

FORTGESCHRITTENEN-PRAKTIKUM SS 2017

Der Helium-Neon-Laser

Durchführung: 24.04.17

Anja BECK¹
Clara RITTMANN²

Betreuer:
Henning MOLDENHAUER

¹anja.beck@tu-dortmund.de

²clara.rittmann@tu-dortmund.de

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	2
1.1	Zugrundeliegende Physik	2
1.2	Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsweise	3
1.3	Der HeNe-Laser	4
2	Versuchsaufbau	5
3	Messungen	5
4	Auswertung	6
4.1	Intensität der TEM ₀₀ - und TEM ₀₁ -Mode	6
4.1.1	TEM ₀₀ -Mode	6
4.1.2	TEM ₀₁ -Mode	6
4.2	Polarisation	10
4.3	Berechnung der Wellenlänge	12
4.4	Überprüfung der Stabilität	13
5	Diskussion	15

Ziel des Versuchs ist es den grundlegenden Umgang mit einem Laser zu erlernen und dabei verschiedene seiner Kenngrößen zu bestimmen.

Die theoretische Betrachtung und die Beschreibung von Aufbau und Durchführung orientieren sich eng an der Versuchsanleitung [2].

1 Theorie

1.1 Zugrundeliegende Physik

Laser (kurz für *light amplification by stimulated emission of radiation*) machen sich die Wechselwirkung zwischen Photonen und Hüllenelektronen zunutze. Dabei gibt es drei grundlegende Phänomene (erklärt am Beispiel eines Zweiniveausystems mit Energiedifferenz E):

- Absorption: Das Elektron ist auf dem unteren Niveau. Ein einfallendes Photon mit Energie E gibt seine gesamte Energie an das Elektron ab, das somit auf das obere Niveau gelangt. Das Atom ist nun angeregt.
- Induzierte Emission: Das Elektron ist auf dem oberen Niveau. Ein einfallendes Photon, das etwa die Energie E hat, verursacht die Emission eines zweiten Photons mit Energie E beim Übergang des Elektrons zum unteren Niveau.
- Spontane Emission: Das Elektron ist auf dem oberen Niveau und emittiert spontan, zur Energieminimierung, ein Photon der Energie E .

Die Besetzungsdichten der beiden Niveaus n_1, n_2 können mit folgenden Differentialgleichungen beschrieben werden

$$\begin{aligned}\dot{n}_1 &= -n_1 B_{12} \rho(x) + n_2 B_{21} \rho(x) + n_2 A_{21} \\ \dot{n}_2 &= +n_1 B_{12} \rho(x) - n_2 B_{21} \rho(x) - n_2 A_{21}\end{aligned}\quad (1)$$

$\rho(x)$ ist dabei die Energiedichte des einfallenden Strahlungsfelds und A_{21}, B_{12}, B_{21} die Einsteinkoeffizienten und dienen als Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs.

Man spricht von Besetzungsinversion, wenn die Besetzung des oberen Niveaus n_2 größer ist, als die des unteren n_1 , mit anderen Worten, wenn die Differenz der beiden Besetzungsdichten $\Delta N = n_1 - n_2$ negativ ist. Durch Transformation der Variablen n_1, n_2 zu $\Delta N, N = n_1 + n_2 = \text{const}$ in den Gleichungen (1) und Lösung der neuen Differentialgleichung ergibt sich der Ausdruck

$$\Delta N(t) = N \left[- \left(\frac{1}{2 \frac{B\rho}{A_{21}} + 1} + 1 \right) e^{-(B\rho + \frac{A_{21}}{2})t} + \frac{1}{2 \frac{B\rho}{A_{21}} + 1} \right], \quad (2)$$

wenn $\Delta N(0) = -N$, d.h. alle Atome angeregt sind, und die Niveaus nicht entartet, d.h. $B_{12} = B_{21} = B$, sind. Für lange Zeiten konvergiert ΔN gegen $N/(2 \frac{B\rho}{A_{21}} + 1) > 0$, d.h. eine dauerhafte Besetzungsinversion kann mit einem Zweiniveausystem nicht erreicht werden.

1.2 Grundsätzlicher Aufbau und Funktionsweise

Bestimmend für die Frequenz des Laserlichts ist das Lasermedium. Durch eine äußere Energiequelle wird die Emission von Photonen im Medium angeregt und aufrecht erhalten, hierbei ist auch von *pumpen* die Rede. Um einen kohärenten und starken Laserstrahl zu erhalten ist es dann wichtig, dass das Strahlungsfeld ständig verstärkt wird. Um das zu erreichen ist eine dauerhafte Besetzungsinversion nötig. Dafür wird ein Resonator verwendet. Er besteht aus zwei sich gegenüber stehenden Spiegeln, wovon einer teilreflektierend sein sollte um den Laserstrahl auskoppeln zu können, mit dem Lasermedium in der Mitte. Er sorgt dafür, dass die emittierten Photonen das Medium mehrfach durchlaufen und so Atome anregen können oder durch stimulierte Emission das Strahlungsfeld verstärken. Die grundsätzliche Anordnung der Bauteile ist in Abbildung 1 dargestellt.

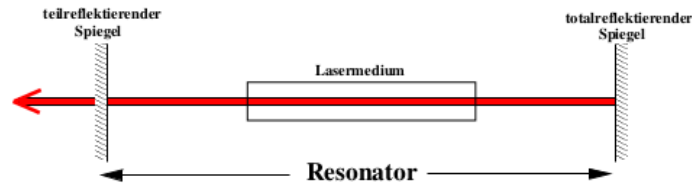


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Lasers [2]

Die Form der Resonatorspiegel kann verschieden sein und entscheidet über die Stabilität des Lasers. Als Kenngröße dient dabei $g_i = 1 - \frac{L}{r_i}$, die einen Zusammenhang zwischen dem Krümmungsradius des Spiegels r_i der Länge L des Resonators herstellt. Eingesetzt in die resonator-spezifische Funktion $g(L) = g_1 \cdot g_2$ erhält man beispielsweise

$$g(L) = \frac{1}{r_1 r_2} L^2 - \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) L + 1 \quad \text{wenn beide Spiegel gekrümmt,} \quad (3)$$

$$g(L) = 1 - \frac{L}{r_2} \quad \text{wenn ein Spiegel planar, der andere gekrümmt ist.} \quad (4)$$

Ein Resonator ist optisch stabil, wenn

$$0 \leq g(L) < 1 \quad (5)$$

gilt. Auch die Moden der stehenden Welle, die sich im Resonator ausbildet, haben einen Einfluss auf die Verluste. Sie werden als TEM_{lp} -Moden bezeichnet, wobei l, p die Anzahlen der Knoten in x, y - also transversaler - Richtung sind. Die sogenannte TEM_{00} -Mode ist hierbei die präferierte, denn sie hat keine transversalen Anteile, welche die Fokussierung erschweren. Ihre Intensitätsverteilung auf einem Schirm wird durch die Gaußverteilung

$$I(r) = I_0 \exp \left(-2 \left(\frac{r}{\omega} \right)^2 \right) \quad (6)$$

mit dem Abstand zur optischen Achse r und dem Strahldurchmesser 2ω beschrieben. Der Strahlradius ω hängt von der Fokussierung ab und kann mit

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\theta z}{\omega_0} \right)^2} \quad (7)$$

moduliert werden, wobei $\theta = \omega_0 \lambda / \pi$ die Divergenz des Strahls ist.

Neben den beschriebenen grundlegenden Bauteilen werden weitere Elemente zur Verbesserung des Strahls eingesetzt:

- Brewsterfenster an beiden Seiten der Kammer, die das Lasermedium enthält, sorgen für die Polarisation des Lichts. Sie bestehen aus Glasplatten, die im Brewsterwinkel zum Strahl stehen und so die senkrecht polarisierten Anteile der Welle herausfiltern.
- Modenblenden sind mechanische Widerstände, die transversale Moden blockieren.

1.3 Der HeNe-Laser

Beim HeNe-Laser befindet sich neben Neon als Lasermedium noch Helium als Pumpgas im Verhältnis 1 (Ne) zu 5 (He). Die Heliumatome werden durch Entladung angeregt. Durch Stöße zweiter Art ($A^* + B \rightarrow A + B^*$) werden die Neonatome angeregt. Das Energieniveauschema 2 stellt diesen und die darauf folgenden Abläufe in den Atomhüllen dar. Die intensivste der emittierten Wellenlängen, ist rote mit einer Wellenlänge von $\lambda = 632.8 \text{ nm}$.

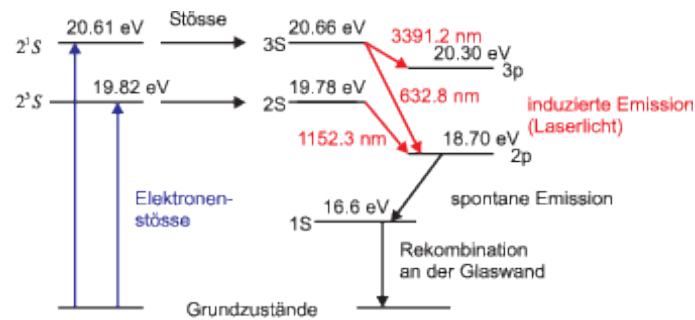


Abbildung 2: Niveauschema der Abläufe im HeNe-Laser [1]

2 Versuchsaufbau

Der erste Versuchsteil besteht darin einen funktionsfähigen Laser aufzubauen. Zunächst befinden sich auf der optischen Schiene nur der Justierlaser an einem Ende und ein Fadenkreuz direkt vor ihm. Der Aufbau kann folgendermaßen strukturiert werden:

1. Ein nicht vollständig reflektierender Spiegel wird ininigem Abstand auf der Schiene befestigt. Auf dem Fadenkreuz sind nun zwei Punkte zu sehen. Der stärker definierte wurde von der dem Laser zugewandten Seite reflektiert, er wird durch Justage des Lasers in die Mitte des Fadenkreuzes verschoben.
2. Ein zweiter, vollständig reflektierender, Spiegel wird zwischen Justierlaser und erstem Spiegel auf die Schiene gestellt. Auf dem Fadenkreuz sind jetzt zwei weitere Punkte zu erkennen. Dieses Mal wird der unschärfere Punkt in die Mitte des Fadenkreuzes verschoben, da der schärfere nur den Weg Laser – naher Spiegel – Fadenkreuz zurück gelegt hat und nicht durch den Resonator gelaufen ist.
3. Die Kammer mit dem Lasermedium wird auf die Schiene zwischen die Spiegel gestellt. Durch die vier Justierschrauben an der Kammer kann der Strahlengang optimiert werden bis die Lasertätigkeit einsetzt.
4. Mit Hilfe einer Photodiode und/ oder eines optischen Schirms wird die Laserleistung, durch Verstellen aller Justierschrauben, maximiert.

3 Messungen

Als erstes wird die **Intensitätsverteilung zweier Moden** vermessen. Dafür wird eine vergrößernde Linse in den Strahlengang gestellt und die Intensitätsverteilung mit Hilfe einer Photodiode entlang einer horizontalen Linie vermessen. Für die TEM_{00} -Mode bleibt der Strahlengang ansonsten unberührt. Um die TEM_{10} -Mode beobachten zu können wird zusätzlich ein Wolframdraht in den Resonator gestellt. Dieser sorgt dafür, dass die zentrierte TEM_{00} -Mode unterdrückt wird.

Danach wird mit Hilfe eines Polarisators hinter dem auskoppelnden Spiegel die **Polarisation** des Lichts bestimmt. Hierfür wird der Polarisator in kleinen Winkeln gedreht und die jeweilige Intensität an der Photodiode aufgenommen.

Die **Wellenlänge** des Lichts wird bestimmt indem ein Gitter in den Strahlengang gestellt wird und dann an einem entfernten Schirm die Abstände der Intensitätsmaxima zum Hauptmaximum gemessen werden.

Zuletzt wird die **Stabilitätsbedingung** (5) für einen Resonator mit zwei konkaven Spiegeln und einen Resonator mit einem konkaven und einem planaren Spiegel überprüft, indem die maximale Intensität für verschiedenen Resonatorlängen gemessen wird.

4 Auswertung

4.1 Intensität der TEM₀₀- und TEM₀₁-Mode

4.1.1 TEM₀₀-Mode

Es wird eine Gauß-Verteilung in Anlehnung an (6) an die Messwerte aus Tabelle 3 gefittet. Fitparameter sind die maximale Amplitude I_0 , die Breite des Laser-Strahls ω , nachdem dieser die Zerstreuungslinse durchlaufen hat, und die Verschiebung des Maximums entlang der x-Achse x_0 . Der zugehörige Plot ist in Abbildung 3 zu finden.

$$I_0 = (446 \pm 23) \text{ nA} \quad (8)$$

$$\omega = (-11.2 \pm 0.7) \text{ mm} \quad (9)$$

$$x_0 = (3.55 \pm 0.34) \text{ mm} \quad (10)$$

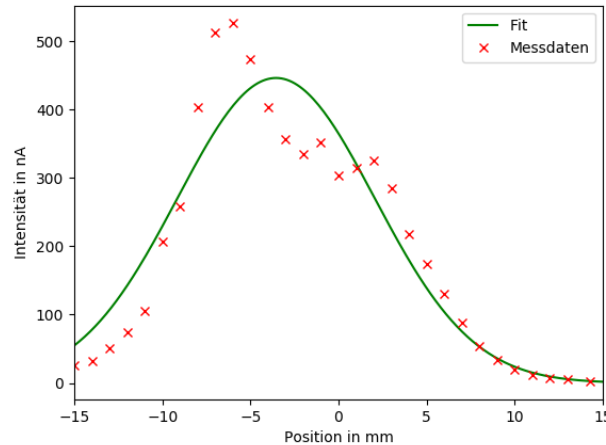


Abbildung 3: Intensität der TEM₀₀-Mode entlang der x-Achse gemessen

4.1.2 TEM₀₁-Mode

Bei der TEM₀₁-Mode ist das Verfahren ähnlich, hier werden zwei Gauß-Verteilungen mit folgenden Parametern an die Messwerte aus Tabelle 2 gefittet:

$$I(x) = I_{0l} \exp \left(-2 \left(\frac{x + x_{0l}}{w} \right)^2 \right) + I_{0r} \exp \left(-2 \left(\frac{x + x_{0r}}{w} \right)^2 \right) .$$

Entweder müssen wir hier auch den First Guess in die Abbildungen machen oder oben bei der Polarisation auch nicht.

Es könnte sich hier anbieten alle Messwerte in eine Tabelle zu schreiben, sodass man nicht diese langen Tabellen auf fast leeren Seiten hat.

Tabelle 1: Intensität der TEM₀₀-Mode entlang der x-Achse

I in nA	x in mm
14.3	2.95
13.0	4.95
12.0	7.60
11.0	11.92
10.0	20.15
9.0	34.00
8.0	54.50
7.0	89.00
6.0	129.80
5.0	173.90
4.0	218.00
3.0	285.00
2.0	326.00
1.0	314.00
0.0	303.00
-1.0	352.00
-2.0	335.00
-3.0	356.00
-4.0	403.00
-5.0	473.00
-6.0	526.00
-7.0	512.00
-8.0	404.00
-9.0	258.00
-100	207.00
-110	105.50
-120	73.50
-130	51.30
-140	31.70
-150	26.00

Die Berechnung ergibt die Werte

$$I_{0l} = (21 \pm 5) \text{ nA} \quad (11)$$

$$x_{0l} = (-5.59 \pm 0.09) \text{ mm} \quad (12)$$

$$I_{0r} = (155 \pm 4) \text{ nA} \quad (13)$$

$$x_{0r} = (8.6 \pm 0.8) \text{ mm} \quad (14)$$

$$\omega = (5.42 \pm 0.17) \text{ mm} . \quad (15)$$

Abbildung 4 zeigt den dazugehörigen Plot.

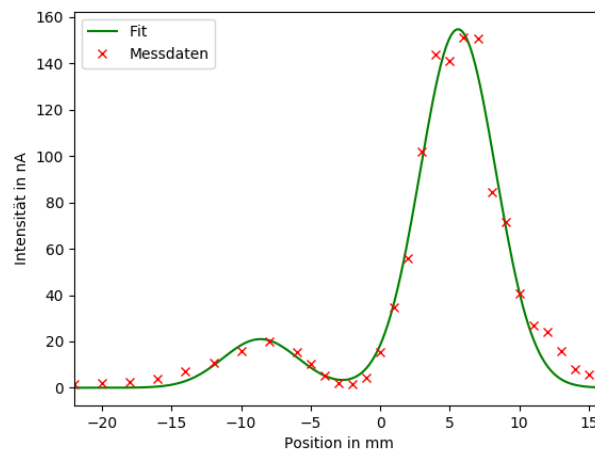


Abbildung 4: Intensität der TEM₀₁-Mode entlang der x-Achse gemessen

Tabelle 2: Intensität der TEM₀₁-Mode entlang der x-Achse

I in nA	x in mm
-220	1.62
-200	1.88
-180	2.54
-160	3.89
-140	6.95
-120	10.86
-100	16.01
-8.0	19.80
-6.0	15.21
-5.0	10.35
-4.0	5.04
-3.0	2.15
-2.0	1.79
-1.0	4.45
0.0	15.59
1.0	34.60
2.0	55.87
3.0	101.91
4.0	143.70
5.0	141.00
6.0	151.03
7.0	150.59
8.0	84.58
9.0	71.37
10.0	40.70
11.0	26.81
12.0	24.04
13.0	15.91
14.0	8.05
15.0	5.71
16.0	3.31

4.2 Polarisation

Die Winkel mit den zugehörigen Intensitäten sind in Tabelle 3 aufgetragen. Mit Hilfe der Funktion *curve_fit* von Python und einem First Guess von

$$I_{\text{guess}} = 100 \mu\text{A} \sin^2(\varphi + 0.4)$$

wird die Funktion

$$I_{\text{fit}} = I_0 \sin^2(\omega\varphi + \varphi_0)$$

an die Messwerte gefittet. Dabei ergeben sich die Parameter

$$I_0 = (94 \pm 1) \mu\text{A} \quad (16)$$

$$\omega = 1.013 \pm 0.006 \quad (17)$$

$$\varphi_0 = (0.141 \pm 0.006) \pi . \quad (18)$$

Die Messwerte, der First Guess und die gefittete Funktion sind in Abbildung 5 zu sehen. Die Maxima befinden sich bei 0.3π - bzw. 1.3π , d.h. der Laser war in diese Richtung polarisiert.

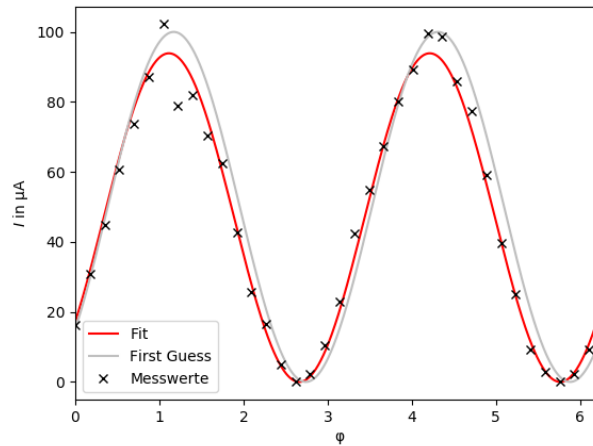


Abbildung 5: Fit zur Bestimmung der Polarisationsrichtung

Tabelle 3: Intensität in Abhängigkeit des Winkels des Polarisators

φ	I in μA
2.6	0.2
2.8	2.4
3.0	10.6
3.1	23.0
3.3	42.4
3.5	54.8
3.7	67.4
3.8	80.2
4.0	89.3
4.2	99.5
4.4	98.6
4.5	85.8
4.7	77.5
4.9	59.0
5.1	39.7
5.2	25.2
5.4	9.3
5.6	3.0
5.8	0.1
5.9	2.1
6.1	9.1
0.0	16.2
0.2	30.7
0.3	44.9
0.5	60.5
0.7	73.6
0.9	87.1
1.0	102.2
1.2	78.8
1.4	81.9
1.6	70.3
1.7	62.5
1.9	42.7
2.1	25.7
2.3	16.5
2.4	5.0

Tabelle 4: Berechnung der Wellenlänge λ durch die Abstände der Interferenzmaxima

Ordnung Maximum	Abstand a rechts in cm	Abstand a links in cm	λ in nm
1	6.70	6.70	642.90
2	13.30	13.35	635.43
3	20.10	20.30	635.56
4	26.90	27.50	632.57
5	34.80	35.30	638.74
6	42.10	43.90	636.82

4.3 Berechnung der Wellenlänge

Die Wellenlänge des HeNe-Lasers wird mit Hilfe eines Interferenzbildes berechnet, das durch die Beugung am Gitter entsteht. Jeweils rechts und links vom Hauptmaximum (Maximum 0-ter Ordnung) werden die Abstände a der Maxima n -ter Ordnung zum Hauptmaximum gemessen. Die Wellenlänge λ lässt sich dann mit dem Abstand b zwischen Gitter und Schirm berechnen nach:

$$\lambda = \frac{g \cdot \sin \phi_n}{n} \quad . \quad (19)$$

Dabei ist g die Gitterkonstante und ϕ_n der Winkel zum n -ten Maximum. Es gilt

$$\phi_n = \arctan\left(\frac{a}{b}\right) \quad , \quad (20)$$

$$g = 100 \frac{1}{\text{mm}} \quad , \quad (21)$$

$$b = 104 \text{ cm} \quad . \quad (22)$$

Die Wellenlänge für das einzelne Maximum ist jeweils aus dem Mittelwert des rechten und linken Abstandes berechnet (siehe Tabelle 4). Daraus ergibt sich eine Wellenlänge von

$$\lambda = (637.0 \pm 1.4) \text{ nm} \quad . \quad (23)$$

Tabelle 5: Resonatorlänge und dazu gemessene Intensität bei einem Resonator mit zwei konkaven Spiegeln

L / inm	I / μA	I_{norm}
0.6	177.0	0.3
0.8	440.0	0.8
0.9	530.0	0.9
1.1	530.0	0.9
1.2	350.0	0.6
1.4	330.0	0.6
1.6	440.0	0.8
1.7	570.0	1.0
1.9	500.0	0.9
2.1	450.0	0.8

4.4 Überprüfung der Stabilität

Zur Überprüfung der Stabilitätsbedingung (5) werden die Messwerte normiert, sodass die höchste Intensität jeweils den Wert 1 zugewiesen bekommt. Die resultierenden, sowie die gemessenen Werte sind in den Tabellen 5 und 6 zu sehen. Dann wird für den Resonator mit den beiden konkaven Spiegeln ein quadratisches Polynom – in Anlehnung an (3) – an die Messwerte für die normierten Intensitäten gefittet. Das Ergebnis ist in Abbildung 6 dargestellt. Dasselbe wird mit den Werten für den Resonator mit einem flachen Spiegel und einer linearen Funktion gemacht. Die Ergebnisse hierfür finden sich in Abbildung 7. Auf die Angabe der errechneten Parameter wird hier verzichtet, da die gefittete Funktion offensichtlich weit von den Erwartungen abweicht.

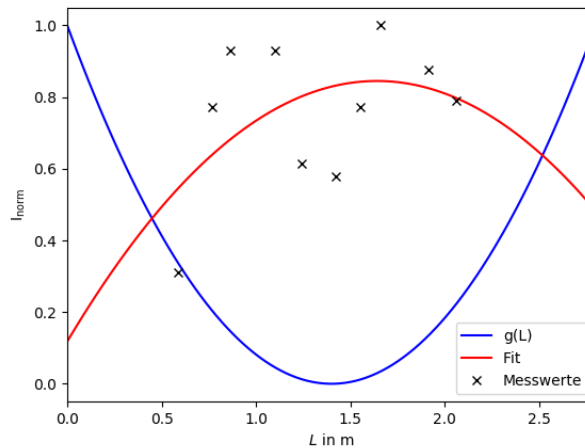
**Abbildung 6:** Fit zur Überprüfung der Stabilitätsbedingung bei zwei konkaven Spiegeln mit den Messwerten und der theoretisch erwarteten Funktion $g(L)$

Tabelle 6: Resonatorlänge und dazu gemessene Intensität bei einem Resonator mit einem flachen und einem konkaven Spiegel

L / inm	I / μA	I_{norm}
0.5	20.0	0.1
0.6	20.0	0.1
0.7	39.0	0.3
1.0	95.0	0.6
0.9	104.0	0.7
1.0	150.0	1.0

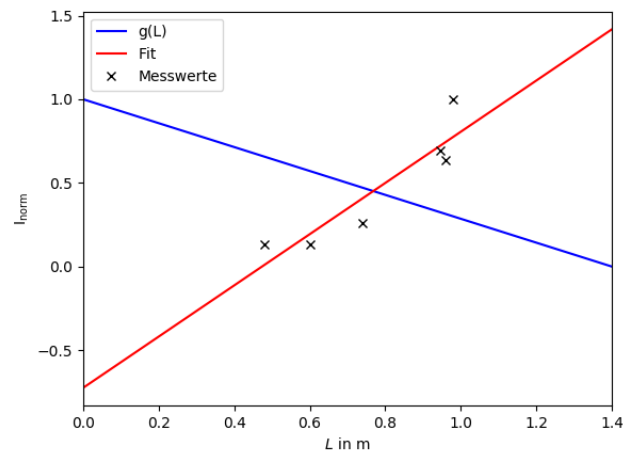


Abbildung 7: Fit zur Überprüfung der Stabilitätsbedingung bei einem gekrümmten und einem flachen Spiegel mit den Messwerten und der theoretisch erwarteten Funktion $g(L)$

5 Diskussion

In den Plots zur Intensitätsverteilung der beiden TEM-Moden ist zu sehen, dass die Intensität jeweils zu einer Seite verschoben ist, anstatt symmetrisch zu sein. Die gemessene Intensitätsverteilung passt zudem nicht zur optisch beobachteten. URSACHE?

Die Vermessung der Polarisationsrichtung ergibt wie erwartet eine Periodizität von π . Die Abweichung von ω vom erwarteten Wert beträgt 1.3 % und ist damit sehr klein und kann leichtsam durch menschliche Ungenauigkeit entstanden sein. Polarisation:

Die Periode ist nicht ganz wie erwartet 1, sondern etwas höher. Begründung?

Wellenlänge:

632.8 nm ist in der Anleitung, also alles gut.

Stabilität:

Was zur Hölle

Todo list

- Entweder müssen wir hier auch den First Guess in die Abbildungen machen oder
oder oben bei der Polarisisation auch nicht. 6
- Es könnte sich hier anbieten alle Messwerte in eine Tabelle zu schreiben, sodass
man nicht diese langen Tabellen auf fast leeren Seiten hat. 6

Abbildungsverzeichnis

1	Schematischer Aufbau eines Lasers [2]	3
2	Niveauschema der Abläufe im HeNe-Laser [1]	4
3	Intensität der TEM ₀₀ -Mode entlang der x-Achse gemessen	6
4	Intensität der TEM ₀₁ -Mode entlang der x-Achse gemessen	8
5	Fit zur Bestimmung der Polarisationsrichtung	10
6	Fit zur Überprüfung der Stabilitätsbedingung bei zwei konkaven Spiegeln mit den Messwerten und der theoretisch erwarteten Funktion $g(L)$	13
7	Fit zur Überprüfung der Stabilitätsbedingung bei einem gekrümmten und einem flachen Spiegel mit den Messwerten und der theoretisch erwarteten Funktion $g(L)$	14

Tabellenverzeichnis

1	Intensität der TEM ₀₀ -Mode entlang der x-Achse	7
2	Intensität der TEM ₀₁ -Mode entlang der x-Achse	9
3	Intensität in Abhängigkeit des Winkels des Polarisators	11
4	Berechnung der Wellenlänge λ durch die Abstände der Interferenzmaxima .	12
5	Resonatorlänge und dazu gemessene Intensität bei einem Resonator mit zwei konkaven Spiegeln	13
6	Resonatorlänge und dazu gemessene Intensität bei einem Resonator mit einem flachen und einem konkaven Spiegel	14

Literaturverzeichnis

- [1] Othmar Marti und Mauel Goncalves. *Vorlesungsskript PHYS2200.0 Atomphysik, Wirtschaftsphysiker und Lehramtskandidaten*. URL: <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/ap-2012/ap-2012.pdf>.
- [2] *Versuch V61: Der HeNe-Laser*. Fortgeschrittenen-Praktikum, TU Dortmund.