besonderheiten bei der Verwendung von Laserstrahlen

Sehr gut kohärentes und paralleles Licht bewirkt, daß man die Interferenzen ohne Scharfstellung auf diese Ebenen einfach mit einem Schirm auffangen kann. (Zum Vergleich sehe man sich die Entstehung von Interferenzringen gleicher Neigung beim Pohlschen Interferenzversuch mit der Glimmerplatte an. Siehe z. B. Pohl, *Einführung in die Physik*, Bd. III.)

Experiment

Versuchsaufbau

Laser

Als Lichtquelle für die Interferometeranordnung wird ein He-Ne-Gaslaser verwendet, der ein scharf begrenztes, sehr schmales Bündel Licht liefert. Es zeichnet sich durch Monochromasie ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$), hohe zeitliche und räumliche Kohärenz, Parallelität und hohe Intensität aus. Der Aufbau und die Wirkungsweise von Lasern (Laser steht für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) ist in den Lehrbüchern (z. B. Pohl, *Einführung in die Physik*, Bd. III und Bergmann-Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Bd. III) sowie im Anhang dargestellt. Der Vorteil des Gaslasers liegt vor allem in der Möglichkeit des kontinuierlichen Betriebes. Zur Herstellung von um Größenordnungen intensiverer Strahlung verwendet man Festkörperlaser, die aber nur im gepulsten Betrieb verwendet werden können.

Das Michelson-Interferometer

Dieses Gerät, das zum Nachweis geringer optischer Wegdifferenzen des Lichts etwa infolge von Längen- oder Brechzahländerungen dient, wird in allen Lehrbüchern ausführlich behandelt, so dass hier nur auf einige Besonderheiten, vor allem beim Betrieb mit dem Laser, hingewiesen wird. Wegen der enorm großen Kohärenzlänge des Laserlichts dürfen sehr große Wegdifferenzen der zur Interferenz gebrachten Lichtstrahlen auftreten. Die optischen Wege l_1 und l_2 müssen also nicht, wie bei der Beleuchtung mit Spektrallampen üblich, mit Hilfe von Kompensatorplatten ungefähr gleich gemacht werden. Die Justierung des Gerätes gestaltet sich mit einem Laser als Lichtquelle besonders bequem. Je nach Beleuchtungsart und Spiegeljustierung lassen sich die Interferenzstreifen gleicher Dicke (Interferenzen am Keil) und gleicher Neigung (Haidingerringe, Interferenzen an planparallelen Platten) einstellen (siehe unten). Wird einer der beiden Spiegel, etwa S_2 um eine kleine Längendifferenz verschoben, so bewegt sich das Interferenzbild. Im Versuch soll die Magnetostriktion nachgewiesen werden. Als Magnetostriktion wird die Längenänderung ferromagnetischer Stoffe aufgrund einer Änderung ihrer Magnetisierung bezeichnet. Sie beruht auf der Abstandsabhängigkeit der magnetischen Wechselwirkungskräfte im Festkörper und kann sowohl ein positives wie auch ein negatives Vorzeichen aufweisen. Zur Messung der Längenänderung ist der Spiegel eines Interferometerarmes an einem Ende eines Stabes aus Nickel befestigt, der am anderen Ende fest eingespannt ist. Mit Hilfe einer stromdurchflossenen Spule wird der Nickelstab magnetisiert, wobei er seine Länge geringfügig ändert, was man am Verschieben der Interferenzringe beobachten und quantitativ messen kann. Man überlege sich, welcher Längenänderung das Verschwinden eines Interferenzringes entspricht und ob dies eine Verlängerung oder eine Verkürzung des Stabes bedeutet.

Versuchsaufgaben

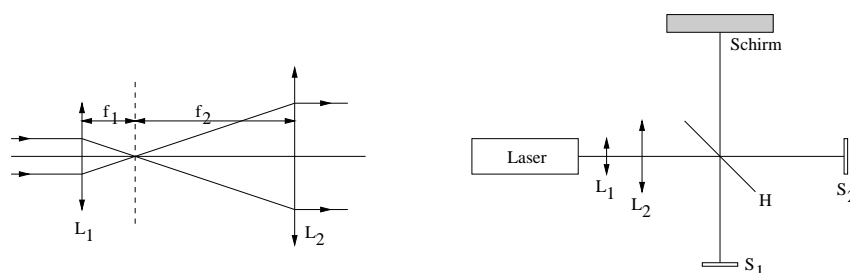
1. Justieren des Interferometers

Das Interferometer soll auf zwei verschiedene Arten justiert werden:

(a) Justierung ohne Strahlverbreiterung

1. Der Laser ist dicht vor die V-Schiene zu stellen und so zu justieren, dass der Strahl parallel zur Schiene verläuft und die Mitte des Spiegels S_2 trifft. Die Parallelstellung lässt sich leicht prüfen, indem der Laserkopf um eine horizontale Achse geschwenkt und der Strahl entlang der V-Schiene verfolgt wird. Der Spiegel S_2 soll etwa 2 cm vom Ende der V-Schiene entfernt stehen; durch leichtes Hin- und Herschieben und Andrücken bringt man ihn in guten Kontakt mit der Unterlage.
2. Auf dem Spiegel und auf der Strahlteilerplatte (ebenso am Ausgang des Lasers) erkennt man im allgemeinen einen starken und mehrere schwache Leuchtpunkte. (Stichwort: Auto-kollimation.) Sie sind zur Deckung zu bringen, indem mehrmals abwechselnd a) am Laserkopf, b) an den Justierschrauben des Interferometertisches und c) an den Schrauben des Spiegels S_1 gedreht wird. Man erhält schließlich eine kometenähnliche Form des Leuchtflecks, der *nicht* im Zentrum des Spiegels S_2 zu sitzen braucht.
3. Man stellt das Projektionsobjektiv L so in den Strahl, dass seine optische Achse mit dem Lichtstrahl zusammenfällt und fängt das vergrößerte Interferenzstreifenbild (Interferenzen gleicher Dicke) mit dem Schirm (Wand) auf.
4. Durch vorsichtiges Drehen an den Justierschrauben des Spiegels S_1 kann man die Interferenzstreifen wandern lassen. Dabei ändert sich der Keilwinkel der Luftschicht zwischen den Interferenzspiegeln, so dass sich die Linienabstände verändern. Mit vorsichtiger Justierung kann man es sogar erreichen, dass man nur einen einzigen Interferenzstreifen erhält.
5. Man beschreibe und begründe die Beobachtungen beim Variieren des Keilwinkels und die Instabilität des Interferenzbildes.

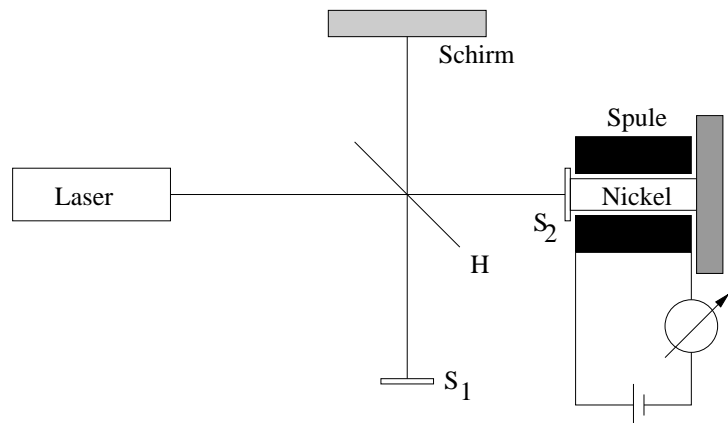
(b) Justierung mit Strahlverbreiterung



Hier soll mit zwei verschiedenen Arten der Aufspaltung gearbeitet werden.

1. Parallelstrahl:

Mit Hilfe zweier Linsen L_1 und L_2 wird der Laserstrahl verbreitert (siehe Abbildung oben). Die kleine Linse steht dabei nah am Ausgang des Lasers. Mit einem Papier kann der Strahl entlang der V-Schiene verfolgt werden. Der Laserkopf muss gegebenenfalls nachjustiert werden; vorher sollte man jedoch versuchen, durch Drehen der Linsen den Strahl optimal einzustellen. Schließlich sind die beiden Teilstrahlen mit Hilfe des Spiegels S_1 wieder zur Deckung zu bringen, so dass die Interferenzstreifen (Linien gleicher Dicke) erscheinen.



2. Divergender Strahl:

Aus der vorherigen Anordnung lässt sich sofort dieser Fall einstellen, indem L_2 einige cm verschoben wird. Als Interferenzfigur entstehen konzentrische Ringe (Ringe gleicher Neigung), die sich durch vorsichtiges Justieren von S_1 in die Mitte des Leuchtfleckes bringen lassen.

3. Man beschreibe und begründe die Beobachtungen beim Variieren des Strahlen.

2. Messung der Magnetostriktion

Die Magnetostriktion soll mit der zuletzt eingestellten Justierung, den Ringen gleicher Neigung, beobachtet werden. Dabei wird der Spiegel S_2 durch den mit einer Spule umwickelten Nickelstab ersetzt. An dem neuen Spiegel am Ende dieses Stabes ist zuerst wieder der Interferenzfall einzustellen (s. o.). Wird dann die Magnetisierung des Nickelstabes durch das magnetische Feld der Zylinderspule geändert, so bewegen sich die Interferenzstreifen, wobei in der Mitte immer neue Ringe herausquellen oder verschwinden. Man überlege sich *vorher* die genauen Zusammenhänge!

Zur quantitativen Bestimmung der Magnetostriktion trägt man in einem Diagramm die Zahl der im Zentrum entstandenen und verschwundenen Ringe gegen den Spulenstrom auf. Die magnetische Feldstärke H ist diesem Strom proportional. Das effektive Feld im Ni-Stab lässt sich angenähert angeben:

$$H_i = H_{\text{Spule}} \cdot \frac{1}{1 + \chi \cdot N} = I \cdot \frac{n}{L} \cdot \frac{1}{1 + \chi \cdot N}$$

mit

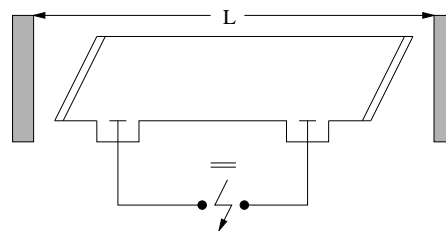
- χ : magnetische Suszeptibilität (hier: $\chi \approx 20$)
- I : Spulenstrom
- n/L : Windungsdichte der Spule
- N : Entmagnetisierungsfaktor (hier: $N \approx 0,002$)

Man messe einmal mit zunehmendem Strom und gleich anschließend mit abnehmendem. Wieder holen Sie die Messung. Der Strom ist *möglichst kurzzeitig* einzuschalten, um eine Erwärmung des Ni-Stabes zu vermeiden. Der Effekt der Wärmeausdehnung ist abzugeschätzt (linearer Ausdehnungskoeffizient von Nickel: $\alpha \approx 13 \cdot 10^{-6} K^{-1}$).

Geben Sie die relative Längenänderung $\delta L/L$ bei der größten erreichten Feldstärke sowie die relative Längenänderung pro Feldstärkeeinheit bei kleiner und großer Feldstärke an.

Anhang – Der He-Ne-Laser

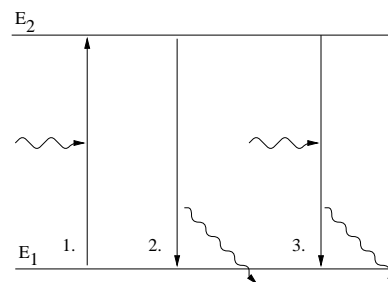
In einem Glasrohr, das mit einem He-Ne-Gemisch gefüllt ist (Verhältnis He:Ne = 7:1, Druck ca. 0,1 mbar), brennt durch Anlegen einer Hochspannung eine Gasentladung. Das Rohr ist an seinen Enden mit 2 planparallelen Fenstern abgeschlossen, die zur Herabsetzung der Reflexionsverluste und zur Einstellung einer Polarisationsrichtung unter dem Brewster-Winkel (siehe Versuch „Fresnelsche Formeln“) gegen die Rohrachse geneigt sind.



Die Röhre steht zwischen zwei Fabry-Perot- Interferenzspiegeln, die sehr genau planparallel einjustiert sein müssen. Sie bilden einen optischen Resonator, in dem sich eine stehende elektromagnetische Welle der durch die Länge L bestimmten Frequenz ausbildet. Die physikalischen Vorgänge zur Erzeugung dieser Welle sind dabei folgende:

Bekanntlich nehmen die Elektronen in Atomen und Molekülen bestimmte diskrete Energiewerte an. Dabei gibt es für jedes Elektron neben seinem niedrigsten Energieniveau mehrere höhere, sogenannte angeregte Zustände. Zwischen angeregten Zuständen gibt es drei Arten von Übergängen:

1. Absorption eines Energiequants $\Delta E = h \cdot \nu$ hebt ein Elektron in ein höheres Niveau (erzeugt angeregte Zustände).
2. Spontane Emission eines Energiequants nach statistischen Gesetzen. Sie liefert die Spektrallinien (vernichtet angeregte Zustände).
3. Induzierte Emission - Abstrahlen von Energie bei Einwirken von äusserer Strahlung.



Der Vorgang 1. kann neben rein optischer Absorption von Wellen gleicher Frequenz (Resonanzabsorption) auch durch die Temperaturbewegung stattfinden: Bei der energetischen Wechselwirkung („Stoß“) zweier sich nähernder Atome kann ein Elektron des einen Atoms den erforderlichen Energiebetrag aus der thermischen kinetischen Energie des anderen Atoms aufnehmen. Wegen Vorgang 2. stellt sich ein thermisches Gleichgewicht der Besetzungen von E_2 und E_1 ein.

Das ist das Prinzip einer leuchtenden Gasflamme. Zwischen den einzelnen Stößen besteht hier keine Kohärenz. Das Prinzip des Lasers bzw. Masers besteht nun darin, zunächst eine stärkere Besetzung des höheren Energieniveaus zu erzeugen, als es dem thermischen Gleichgewicht entspricht („Besetzungsinversion“). Bei Einstrahlung einer geeigneten Frequenz wird dann durch induzierte Emission (Vorgang 3.) der Übergang zum tieferen Zustand für alle angeregten Atome praktisch gleichzeitig erzwungen, wobei auch die Phasenbeziehung erhalten bleibt. Auf diese Weise entsteht ein sehr intensiver und kohärenter Lichtstrahl.

Die erforderliche Überbesetzung des oberen Energieniveaus des Neons (vgl. das stark vereinfachte Termschema) wird beim He-Ne-Laser mit Hilfe der Gasentladung erreicht: Bei einer Gasentladung bewegen sich Elektronen und positive Ionen in einem elektrischen Feld. Die Elektronen bewegen sich aufgrund ihrer geringen Masse schneller. Sie stoßen deshalb sehr häufig mit Ionen und neutralen Atomen zusammen und übertragen ihre Energie durch Stöße (s. o.) auf ein gebundenes Elektron.

So regen Elektronenstöße zunächst das He-Atom an, d. h. ein Elektron des He-Atoms wird durch einen Stoß eines frei fliegenden Elektrons vom Grundzustand $1s$ in den höheren Energiezustand $2s$ gehoben. Das angeregte He-Atom kann seine Energie durch sogenannte Stöße zweiter Art

(Stöße, bei denen Anregungsenergie ohne Strahlung übertragen wird) auf Neon übertragen. Nun liegen angeregte Ne-Atome vor, deren Elektronen im Zustand 2s und 3s sind. Beim Neon ist die Übergangswahrscheinlichkeit vom Niveau 2s nach 2p und von 3s nach 2p relativ klein und die Lebensdauer von 2p viel kleiner als die von 2s und 3s.

Das System reichert sich daher mit Atomen der Anregungszustände 2s und 3s an, entsprechend unserer Forderung für den Laserbetrieb nach einer stärkeren Besetzung des höheren Energieniveaus, als es dem thermischen Gleichgewicht entspricht. Die Übergänge von 3s bzw. 2s nach 1s sind nach ... verboten. Bei Einstrahlung einer Frequenz ν , die dem Energieunterschied $\Delta E = h \cdot \nu$ von 2s (bzw. 3s) nach 2p entspricht, wird die Spektrallinie durch die nun zusätzlich eintretende induzierte Emission verstärkt. Nur die Linie $\lambda = 632,8\text{nm}$ des Übergangs 3s nach 2p liegt dabei im Sichtbaren. Die enorme Steigerung der Intensität im Laser wird erreicht, indem man das Rohr zwischen zwei Interferenzspiegel bringt. Diese Wirkung kommt dadurch zustande, daß die von den Atomen ausgehende stimulierte Emission, die selbst von der stimulierenden Schwingung gesteuert wird, mehrmals zwischen den beiden Spiegeln (wie in einem Fabry-Perot-Interferometer) hin- und herpendelt. Dadurch wirkt diese ursprünglich stimulierte Strahlung selbst wieder als stimulierende Strahlung auf die Atome des Lasermaterials ein, so daß ein Teil der so entstandenen Emission zur Anregung neuer Emission dient, was eine Art Rückkopplung zwischen stimulierter Emission und emittierenden Atomen darstellt. Das führt dazu, daß nur eine solche Strahlung verstärkt wird, die mit der zwischen den Spiegeln entstandenen stehenden Welle kohärent ist.

Um die Strahlung austreten zu lassen, ist einer der Spiegel schwach durchlässig. Mit der Fabry-Perot-Anordnung erreicht man außer der Phasenkohärenz über die gesamte Spiegelfläche auch eine extrem gute Parallelbündelung des Strahls: schiefe Strahlen verlassen die Anordnung, bevor sie ausreichend oft reflektiert werden, um verstärkend wirken zu können.

