

FORTGESCHRITTENEN-PRAKTIKUM SS 2017

Der Helium-Neon-Laser

Durchführung: 24.04.17

1. Korrektur

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	8
4.2	Polarisation	10
4.3	Berechnung der Wellenlänge	12
4.4	Überprüfung der Stabilität	13
4.5	Resonator mit zwei gekrümmten Spiegeln	13
4.6	Resonator mit einem gekrümmten und einem planaren Spiegel	14
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 [3]. Alle Berechnung und Plots werden mit Python 3.6 durchgeführt bzw. erstellt, zum Fitten wird die Funktion *curve_fit* verwendet.

1 Theorie

In diesem Kapitel werden als ersten die physikalischen Grundlagen des Versuchs erläutert, dann auf den eigentlichen Versuchsaufbau eingegangen und zuletzt noch die konkrete Funktionsweise des HeNe-Lasers erklärt.

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 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

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

Die Energiedichte des einfallenden Strahlungsfelds ist dabei $\rho(x)$ 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

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

wenn $\Delta N(0) = -N$, d.h. alle Atome angeregt sind, und die Niveaus nicht entartet, d.h. $B_{12} = B_{21} = B$, sind [1]. 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.

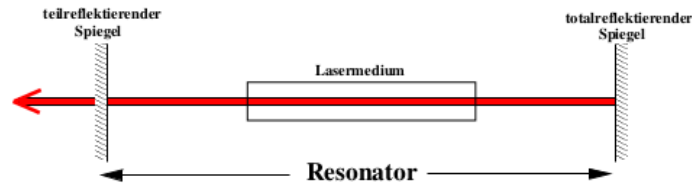


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Lasers [3]

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, wenn einer der beiden Spiegel gekrümmt ist, beispielsweise

$$g_{\text{curved}}(L) = \frac{1}{r_1 r_2} L^2 - \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) L + 1 \quad \text{wenn der zweite auch gekrümmt ist bzw.} \quad (3)$$

$$g_{\text{flat}}(L) = 1 - \frac{L}{r_1} \quad \text{wenn der zweite planar ist.} \quad (4)$$

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

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

modelliert 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 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$.

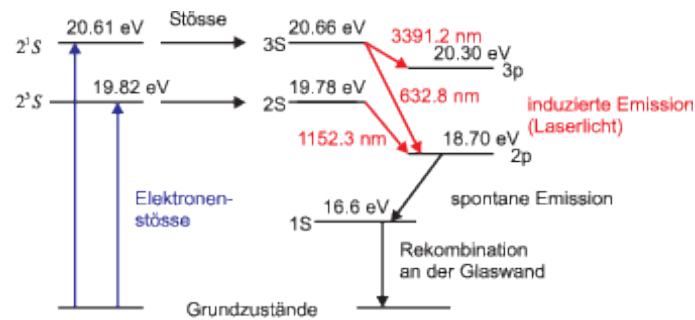


Abbildung 2: Niveauschema der Abläufe im HeNe-Laser [2]

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 Versatz des Strahlengangs zum reflektierenden Punkt hier geringer ist als bei dem scharfen Punkt.
3. Die Kammer mit dem Lasermedium wird auf die Schiene zwischen die Spiegel gestellt. Durch die vier Justierschrauben an der Kammer kann der Strahlgang 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

Nach der erfolgreichen Justierung des Lasers kann die Intensität der Moden, die Polarisation und die Wellenlänge bestimmt werden. Die Stabilitätsbedingung wird anschließend überprüft.

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 Zerstreulinse durchlaufen hat, und die Verschiebung des Maximums entlang der x-Achse x_0 . Der zugehörige Plot ist in Abbildung 3 zu finden.

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

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

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

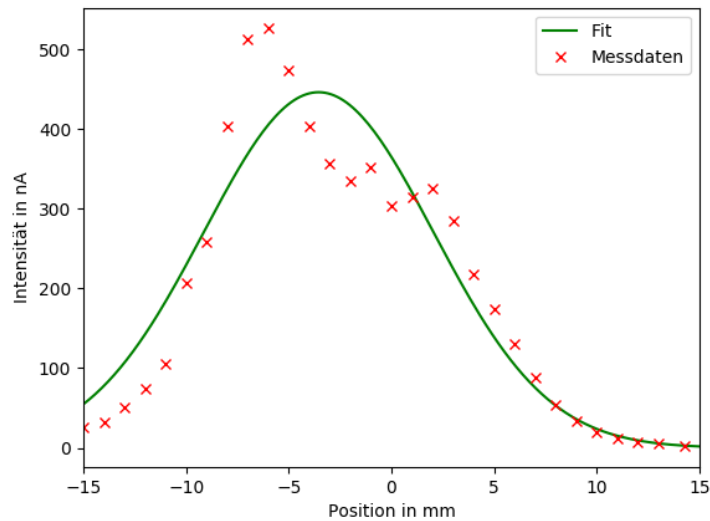


Abbildung 3: Intensität der TEM₀₀-Mode entlang der x-Achse gemessen

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

x in mm	I in nA
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
-10.0	207.00
-11.0	105.50
-12.0	73.50
-13.0	51.30
-14.0	31.70
-15.0	26.00

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:

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

Die Berechnung ergibt die Werte

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

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

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

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

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

Abbildung 4 zeigt den dazugehörigen Plot.

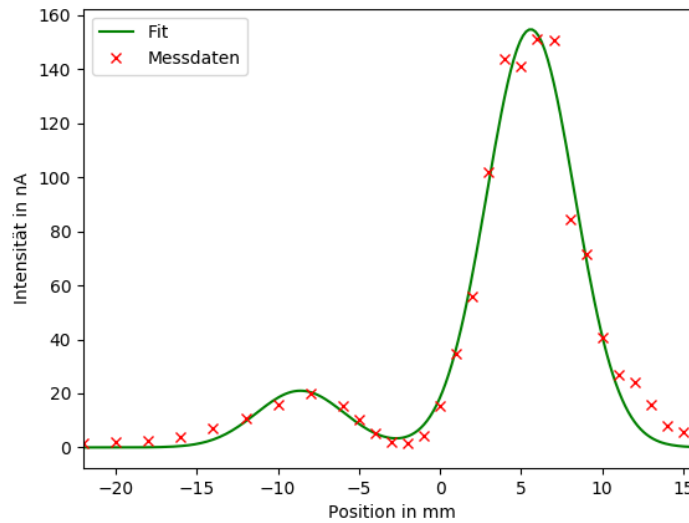


Abbildung 4: Intensität der TEM₀₁-Mode entlang der x-Achse gemessen

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. Die Funktion

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

wird 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 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.

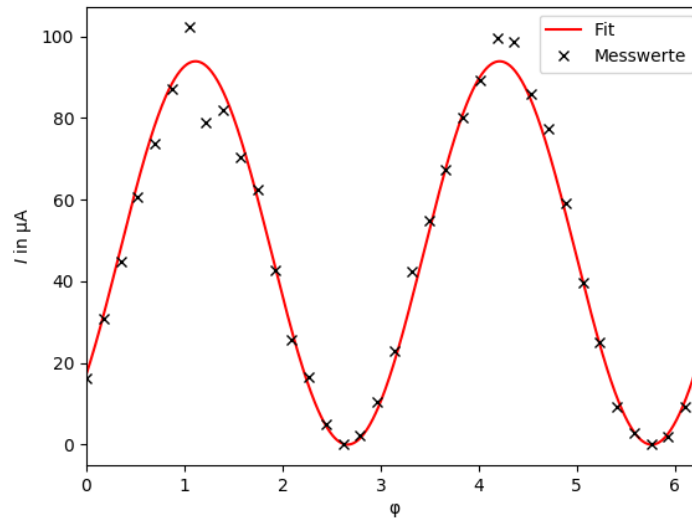


Abbildung 5: Fit zur Bestimmung der Polarisationsrichtung

Tabelle 3: Intensität in Abhängigkeit des Winkels des Polarisators

φ	I in μA
2.62	0
2.79	2
2.97	11
3.14	23
3.32	42
3.49	55
3.67	67
3.84	80
4.01	89
4.19	99
4.36	99
4.54	86
4.71	78
4.89	59
5.06	40
5.24	25
5.41	9
5.59	3
5.76	0
5.93	2
6.11	9
0.00	16
0.17	31
0.35	45
0.52	60
0.70	74
0.87	87
1.05	102
1.22	79
1.40	82
1.57	70
1.75	62
1.92	43
2.09	26
2.27	16
2.44	5

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 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

4.4 Überprüfung der Stabilität

4.5 Resonator mit zwei gekrümmten Spiegeln

Durch Einsetzen von Gleichung (3) ($r_1 = r_2 = 1.400\text{ m}$) in die Stabilitätsbedingung (5) ergibt sich, dass der Resonator optisch stabil ist, wenn für die Länge L der Resonators gilt $0\text{ m} \leq L < 2.800\text{ m}$. Dieser Bereich ist in Abbildung 6 blau hinterlegt. Die minimale bzw. maximale Länge des Resonators, vorgegeben durch die Versuchsanordnung sind durch die roten Linien gekennzeichnet. Im gesamten möglichen Bereich ist der Aufbau eines stabilen Lasers möglich, wie die eingezeichneten Messwerte aus Tabelle 5 belegen.

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

L in m	I in μA
0.59	177
0.77	440
0.86	530
1.10	530
1.24	350
1.42	330
1.55	440
1.66	570
1.92	500
2.06	450

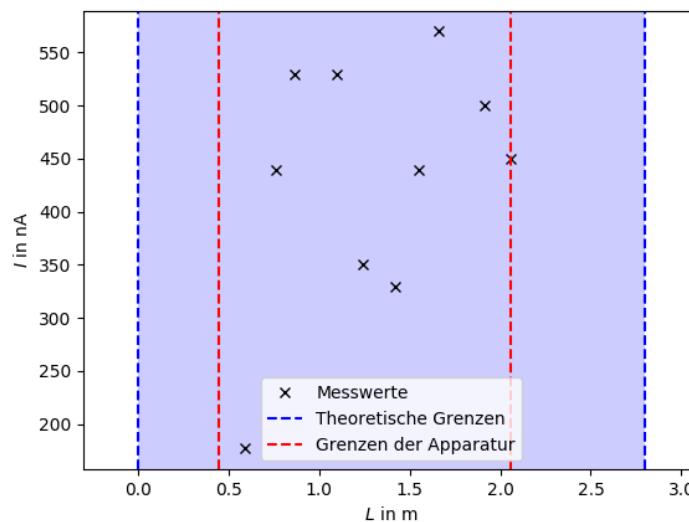


Abbildung 6: Veranschaulichung der Stabilitätsbedingung für einen Resonator mit zwei gekrümmten Spiegeln

4.6 Resonator mit einem gekrümmten und einem planaren Spiegel

Das Vorgehen ist hier analog zu 4.5. Dieses Mal wird (4) ($r_1 = 1.400\text{ m}, r_2 \rightarrow \infty$) in (5) eingesetzt und ergibt eine stabile Resonatorlänge L für $0\text{ m} \leq L < 1.400\text{ m}$. Der stabile Bereich ist wieder blau hinterlegt und die untere Grenze, die durch die Länge der Kammer des Lasermediums bedingt ist, ist wiederum als rote Linie eingezeichnet. Die Messwerte aus Tabelle 6 decken hier nicht den ganzen möglichen Bereich ab, denn bei einer Resonatorlänge $L > 0.98\text{ m}$ kann der Laser nicht mehr zum Lasen gebracht werden.

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

L in m	I in μA
0.48	20
0.60	20
0.74	39
0.96	95
0.95	104
0.98	150

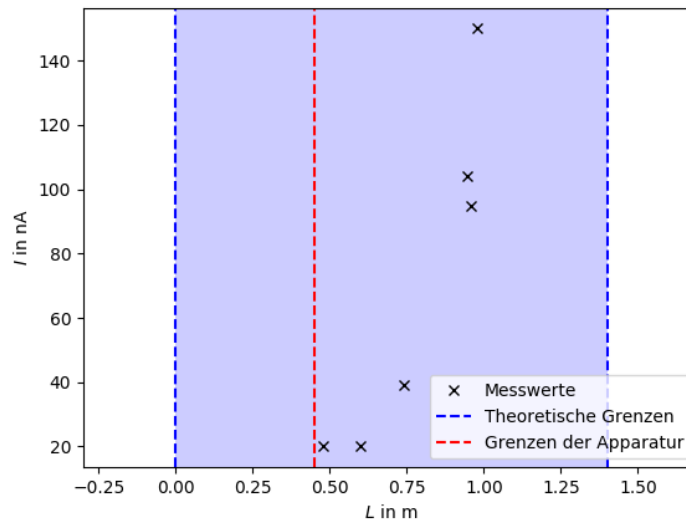


Abbildung 7: Veranschaulichung der Stabilitätsbedingung für einen Resonator mit einem gekrümmten und einem planaren Spiegel

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.

Für die TEM₀₀-Mode wird erwartet, dass sie durch eine Gauß-Verteilung am besten approximiert wird. Optisch ist jedoch zu erkennen, dass zwei überlagerte Gauß-Kurven mit unterschiedlichen Mittelpunkten die Messungen besser beschreiben würden. Das kann daran liegen, dass die TEM₀₁-Mode auch verstärkt wurde und große Anteile an den Messwerten hat. Die Fit-Parameter der zur TEM₀₀ gehörenden Gauß-Verteilung sind:

$$\begin{aligned} I_0 &= (446 \pm 23) \text{ nA} \\ \omega &= (-11.2 \pm 0.7) \text{ mm} \\ x_0 &= (3.55 \pm 0.34) \text{ mm} \end{aligned}$$

Die TEM₀₁-Mode wird durch zwei überlagerte Gauß-Verteilungen beschrieben. Entgegen der Erwartung zeigt sich hier, dass die Intensitäten I_{0l} und I_{0r} stark von einander abweichen. Es ist ebenfalls schlecht, dass sich die Strahlenbreiten ω der verschiedenen Moden um den Faktor zwei voneinander unterscheiden. Die Fit-Parameter der zur TEM₀₁ gehörenden überlagerten Gauß-Verteilung sind:

$$\begin{aligned} I_{0l} &= (21 \pm 5) \text{ nA} \\ x_{0l} &= (-5.59 \pm 0.09) \text{ mm} \\ I_{0r} &= (155 \pm 4) \text{ nA} \\ x_{0r} &= (8.6 \pm 0.8) \text{ mm} \\ \omega &= (5.42 \pm 0.17) \text{ mm} \end{aligned}$$

Die Vermessung der Polarisationsrichtung ergibt wie erwartet eine Periodizität von π . Die Abweichung von ω vom erwarteten Wert $\omega_{\text{exp}} = 1.000$ beträgt +1.3 %. Diese kleine Abweichung kann mit der menschlichen Komponente der Messung erklärt werden.

$$\begin{aligned} I_0 &= (94 \pm 1) \text{ }\mu\text{A} \\ \omega &= 1.013 \pm 0.006 \\ \varphi_0 &= (0.141 \pm 0.006) \pi . \end{aligned}$$

Die Messung der Wellenlänge ergibt einen Wert, der 0.7 % höher ist als der Literaturwert in [3].

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Mess}} &= (637.0 \pm 1.4) \text{ nm} \\ \lambda_{\text{Lit}} &= 632.8 \text{ nm} \end{aligned}$$

Die Stabilität konnte nur bedingt überprüft werden, da nicht alle möglichen Resonatorlängen vermessen werden konnten. Im Falle der beiden gekrümmten Spiegel konnte

die Stabilitätsbedingung im Bereich der Möglichkeiten bestätigt werden. Im Fall des Resonators mit einem planaren Spiegel dagegen gab es eine obere Grenze von 0.98 m für den Aufbau eines funktionierenden Lasers, der signifikant unter dem theoretisch vorhergesagten Wert von 1.40 m bleibt.

Da Messfehler durch kleinschrittige Datennahme (Polarisation) oder Aufnahme mehrerer Daten für die Berechnung eines Wertes (Wellenlänge) so gut wie möglich vermieden wurden, liegt die Ursache für die Abweichungen vermutlich in Verunreinigungen der optischen Bauteile. Einzig bei der Überprüfung der Stabilitätsbedingung war die menschliche Komponente wahrscheinlich entscheidend, denn die Einstellung eines Lasers erfordert bei einem planaren Spiegel größere Sorgfalt als bei einem gekrümmten. Das liegt daran, dass das Licht exakt senkrecht auf den planaren Spiegel fallen muss und keine Fokussierung stattfindet. Da die erforderliche Genauigkeit mit dem Resonatorabstand steigt, lässt sich die obere Grenze mit fehlender Geduld und feinmotorischen Fähigkeiten der Experimentatoren erklären.

Abbildungsverzeichnis

1	Schematischer Aufbau eines Lasers [3]	3
2	Niveauschema der Abläufe im HeNe-Laser [2]	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	Veranschaulichung der Stabilitätsbedingung für einen Resonator mit zwei gekrümmten Spiegeln	13
7	Veranschaulichung der Stabilitätsbedingung für einen Resonator mit einem gekrümmten und einem planaren Spiegel	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] URL: http://www.uni-mainz.de/FB/Chemie/Basche/Skriptum_Kap_8.pdf (besucht am 26.04.2017).
- [2] 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> (besucht am 24.04.2017).
- [3] *Versuch V61: Der HeNe-Laser*. Fortgeschrittenen-Praktikum, TU Dortmund.