

V61

HeNe-Laser

Sophie Bork	Michael Windau
sophie.bork@gmx.de	michael.windau@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.12.18	Abgabe: 07.01.18
------------------------	------------------

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Aufbau	4
4 Durchführung	4
5 Auswertung	5
5.1 Stabilität	5
5.2 Polarisation	8
5.3 TEM-Moden	9
5.4 Wellenlänge	12
6 Diskussion	12
7 Messwerte	12
Literatur	18

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen unterschiedliche Eigenschaften eines Helium-Neon-Lasers, wie die Polarisierung, die Wellenlänge, das Aussehen verschiedener Moden, sowie die Stabilitätsbedingungen für mehrere Resonatoren, gemessen werden.

2 Theorie

Ein Laser, dessen Bezeichnung eine Abkürzung für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ist, sendet Licht aus, welches monochromatisch, sehr intensiv und kohärent ist. Ein Helium-Neon-Laser enthält ein Gasgemisch, in dem das Verhältnis von Helium zu Neon 5:1 beträgt. Neon ist dabei das aktive Lasermedium, das für das Strahlungsspektrum des Lasers verantwortlich ist. Helium ist das sogenannte Pumpgas, das nötig ist, um eine Besetzungszahlinversion durchzuführen. Dies funktioniert vereinfacht betrachtet folgendermaßen: Die Neon-Atome besitzen einen Grundzustand und einen angeregten Zustand. Im thermischen Gleichgewicht liegen im Neon mehr Atome im Grundzustand als in einem angeregten Zustand vor. Die Helium-Atome werden von außen durch sogenanntes "Pumpen" kontinuierlich angeregt und geben bei Stoßprozessen ihre Energie an die Neon-Atome ab. Dadurch liegen am Ende mehr Neon-Atome im angeregten Zustand als im Grundzustand vor. Die Atome im Grundzustand können ein Photon absorbieren und bei entsprechend hoher Energie in den angeregten Zustand übergehen. Die Atome im angeregten Zustand können spontan in den Grundzustand zurückfallen und dabei Photonen emittieren. Bei der stimulierten Emission wird ein Atom im Grundzustand durch ein Photon gezielt angeregt, damit es in den höheren Zustand übergehen und daraus wieder ein Photon emittieren kann. Durch Besetzungszahlinversion wird die stimulierte Emission wahrscheinlicher als die spontane, sodass sich die Kohärenz des Lichtes signifikant verbessert.

In der Realität besitzen Helium und Neon mehr als 2 mögliche Zustände. Das Helium wird durch äußere Energiezufuhr entweder auf sein 2^1S_0 -Niveau oder auf sein 2^3S_1 -Niveau gebracht. Diese haben ungefähr die gleiche Energie wie das $5s$ - und das $4s$ -Niveau von Neon, sodass die Neon-Atome bei Stößen auf diese Niveaus gehoben werden können. Von dort haben die Atome verschiedene Möglichkeiten, Photonen abzugeben. Am häufigsten liegt der Übergang vom $5s$ - ins $3p$ -Niveau vor, weshalb die Linie mit der Wellenlänge 632,8 nm [1] am intensivsten ist.

Neben Lasermedium und Pumpgas benötigt ein Laser einen Resonator, der zu einer Rückkopplung und somit zu einer Verstärkung des Lichts führt. Er wird durch zwei gegenüberliegende Spiegel realisiert, die dafür sorgen, dass das aktive Lasermedium von einem Großteil des Laserstrahls mehrfach durchlaufen wird. Dadurch, dass einer der Spiegel teildurchlässig ist, kann ein kleiner Teil des Strahls entweichen. Die Form der beiden Resonatorspiegel, welche gekrümmt oder planar sein können, hat einen Einfluss auf die Eigenschaften des Resonators. Der Resonatorparameter g_i wird aus der Gleichung

$$g_i = 1 - \frac{L}{r_i} \quad (1)$$

bestimmt, wobei r_i die Radien der Spiegelkrümmung sind und L die Resonatorlänge ist. Ein optisch stabiler Resonator liegt vor, wenn für die Resonatorparameter der beiden Spiegel gilt:

$$0 \leq g_1 \cdot g_2 < 1 . \quad (2)$$

Möglichst geringe Verluste durch die Spiegel können erzielt werden, indem sich beide Brennpunkte am gleichen Ort befinden.

Im Resonator kommen longitudinale und transversale Moden vor, von denen für die hier vorgenommenen Untersuchungen aber nur die transversalen wichtig sind, die durch nicht optimale Versuchsbedingungen wie Spiegelunebenheiten hervorgerufen werden. l ist die Knotenanzahl in x-Richtung und q die Knotenanzahl in y-Richtung. Somit werden die transversalen Moden in der Form TEM_{lq} angegeben. TEM steht dabei für transverse electromagnetic mode. Kleinere Moden haben eine höhere Symmetrie und deshalb weniger Verluste, weshalb die Grundmode TEM_{00} am besten darstellbar ist. Ihre Intensitätsverteilung ist gaußförmig.

3 Aufbau

Die Grundlage des Aufbaus bildet eine optische Schiene, an welche alle benötigten Versuchskomponenten angeschraubt werden können. Fest mit der Schiene verbunden sind der Justierlaser am linken Ende, der Helium-Neon-Laser in der Mitte und eine Photodiode am rechten Ende. Weitere Elemente, wie verschiedene Spiegel mit Durchmesser 12,7 mm, ein Schirm mit Fadenkreuz, ein Polarisationsfilter, ein Draht oder ein optisches Gitter, können je nach Bedarf an beliebigen anderen Stellen der Schiene hinzugefügt werden. Der verwendete Helium-Neon-Laser ist 408 mm lang und hat einen Durchmesser von 1,1 mm. An jedem Laserrohrenden befindet sich ein Brewster-Fenster, durch welches parallel polarisiertes Licht beinahe verlustfrei gelangen kann.

4 Durchführung

Im ersten Versuchsteil wird die Intensität des Lasers in Abhängigkeit von der Resonatorlänge bestimmt, um die Stabilitätsbedingung zu überprüfen. Dazu muss grundsätzlich links vom HeNe-Laser ein Spiegel angebracht werden und rechts vom Laser in etwa gleichem Abstand ein weiterer. Die Intensität wird für verschiedene Spiegelabstände mithilfe der Photodiode gemessen. Um eine hohe Messqualität zu erreichen, müssen beide Spiegel vorher einjustiert werden. Dazu wird zunächst der erste Spiegel gemeinsam mit einem Fadenkreuz in die optische Schiene gestellt und der Justierlaser eingeschaltet. Die Spiegelposition bezüglich der optischen Achse wird mithilfe von Justierschrauben so lange verändert, bis der Punkt des Justierlasers sich genau in der Mitte des Fadenkreuzes befindet. Der gleiche Vorgang wird für den zweiten Spiegel wiederholt. Nach der Justage sollte der HeNe-Laser sichtbar sein, und der Justierlaser ausgeschaltet werden. In der ersten Messung werden ein planarer und ein konkaver Spiegel mit Krümmungsradius 1400 mm verwendet. Es werden 25 Messwerte

aufgenommen bei Abständen zwischen 50 und 104 cm. Die zweite Messung ermittelt den Zusammenhang bei zwei konkaven Spiegeln mit den Krümmungsradien 1400 mm. Hier werden 22 Intensitäten für Abstände zwischen 50 und 140 cm gemessen.

Für die folgenden Messungen werden zwei konkave Spiegel verwendet.

Um die Polarisation des Lichts zu messen, wird ein Polarisationsfilter vor die Photodiode geschraubt. Dieser wird in 10° -Schritten in einem Bereich von 0 bis 360° gedreht. Die zugehörigen Intensitäten werden gemessen.

Als nächstes wird die TEM-Grundmode vermessen. Dazu wird eine Zerstreuungslinse vor die Photodiode geschraubt, sodass der Laserstrahl quasi vergrößert wird. Danach wird die Photodiode auf einer Schiene senkrecht zur optischen Achse bewegt, um die Intensität des Strahls in verschiedenen Bereichen zu erfassen. Insgesamt werden 31 Intensitäten auf einer Strecke von 60 mm aufgenommen.

Um die TEM₀₁-Mode zu vermessen, wird ein 0,005 mm dicker Wolframdraht zwischen dem Laser-Gehäuse und dem Spiegel auf der Seite der Photodiode platziert und die gleiche Messung wie im vorherigen Teil durchgeführt, mit dem Unterschied, dass 63 Messwerte bestimmt werden.

Im letzten Teil wird die Wellenlänge des Lasers ermittelt. Dazu wird vor die Photodiode ein Schirm und davor ein Gitter geschraubt, welches eine Dichte von 100 Stäben pro mm hat. Auf dem Schirm können dann Beugungsmaxima nullter und erster Ordnung identifiziert werden. Der Abstand vom Hauptmaximum zu den Maxima erster Ordnung sowie der Abstand vom Gitter zum Schirm werden gemessen.

5 Auswertung

In dem folgenden Kapitel wird, aus den in Kapitel 7 aufgetragenen Messwerten, der HeNe-Laser auf Stabilität, Polarisation, TEM-Moden und Wellenlänge untersucht.

5.1 Stabilität

Das für die Stabilitätsbedingung benötigte Produkt $g_1 g_2$ ist in Abhängigkeit von L in Abbildung 1 aufgetragen. Für die Auswertung ist dabei die Kurve für die zwei konkaven Spiegel mit $r = 1400$ mm, sowie die Konfiguration aus planaren und konkaven Spiegel von Bedeutung.

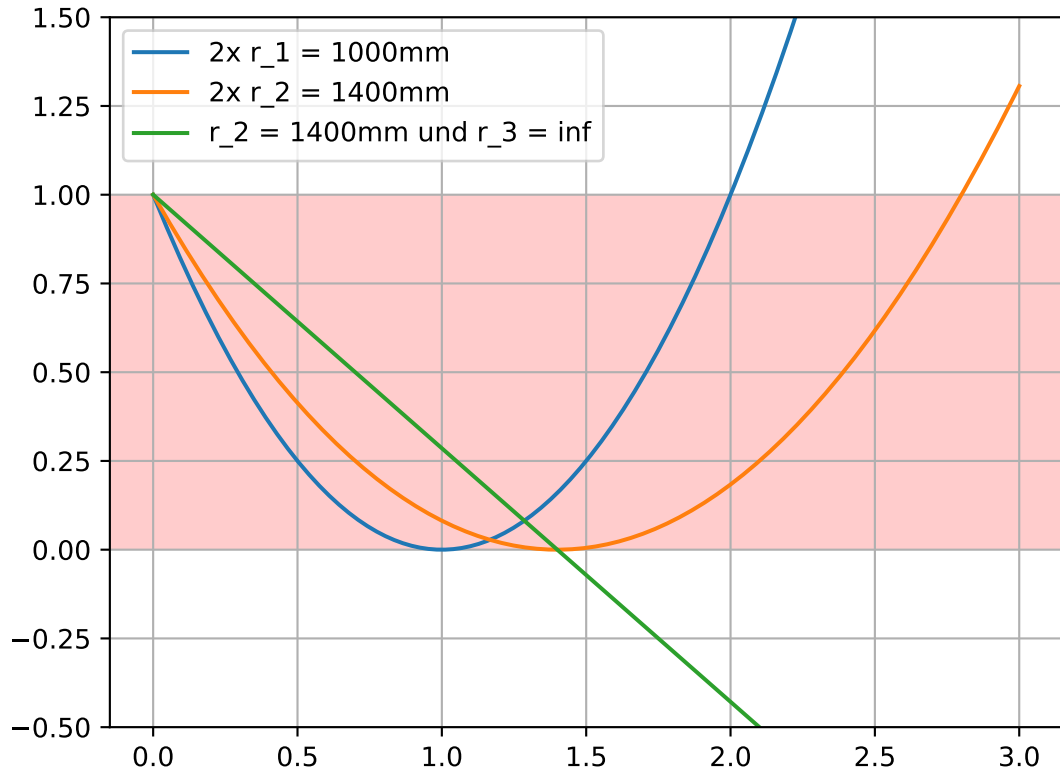


Abbildung 1: Stabilitätsbedingung für verschiedene Resonatorkonfigurationen.

Die Messdaten für den Resonator mit dem planaren und konkaven Spiegel sind in Tabelle 1 aufgelistet.

An die Messdaten wird eine lineare Funktion mit den Parametern a und b gefittet:

$$I_{\text{lin}}(L) = a \cdot L + b \quad (3)$$

Der Fit und die Messdaten sind in Abbildung 2 abgebildet.

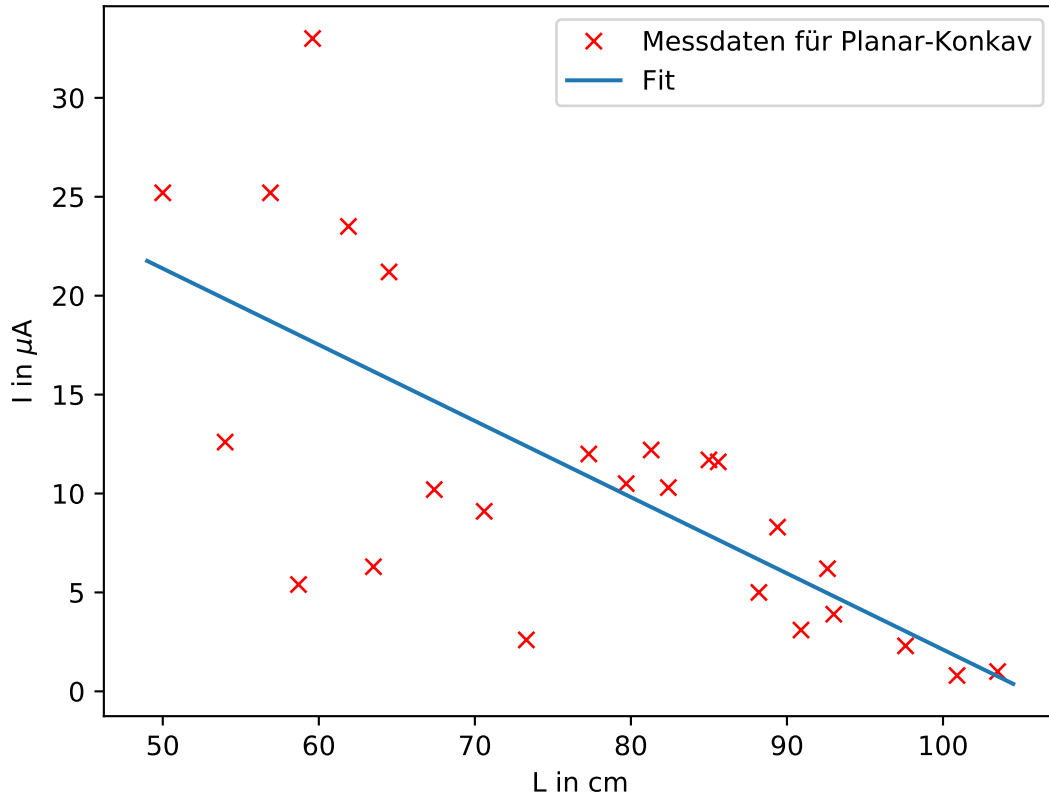


Abbildung 2: Fit und Messdaten der planar-konkav Konfiguration.

Aus dem Fit ergeben sich für die Parameter folgende Werte:

$$a = (-0,38 \pm 0,08) \cdot 10^{-3} \frac{\text{mA}}{\text{cm}} \quad (4)$$

$$b = (41 \pm 6) \cdot 10^{-3} \text{ mA} \quad (5)$$

$$(6)$$

Die Messdaten für den Resonator mit zwei konkaven Spiegeln sind in Tabelle 2 aufgelistet. Um einen möglichst quadratischen Verlauf zu erkennen, wurden für den Fit nur die mit * markierten Werte verwendet.

Im Gegensatz zur planaren Konfiguration, wird in diesem Fall eine quadratische Funktion mit den Parametern a , b und c an die Messwerte gefittet:

$$I_{\text{quad}}(L) = a \cdot L^2 + b \cdot L + c \quad (7)$$

In Abbildung 3 ist der Fit und die Messwerte gefittet. Es ergeben sich folgende Werte für die Parameter:

$$a = (0,011 \pm 0,006) \cdot 10^{-3} \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \quad (8)$$

$$b = (-3 \pm 1) \cdot 10^{-3} \frac{\text{mA}}{\text{cm}} \quad (9)$$

$$c = (199 \pm 47) \cdot 10^{-3} \text{mA} \quad (10)$$

$$(11)$$

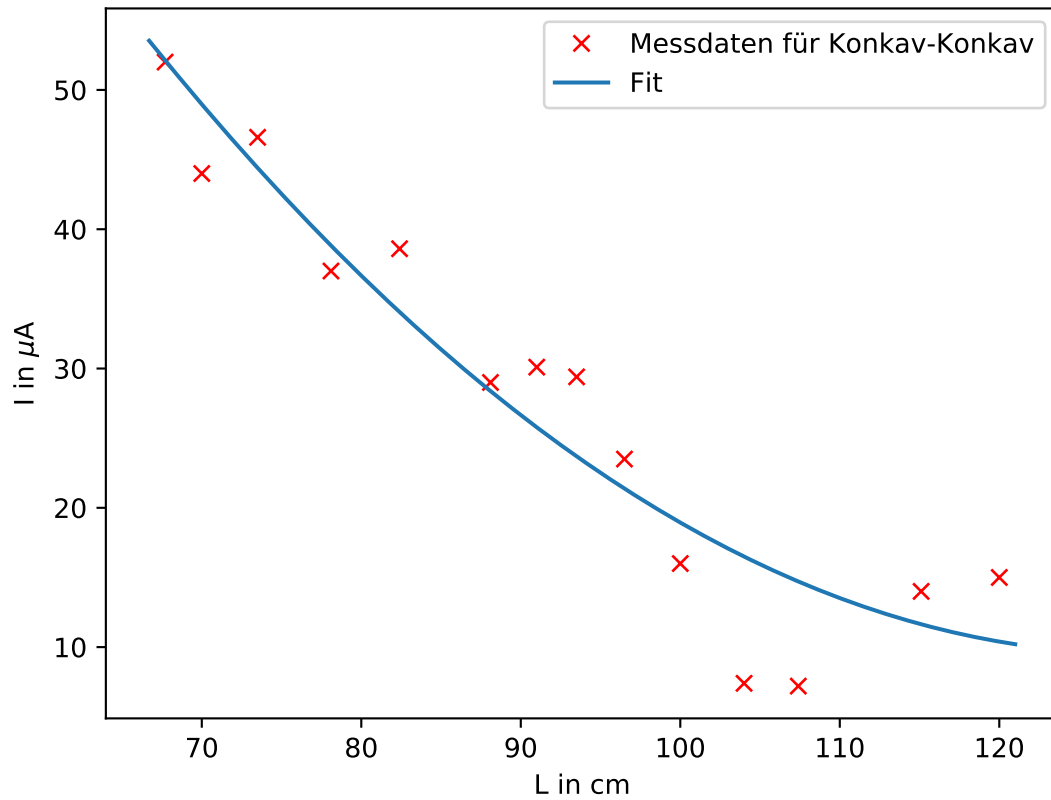


Abbildung 3: Fit und Messdaten der konkav-konkav Konfiguration.

5.2 Polarisation

Die Messdaten der Polarisationsmessung sind in Tabelle 3 dargestellt. Es wird eine Fitfunktion der Form

$$I_{\text{pol}}(\varphi) = I_0 \cdot \cos^2(\varphi - \varphi_0) \quad (12)$$

an die Messdaten gefittet, und so die Parameter I_0 und φ_0 bestimmt. Der Fit und die Messdaten sind in Abbildung 4 abgebildet. Für die Parameter ergeben sich die Werte:

$$I_0 = (4,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ mA} \quad (13)$$

$$\varphi_0 = (-0,40 \pm 0,04) \text{ rad} \quad (14)$$

$$(15)$$

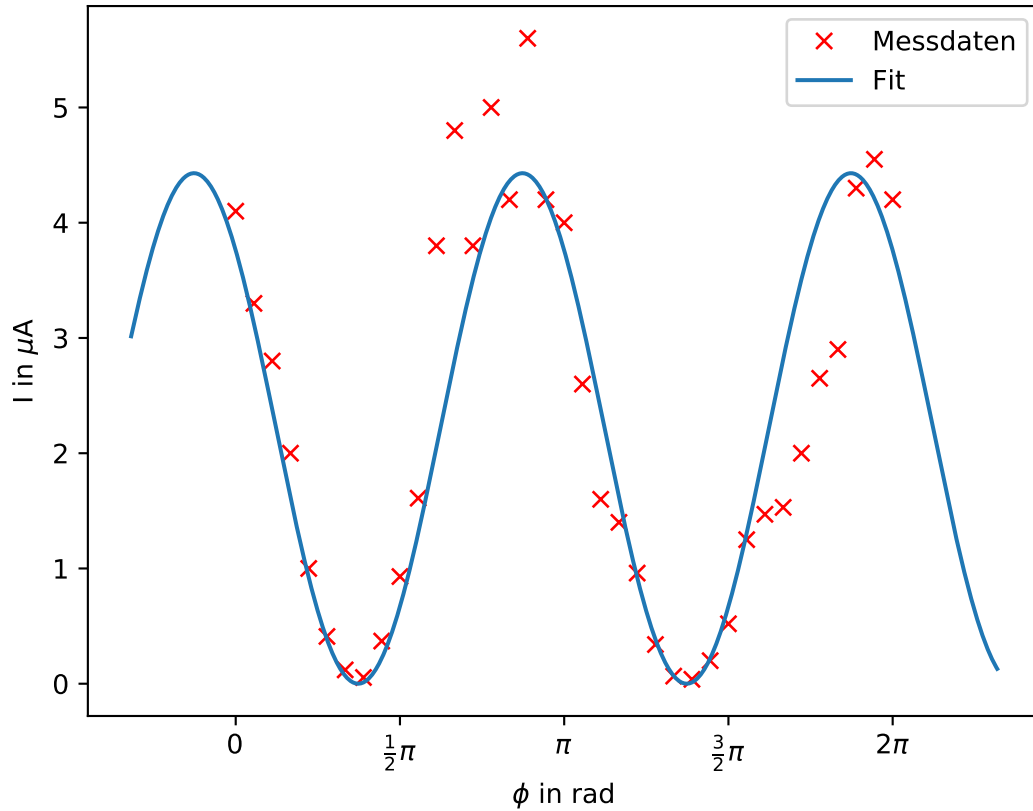


Abbildung 4: Fit und Messdaten der Polarisationsmessung.

5.3 TEM-Moden

Die aufgenommenen Messdaten für die Grundmode sind in Tabelle 4 aufgetragen. Als Fitfunktion wird eine Gaußfunktion verwendet die die folgende Form hat:

$$I_{\text{grund}}(L) = I_0 \cdot \exp \left(-2 \left(\frac{L - d_0}{\omega} \right)^2 \right) \quad (16)$$

Dabei steht d_0 für die Verschiebung des Strahlmittelpunktes zum Nullpunkt der Skala. Die Parameter I_0 , d_0 und ω ergeben sich durch den Fit zu:

$$I_0 = (1,21 \pm 0,02) \cdot 10^{-3} \text{ mA} \quad (17)$$

$$d_0 = (-6,3 \pm 0,2) \text{ mm} \quad (18)$$

$$\omega = (18,0 \pm 0,4) \text{ mm} \quad (19)$$

$$(20)$$

Der Fit und die Messwerte sind in Abbildung 5 dargestellt.

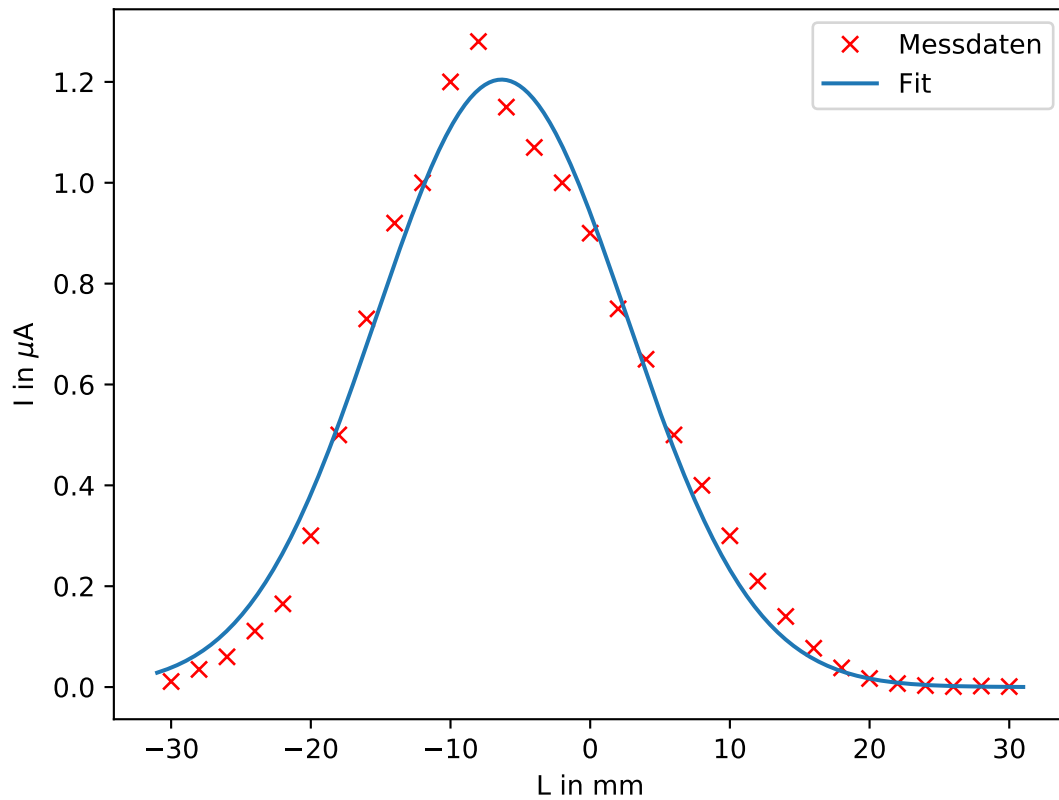


Abbildung 5: Fit und Messdaten der TEM-Grundmode.

Die Messwerte für die erste Mode sind in Tabelle 5 aufgetragen. Als Fitfunktion wird eine asymmetrische doppelte Gaußkurve der Form

$$I_{\text{erste}}(L) = I_{0,1} \exp \left(-2 \left(\frac{L - d_{0,1}}{\omega_1} \right)^2 \right) + I_{0,2} \exp \left(-2 \left(\frac{L - d_{0,2}}{\omega_2} \right)^2 \right) \quad (21)$$

verwendet. Es ergeben sich folgende Parameter:

$$I_{0,1} = (97 \pm 2) \text{ nA} \quad (22)$$

$$d_{0,1} = (-14,9 \pm 0,1) \text{ mm} \quad (23)$$

$$\omega_1 = (9,7 \pm 0,3) \text{ mm} \quad (24)$$

$$I_{0,2} = (81 \pm 2) \text{ nA} \quad (25)$$

$$d_{0,2} = (7,9 \pm 0,2) \text{ mm} \quad (26)$$

$$\omega_2 = (10,3 \pm 0,3) \text{ mm} \quad (27)$$

$$(28)$$

Der Fit ist in Abbildung 6 dargestellt.

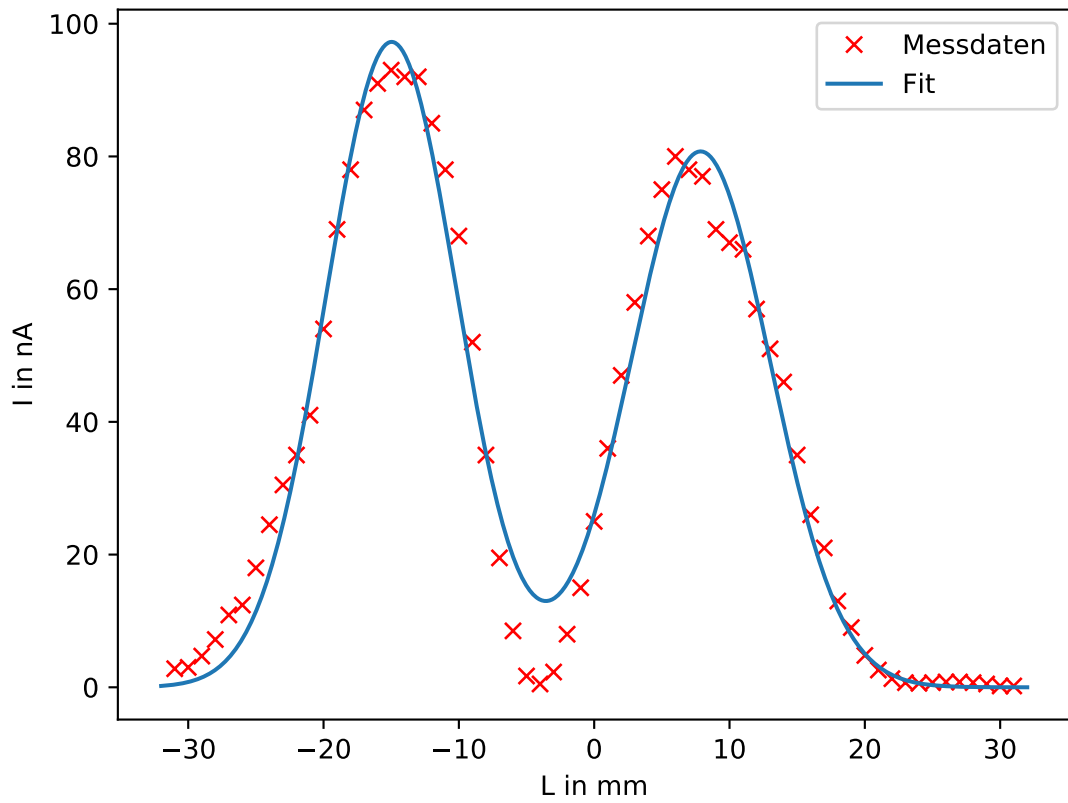


Abbildung 6: Fit und Messdaten der ersten TEM-Mode.

5.4 Wellenlänge

Zur Bestimmung der Wellenlänge des HeNe-Lasers wird die Länge L_1 vom Gitter (mit Gitterkonstante a) zum Maximum 0.ter Ordnung, sowie die Abstände $L_{2,1}$ und $L_{2,2}$ vom Maximum 0.ter Ordnung zu den Maxima 1.ter Ordnung benötigt:

$$a = 1/100 \text{ mm} \quad (29)$$

$$L_1 = 67 \text{ cm} \quad (30)$$

$$L_{2,1} = 4,2 \text{ cm} \quad (31)$$

$$L_{2,2} = 4,25 \text{ cm} \quad (32)$$

$$(33)$$

Aus den Längen $L_{2,1}$ und $L_{2,2}$ wird der Mittelwert L_2 gebildet, und somit über folgende Formel die Wellenlänge bestimmt:

$$\lambda = \frac{a}{k} \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{L_2}{L_1} \right) \right) \quad (34)$$

Dabei steht k für die Ordnung (in diesem Fall 1), und ergibt damit eine Wellenlänge von

$$\lambda = (629 \pm 4) \text{ nm}. \quad (35)$$

6 Diskussion

Bei der Stabilitätsmessung gibt es kaum Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Erwartungen nach Abbildung 1. Während bei der planar-konkaven Konfiguration zumindest eine abfallende Tendenz zu erkennen ist, lässt sich bei der konkav-konkaven Konfiguration nur durch auslassen einiger Messdaten der Fit an die Werte anpassen.

In der Polarisationsmessung wird ein quadratischer Kosinus-Term mit konstanter Phase als Fitfunktion verwendet. Der Grund dafür ist, dass der Laser bereits linear polarisiertes Licht aussendet, welches durch einen Kosinus mit konstanter Phase beschrieben werden kann, und der Strahl durch den Polarisationsfilter eine weitere Kosinuspotenz erhält.

Diese Funktion spiegelt sich ziemlich genau in den Messwerten wieder.

Die Grundmodenmessung lässt sich ziemlich genau mit einer Gaußverteilung fitten. Bei der ersten Mode wird eine asymmetrische doppelte Gaußverteilung angenommen, da durch die Breite des Drahtes, und den dadurch entstehenden Schatten, eine Seite gesenkt wird.

Die ermittelte Wellenlänge liegt bei $(629 \pm 4) \text{ nm}$, und ist daher im Bereich von rotem sichtbaren Licht. Der Literaturwert liegt mit $632,82 \text{ nm}$ im Fehlerbereich des ermittelten Wertes. Dabei ist jedoch zu bemerken, dass mit den zwei Längen zwischen den Maxima zu wenig Messwerte vorhanden sind um eine sichere Aussage zu treffen.

7 Messwerte

Abstand in cm	Intensität in μA
50,0	25,2
54,0	12,6
56,9	25,2
58,7	5,4
59,6	33,0
61,9	23,5
63,5	6,3
64,5	21,2
67,4	10,2
70,6	9,1
73,3	2,6
77,3	12,0
79,7	10,5
81,3	12,2
82,4	10,3
85,0	11,7
85,6	11,6
88,2	5,0
89,4	8,3
90,9	3,1
92,6	6,2
93,0	3,9
97,6	2,3
100,9	0,8
103,5	1,0

Tabelle 1: Abstand und Intensität bei einem planaren und einem konkaven Spiegel.

Abstand in cm	Intensität in μA
50,5	38,5
54,8	31,5
58,4	29,5
64,5	29,0
67,7*	52,0*
70,0*	44,0*
73,5*	46,6*
78,1*	37,0*
82,4*	38,6*
88,1*	29,0*
91,0*	30,1*
93,5*	29,4*
96,5*	23,5*
100,0*	16,0*
104,0*	7,4*
107,4*	7,2*
115,1*	14,0*
120,0*	15,0*
124,5	48,0
130,0	62,0
137,2	19,0

Tabelle 2: Abstand und Intensität bei zwei konkaven Spiegeln.

Winkel in °	Intensität in μA
0	4,10
10	3,30
20	2,80
30	2,00
40	1,00
50	0,41
60	0,12
70	0,05
80	0,37
90	0,93
100	1,61
110	3,80
120	4,80
130	3,80
140	5,00
150	4,20
160	5,60
170	4,20
180	4,00
190	2,60
200	1,60
210	1,40
220	0,96
230	0,34
240	0,06
250	0,04
260	0,20
270	0,52
280	1,25
290	1,47
300	1,53
310	2,00
320	2,65
330	2,90
340	4,30
350	4,55
360	4,20

Tabelle 3: Winkel des Polarisationsfilters und Intensität.

Position in mm	Intensität in nA
-30	0,011
-28	0,035
-26	0,060
-24	0,111
-22	0,165
-20	0,300
-18	0,500
-16	0,730
-14	0,920
-12	1,000
-10	1,200
-8	1,280
-6	1,150
-4	1,070
-2	1,000
0	0,900
2	0,750
4	0,650
6	0,500
8	0,400
10	0,300
12	0,210
14	0,140
16	0,077
18	0,038
20	0,017
22	0,007
24	0,003
26	0,001
28	0,002
30	0,001

Tabelle 4: Position der Diode und gemessene Intensität für die Grundmode.

Position in mm	Intensität in μA	Position in mm	Intensität in μA
-31	2,8	1	36,0
-30	3,0	2	47,0
-29	4,7	3	58,0
-28	7,2	4	68,0
-27	10,9	5	75,0
-26	12,4	6	80,0
-25	18,0	7	78,0
-24	24,5	8	77,0
-23	30,5	9	69,0
-22	35,0	10	67,0
-21	41,0	11	66,0
-20	54,0	12	57,0
-19	69,0	13	51,0
-18	78,0	14	46,0
-17	87,0	15	35,0
-16	91,0	16	26,0
-15	93,0	17	21,0
-14	92,0	18	13,0
-13	92,0	19	9,0
-12	85,0	20	4,8
-11	78,0	21	2,6
-10	68,0	22	1,3
-9	52,0	23	0,7
-8	35,0	24	0,6
-7	19,5	25	0,7
-6	8,5	26	0,8
-5	1,7	27	0,8
-4	0,5	28	0,7
-3	2,3	29	0,5
-2	8,0	30	0,2
-1	15,0	31	0,2
0	25,0		

Tabelle 5: Position der Diode und gemessene Intensität für die erste Mode.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 61 Der HeNe-Laser*. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/V61.pdf>.