

Abbildung 1: Interferometer

VERSUCHSANLEITUNG FÜR DAS ANFÄNGERPRAKTIKUM

Laser - Interferometer

19. November 2025

Raum ME152

Inhaltsverzeichnis

1	Informationen	2
1.1	Literatur	2
1.2	Stichworte	3
2	Grundlagen	3
2.1	Laser	3
2.2	Absorption, spontane und induzierte Emission	4
2.3	Laser-Systeme	6
2.4	Interferometer	8
3	Aufgabenstellung	10
4	Versuchsdurchführung und Auswertung	10
5	Fragen zur Selbstkontrolle	11

Abbildungsverzeichnis

1	Interferometer	1
2	Absorption, spontane und induzierte Emission von Licht bei einem atomaren Zweiniveausystem	5
3	Termschema HeNe-Laser	6
4	Typischer Aufbau eines He-Ne-Lasers	7
5	Strahlengang des Michelson Interferometers	8
6	Strahlengang des Michelson Interferometers	9

1 Informationen

1.1 Literatur

- Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik Bd.III
- Pohl, Einführung in die Physik Bd.II
- Schpolski, Atomphysik Bd.I und II
- Kohlrausch, Praktische Physik Bd. I
- Tradowski, Laser - kurz und bündig
- Dokumentationen von ThorLabs

1.2 Stichworte

- Laserprinzip (induzierte Emission)
- He-Ne-Laser
- Kohärenz
- Interferenz
- Interferometer
- Brechungsgesetze
- thermische Ausdehnung

2 Grundlagen

2.1 Laser

Mit dem Begriff *Laser* werden Lichtquellen mit besonderen Eigenschaften bezeichnet, die sie von allen anderen natürlichen und technischen Lichtquellen unterscheiden: Laser emittieren scharfe Bündel kohärenter Lichtwellen im sichtbaren Bereich des Spektrums, oder in den angrenzenden Gebieten (UV, IR). Das Laserlicht ist zudem extrem monochromatisch und kann eine sehr hohe Energiedichte haben. Diese Eigenschaften beruhen auf dem Prinzip der Lichterzeugung, das im Namen *LASER* selbst, der engl. Abkürzung für *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* zum Ausdruck kommt.

Während das Licht konventioneller Lichtquellen durch spontane, d.h. zeitlich und räumlich unkorrelierte Übergänge von Elektronen aus energetisch angeregten Atomzuständen erzeugt wird, entsteht Laserlicht durch Übergänge, die durch eine Lichtwelle geeigneter Frequenz stimuliert bzw. induziert werden. Das erzeugte Licht überlagert sich dabei der erregten Lichtwelle phasengleich, mit gleicher Polarisierung und in gleicher Richtung, so dass die Lichtwelle kohärent verstärkt wird.

Aufgrund ihrer nützlichen Eigenschaften finden Laser-Systeme heute breite Anwendung in Technik und Wissenschaft. Die scharfe Bündelung des Laserstrahls erlaubt eine sehr hohe Präzision im Vermessungswesen über große Distanzen, z.B. beim Tunnelbau, oder in der Astronomie (Abstandsbestimmung Erde-Mond). Die hohe Energiedichte des gebündelten Laserlichts wird technisch bei der mechanischen Bearbeitung harter und hochschmelzender Materialien genutzt wie beim Schweißen, Schneiden und Bohren von Metallen oder in der Medizin, z.B. bei der Behandlung von Netzhautablösungen. Die räumliche und zeitliche Kohärenz, sowie die Monochromasie des Laserlichts ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen, wie etwa in der Nachrichtentechnik zur optischen Informationsübertragung (Glasfaserleitung) und Informationsspeicherung (Holographie), sowie allgemein

in der Interferometrie zur hochauflösenden Spektroskopie, zur Bestimmung geometrischer Längenunterschiede (auf Bruchteile von Wellenlängen genau) oder von Unterschieden der Brechungsindizes verschiedener optischer Medien. Die Interferometrie mittels Laserlicht ist auch der Gegenstand des vorliegenden Versuchs.

2.2 Absorption, spontane und induzierte Emission

Zur einfachen Beschreibung der Vorgänge Emission und Absorption von Licht seien viele gleichartige Atome mit Elektronen in nur zwei (nicht entarteten) Zuständen der Energie E_1 (Grundzustand) und E_2 (angeregter Zustand) betrachtet (s. Abb.2). N_1 sei die Zahl der Atome im Zustand der Energie E_1 , N_2 die der im Zustand mit der Energie E_2 . Trifft eine Lichtwelle der Frequenz $\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$ und spektralen Energiedichte $\rho(\nu)$ auf die Atome, so wird diese z.T. absorbiert, d.h. es werden Übergänge der Elektronen von E_1 nach E_2 stattfinden, wobei die Zahl der in der Zeiteinheit angeregten Atome:

$$-\frac{dN_1}{dt} = N_1 \cdot \rho(\nu) \cdot B_{12} \quad (1)$$

ist und die Konstante B_{12} die Wahrscheinlichkeit für den Absorptionsprozess, d.h. den Übergang der Atome von 1 nach 2 darstellt. Umgekehrt finden in der gleichen Zeit Emissionsprozesse statt; z.T. sind diese spontan aufgrund der endlichen Lebensdauer des angeregten Zustands. Aus der mikroskopischen Umkehrbarkeit des Absorptionsprozesses folgt zum Anderen, dass auch Übergänge von 2 nach 1 durch die einlaufende Lichtwelle induziert werden (Einstein). Die Zahl der Atome, welche in der Zeiteinheit in den Grundzustand übergehen ist damit durch

$$-\frac{dN_2}{dt} = N_2 \cdot (A_{21} + \rho(\nu) \cdot B_{21}) \quad (2)$$

gegeben, wobei A_{21} die Wahrscheinlichkeit für die spontane, B_{21} die für die induzierte Emission darstellen. Sind die Atome im thermischen Gleichgewicht mit der Strahlung, so sind die Besetzungszahlen N_1 und N_2 zeitlich konstant, d.h. es finden in der Zeiteinheit gleich viele Emissions- wie Absorptionsprozesse statt.

Das Verhältnis $\frac{N_2}{N_1}$ ist zudem durch den Boltzmann-Faktor

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right) \quad (3)$$

festgelegt. Nach Gleichsetzen von Gl.1 und Gl.2 und Einsetzen von Gl.3 erhält man für die spektrale Energiedichte

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12} \cdot e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - B_{21}} \quad (4)$$

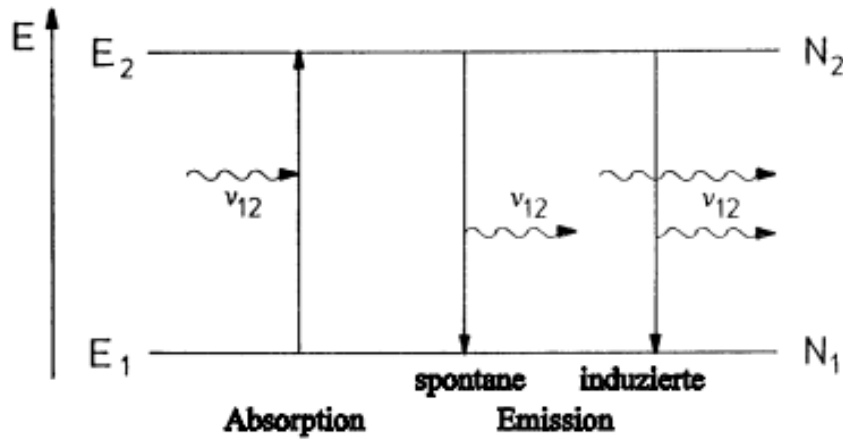


Abbildung 2: Absorption, spontane und induzierte Emission von Licht bei einem atomaren Zweiniveausystem

und durch Vergleich von Gl.4 mit der Planck'schen Strahlungsformel (s. auch Versuch D8, Temperaturstrahlung) für die Koeffizienten A und B

$$A_{21} = \frac{8 \cdot \pi h \nu^3}{c^3} \cdot B_{21} \quad , \quad B_{21} = B_{12} \quad (5)$$

Für das Zahlenverhältnis von induzierten zu spontanen Emissionsprozessen thermischer Strahler erhält man mit Gl.2,4 und 5 schließlich

$$\frac{\rho(\nu) \cdot B_{21}}{A_{21}} = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B \cdot T}} - 1} \quad (6)$$

Dieses Verhältnis ist im sichtbaren Bereich des Spektrums extrem klein (10^{-5} für $T=2000$ K und $\lambda = 600 \text{ nm}$), so dass das sichtbare Licht thermischer Strahler, wie etwa das einer Glühbirne praktisch nur durch spontane Emission zustande kommt. Darüber hinaus ist bei thermischen Strahlern nur ein sehr geringer Bruchteil der Atome im angeregten Zustand ($\frac{N_1}{N_2} \approx 10^{-5}$, siehe Gl.3), so dass die Zahl der in der Zeiteinheit stattfindenden Absorptionsprozesse die der induzierte Emission bei weitem überwiegt, d.h. die Größe $(N_1 - N_2) \cdot \rho(\nu) \cdot B_{12}$ positiv ist, die erregende Lichtwelle also stets geschwächt wird. Eine Verstärkung der Lichtwelle durch induzierte Emission ist deshalb nur für $N_2 > N_1$, d.h. bei sogenannter *Besetzungsinversion* möglich.

2.3 Laser-Systeme

Zur Lichtverstärkung durch induzierte Emission muss einem geeigneten Laser-Medium (bestimmte Gase, Flüssigkeiten oder Festkörper) Energie, die sog. *Pumpenergie* zugeführt werden. Bei Flüssigkeiten und Festkörpern geschieht dies durch Einstrahlung von Licht, bei Gaslasern erfolgt die Zufuhr von Energie durch Elektronenstöße in einer elektrischen Gasentladung. Außerdem sind zur Erzeugung der Besetzungsinversion für die optischen Übergänge von Laser-Medien nicht wie in Abb.2 gezeigt nur zwei, sondern mindestens drei Niveaus mit den Energien $E_3 > E_2 > E_1$ notwendig. Die Pumpenergie dient dabei zum Übergang von 1 nach 3. Die Inversion $N_3 > N_1$ wird erreicht, wenn dieser Übergang optisch *verboten* ist (s. z.B. Auswahlregeln für Dipolstrahlung), so dass das System praktisch nur über den Zustand 2 in den Grundzustand 1 zurückkehren kann. erfolgt der Übergang von 3 nach 2 (mit kleiner Energiedifferenz) strahlungslos, ist auch eine Besetzungsinversion der Zustände 2 und 1 möglich und der Übergang von 2 nach 1 fungiert als Laser-Übergang.

Betrachten wir hier z.B. den He-Ne-Laser anhand seines Termschemas:

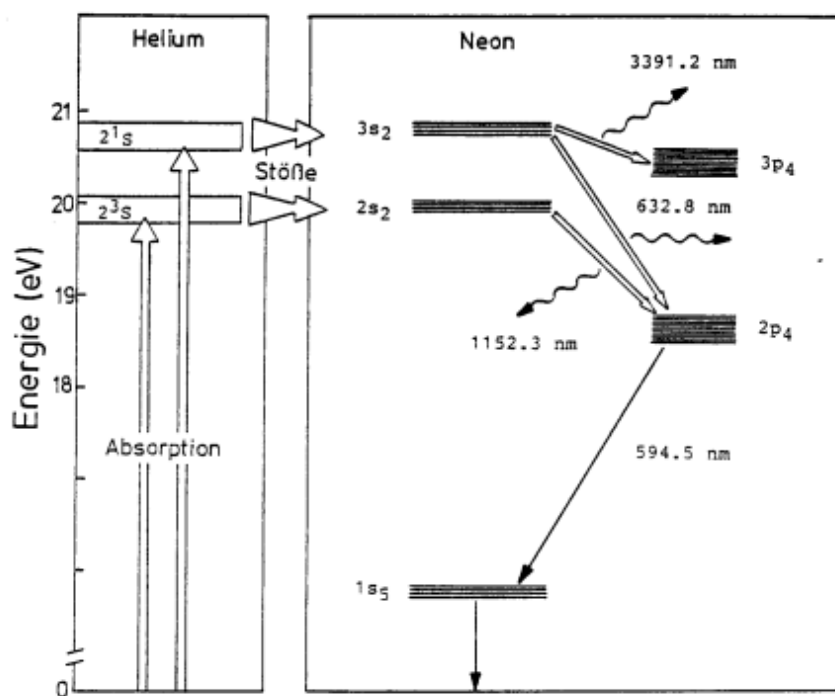


Abbildung 3: Termschema HeNe-Laser

Beim He-Ne-Laser wird die benötigte Pumpenergie in der Gasentladung durch Elektronenstöße überwiegend den He-Atomen zugeführt. Diese werden dabei vom Grundzustand in zwei metastabile Zustände, d.h. solche mit großer Lebensdauer, angeregt. Die Anregungsenergie der He-Atome wird während dieser Zeit durch Stöße vollständig auf die Ne-Atome übertragen (*Stöße zweiter Art*), so dass für diese eine Besetzungsinversion bestimmter Anregungsniveaus (sog. *Laserniveaus*) gegenüber tiefer liegenden Energiezuständen, sowie dem Grundzustand erzeugt wird. Die von den Ne-Atomen emittierte Laserstrahlung liegt im roten und infraroten Bereich des Spektrums (632,8; 1152 und 3391 nm).

Den grundsätzlichen Aufbau des He-Ne-Gas-Lasers zeigt Abb. 4. Das Gas befindet sich unter vermindertem Druck in einem Glaszylinder, in dem die elektrische Entladung stattfindet. Die Fenster an den Enden des Zylinders sind um den *Brewster-Winkel* gegen die Zylinderachse verkippt, sodass dort nur Strahlung einer bestimmten Polarisationsrichtung reflexionsfrei austreten kann. Diese Strahlung wird zwischen zwei Spiegeln so in sich reflektiert, dass sie den Zylinder vielfach durchläuft und bei jedem Durchgang Laserstrahlung induziert bzw. durch diese kohärent verstärkt wird. Hierbei bildet sich eine stehende Welle aus, deren genaue Wellenlänge vom Abstand der Spiegel abhängt. Das System Zylinder-Spiegel stellt einen Resonator dar, der die Verstärkung und Emission des Lichts in einem nur sehr schmalen Frequenzintervall ($\Delta\nu$ bis hinab zu 1 Hz möglich) bewirkt. Die kohärente und extrem monochromatische Laserstrahlung tritt durch einen der Spiegel, der zum (geringen) Teil durchlässig ist, in den Außenraum.

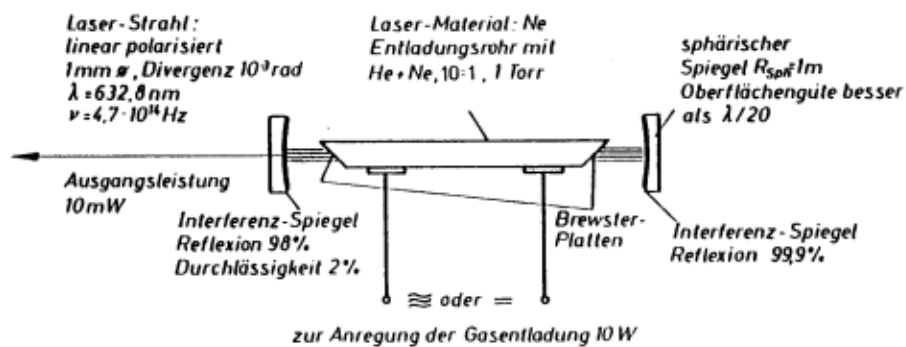


Abbildung 4: Typischer Aufbau eines He-Ne-Lasers

2.4 Interferometer

Bei Interferometern wird, wie der Name schon sagt, die Interferenz von zwei oder mehreren kohärenten, monochromatischen Lichtbündeln genutzt, d.h. von solchen, die eine räumlich (und zeitlich) definierte Phasendifferenz aufweisen. Aus der Abhängigkeit der Phasendifferenz vom Strahlengang im Interferometer kann zum Einen die Wellenlänge des benutzten Lichts sehr genau bestimmt werden, zum Anderen lassen sich Unterschiede optischer Weglängen bei bekannter Wellenlänge präzise ermitteln. Laser sind wegen der großen Kohärenzlänge ihrer Strahlung ideale Lichtquellen für interferometrische Messungen, insbesondere bei der Interferenz in höherer Ordnung, sowie der vieler Teilstrahlen (Vielstrahlinterferenz).

Abb. 5 zeigt den schematischen Aufbau und Strahlengang des *Michelson-Interferometers*. Dabei handelt es sich um ein Zweistrahlinterferometer, das im vorliegenden Versuch u.A. zur Bestimmung der Wellenlänge des Laserlichts benutzt wird. Ein Laserstrahl wird hierzu auf einen Strahlteiler gelenkt. Ein Teilstrahl trifft auf einen festen planparallelen Spiegel (Spiegel 1), der andere Teilstrahl auf einen verschiebbaren planparallelen Spiegel (Spiegel 2). Die beiden an den Spiegeln reflektierten Strahlen treffen auf dem Schirm wieder zusammen und interferieren konstruktiv oder destruktiv miteinander, abhängig vom Unterschied der optischen Weglängen. Bei Bedarf kann der Strahlengang zum Schirm oder auch zum Strahlteiler durch Linsen aufgeweitet werden.

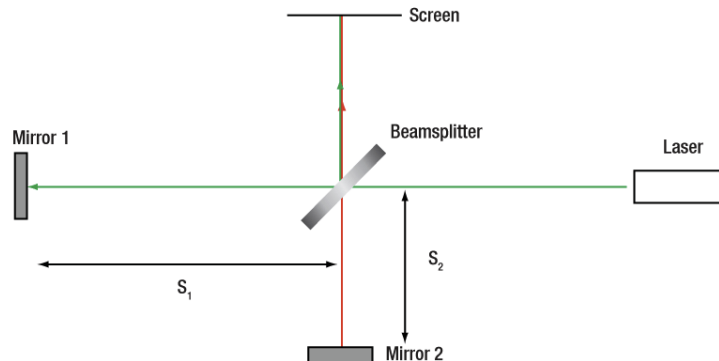


Abbildung 5: Strahlengang des Michelson Interferometers

Bei optimaler Justierung aller Komponenten zeigt sich das Interferenzbild als konzentrische helle und dunkle Ringe. Durch Verschieben des Spiegels 2 wird die Weglänge S_2 so verändert, sodass die Ringe auf dem Schirm um einen Ringabstand aus dem Zentrum heraus auseinanderlaufen. Die Bewegung des Bildes um einen Ringabstand entspricht

gerade einer Phasendifferenzänderung der Teilstrahlen um 2π bzw. der optischen Weglängenänderung um λ , also der Verschiebung des Spiegels um $\frac{\lambda}{2}$. Ein an S_2 angebrachter Feinstellantrieb (Mikrometerschraube) gestattet eine definierte Bewegung Δs des Spiegels, sodass mit

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta s}{N} \quad (7)$$

aus der Verschiebung des Interferenzbildes um N Ringe die Wellenlänge λ des Lichts bestimmt werden kann.

Umgekehrt kann mit Kenntnis der Wellenlänge bei ortsfestem Spiegel S_1 aus der Änderung des Interferenzbildes auch eine Veränderung Δs der Lage des Spiegels S_2 bestimmt werden. Abb. 6 zeigt die Halterung und den Aufbau des Spiegels S_2 , um den Wärmeausdehnungskoeffizienten zu bestimmen.



Abbildung 6: Strahlengang des Michelson Interferometers

Erhöht man über eine externe Stromquelle den Strom durch den Draht um den Festkörper, so wird dieser sich ausdehnen. Die Ausdehnung wird mit dem Wärmeausdehnungskoeffizienten α beschrieben, der die Proportionalitätskonstante zwischen einer relativen Längenausdehnung und einer entsprechenden Temperaturänderung darstellt, also

$$\alpha = \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \quad (8)$$

Die Lösung dieser Gleichung beschreibt einen exponentiellen Prozess, bei dem die Länge des Festkörpers als

$$L = L_0 \cdot \exp(\alpha \cdot \Delta T) \quad (9)$$

gegeben ist. Hierbei ist ΔT die Temperaturänderung, die der Festkörper erfährt, wo-

durch er sich von seiner ursprünglichen Länge L_0 auf die Länge L ausdehnt. In erster Näherung kann man den Ausdehnungskoeffizienten dann durch

$$\Delta L \approx \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (10)$$

bestimmen, wobei ΔL die Ausdehnung ist.

Experimentell kann diese Ausdehnung untersucht werden, indem ein Spiegel des Michelson-Interferometers wie in Abb. 6 auf den Probekörper aufgebracht wird. Dehnt sich der Festkörper aus, verändert sich der Weglängenunterschied zwischen den Interferometerarmen und somit auch das Interferenzmuster. Um nun ΔL zu erhalten, zählt man die Hell-Dunkel-Hell Durchgänge und erhält so die Anzahl N . Zusammen mit ΔT ergibt sich der Koeffizient durch

$$\frac{1}{2} \cdot N \cdot \lambda = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \Rightarrow \alpha = \frac{N \cdot \lambda}{2L_0 \cdot \Delta T} \quad (11)$$

Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient α metallischer Elemente hat bei Raumtemperatur die Größenordnung $10^{-5} \frac{1}{K}$. Bestimmte ferromagnetische Legierungen, sog. *Invar*, zeigen dagegen in einem weiten Temperaturbereich eine viel geringere Wärmeausdehnung und sind deshalb von großer technischer Bedeutung. Die schon seit etwa 100 Jahren bekannten FeNi-Invar-Legierungen haben z.B. bei der Zusammensetzung $Fe_{65}Ni_{35}$ im Bereich um Raumtemperatur den Ausdehnungskoeffizienten $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$.

3 Aufgabenstellung

1. Bauen Sie ein Michelson-Interferometer gem Abb.5 auf und bestimmen Sie mit Gl.7 die Wellenlänge des Diodenlasers.
2. Bestimmen Sie mit dem Michelson-Interferometer gem. Abb.5 bzw. 6 und Gl. 11 den linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von drei verschiedenen Metallen.

4 Versuchsdurchführung und Auswertung

VORSICHT! Nicht direkt in den Laserstrahl schauen und niemals die Schutzbrille während des Laserbetriebs abnehmen. Den Laser so ausrichten, dass der Strahl keine reflektierenden Flächen trifft (ausgenommen Spiegel des Aufbaus) und niemand versehentlich in den Strahl schauen kann! Bitte die Spiegeloberflächen nicht berühren.

Für die erste Aufgabe wird das Interferometer so justiert, dass das Interferenzmuster weder zu klein noch zu groß ist. Den grundsätzlich Aufbau entnehmen Sie Abb.5. Um

das Interferenzmuster gut abbilden zu können, weiten Sie den Laserstrahl zusätzlich mit der im Material vorhandenen Linse auf, indem sie diese nah am Laser positionieren. Wenn auf dem Schirm eine Interferenz zu erkennen ist, kann zusätzlich die große Linse mit der der Brennweite $L = -100$ zwischen den Ausgangsstrahlen und dem Schirm positioniert werden. Diese muss nicht auf der Grundplatte stehen, sondern ist so eingestellt, dass sie auf dem Tisch positioniert werden kann. Testen Sie nun, ob sich das Muster ändert, wenn Sie an der Mikrometerschraube drehen. **Ein Skalenteil entspricht hier einem Mikrometer!** Es ist empfehlenswert, eine Vielzahl von Durchläufen zu beobachten, um den Gesamtfehler zu minimieren. Überlegen Sie sich vorher, wie viele Ringwechsel Sie zählen wollen, es sollten mindestens 40 sein und dieser Versuchsteil wird 3x durchgeführt. Je höher die Anzahl der Durchgänge, desto geringer wird der Fehler.

Für die zweite Aufgabe bauen Sie das Interferometer erneut auf und tauschen den verstellbaren Spiegel durch eine Metallprobe mit Thermometer aus. Heizen Sie in diesem Versuchsteil den Stab kontrolliert auf, indem Sie die externe Spannungsquelle nutzen und einen Heizstrom von ca. 0,5 A einstellen. Sollte die Heizrate zu langsam oder hoch sein, können Sie ggf. den Strom anpassen. Es empfiehlt sich den Schirm abzufilmen, um die Ringe im Nachhinein ggf. in SloMo auf dem Handy zählen zu können, oder aber das Ergebnis nochmal zu überprüfen. Messen Sie für jede Probe mindestens 2 mal in einem von Ihnen definierten Temperaturintervall. Dieses sollte mindestens 5 Grad Celsius betragen. Tragen Sie die Messwerte für jede Probe in ein Diagramm ein (ΔL als Funktion von $\Delta \vartheta$). Insgesamt sind 3 Proben zu vermessen, α zu bestimmen und mit Hilfe von Literaturwerten zu ermitteln, um welches Metall es sich handelt. Diskutieren Sie evtl. Abweichungen vom Literaturwert.

5 Fragen zur Selbstkontrolle

1. Durch welchen Elementarprozess entsteht (sichtbares) Licht allgemein, welcher bewirkt die Erzeugung von *Laserlicht*?
2. Durch welche Eigenschaften unterscheidet sich das Licht eines Lasers von dem anderer Lichtquellen und welche dieser Eigenschaften sind für die Interferometrie günstig?
3. Unter welcher Voraussetzung ist durch induzierte Emission die kohärente Verstärkung einer Lichtwelle möglich?
4. Erläutern Sie den prinzipiellen Aufbau und das Funktionsprinzip eines He-Ne-Gaslasers.
5. Unter welchen Bedingungen können Lichtwellen konstruktiv bzw. destruktiv interferieren? Was bedeuten die Begriffe **Kohärenz** und *Kohärenzlänge*?

6. Erläutern Sie den Strahlengang eines Michelson-Interferometers. Mit welcher Auflösung kann damit der Unterschied optischer Weglängen bestimmt werden?
7. Warum dehnen sich Festkörper bei Temperaturerhöhung aus?