

Durchführung: 25.06.2018

1. Abgabe: 09.07.2018

2. Abgabe: 27.07.2018

PRAKTIKUMSPROTOKOLL V61

HeNe-LASER

Anneke Reinold¹,
Paul-Simon Blumenkamp²

¹anneke.reinold@tu-dortmund.de

²paul-simon.blumenkamp@tu-dortmund.de

1 Einleitung

Der Helium-Neon Laser ist der erste Laser, der im kontinuierlichen Betrieb gelaufen ist und ist somit einer der ersten Laser überhaupt. Sein Aufbau und seine Funktionsweise wird im Folgenden beschrieben und näher untersucht.

2 Theorie

2.1 Grundlagen

Ein Laser besteht grundlegend aus drei Komponenten. Einem aktiven Medium, einer Pumpquelle und einem Resonator. Im Generellen wird versucht, das Lasermedium zu manipulieren, sodass das einfallende Licht verstärkt wird. Dies passiert durch Wechselwirkung des Strahlenfeldes mit dem Lasermaterial. Es gibt drei Möglichkeiten, wie Photonen in Wechselwirkungsprozessen auftreten können. Grafisch dargestellt ist dies in Abbildung 1.

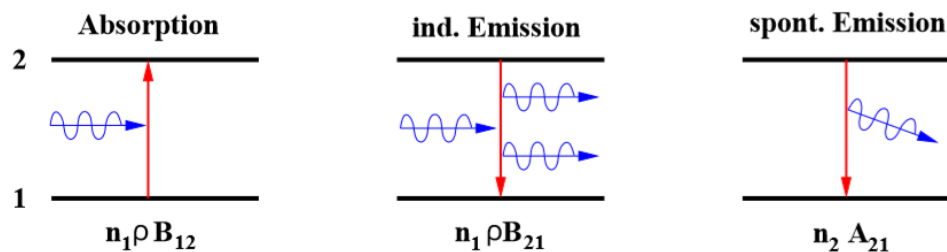


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Absorption und Emission eines Photons.[1]

Das einfallende Photon kann absorbiert werden, wenn die Energie dessen gleich der Energie des Übergangs zwischen den Energieniveaus ist. Für eine Emission gibt es zwei Varianten. Es ist zum einen möglich, dass eine Emission induziert wird, wenn ein externes Photon eintrifft. Hierbei geht ein Atom aufgrund dessen vom angeregten Zustand in den Grundzustand unter Aussendung eines Photons über. Das eintreffende und das ausgehende Photon stimmt hierbei in Energie, Phase und Ausbreitungsrichtung überein. Dieser Vorgang der Photonemission kann aber auch spontan passieren. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Photonen, die pro Volumeneinheit pro Sekunde induziert emittiert werden, wird durch den Zusammenhang

$$\dot{N} = n_2 \rho(\nu) B_{21} \quad (1)$$

beschrieben. Hierbei sind n der besetzte Zustand, ρ die Energiedichte des Strahlungsfeldes und B_{21} der Einsteinkoeffizient als Maß für die Übergangswahrscheinlichkeit von einem Zustand zum anderen. Durch die Betrachtung im thermischen Gleichgewicht folgt nach der Boltzmann-Statistik, dass die Besetzung des Grundzustandes dominiert. Um die für die Funktionsweise des Lasers geforderte Kohärenz und somit eine Verstärkung

des einfallenden Lichts zu erhalten, ist es nötig, dass die induzierte gegenüber der spontanen Emission überwiegt. Nötig ist hierfür eine Besetzungsinversion. Dadurch wird eine höhere Besetzung des angeregten als des Grundzustandes verstanden. Um dies für das Experiment zu erreichen wird dem Lasermedium konstant Energie von Außen hinzugefügt. Dies wird als Pumpen bezeichnet. Als Resonator wird die Laufstrecke des Laserstrahls ausgehend vom Lasermedium zwischen den beiden reflektierenden Spiegeln an den Resonatorenenden verstanden, wie Abbildung 2 zeigt. Damit der Laserstrahl einen möglichst langen Laufweg hat, sind eben diese Spiegel installiert, da die Verstärkung exponentiell mit der Laufweglänge im aktiven Medium wächst.

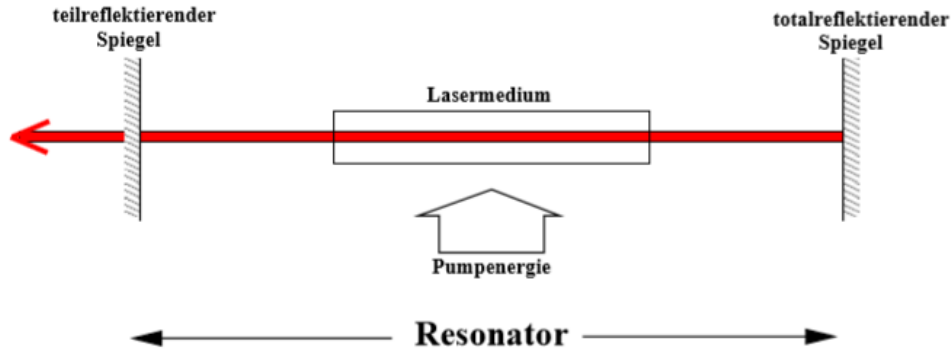


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Lasers mit seinen drei Grundkomponenten.[1]

Einer der Spiegel ist teildurchlässig, damit der Laserstrahl zu einer Seite hin ausgekoppelt werden kann. Die Spiegel des optischen Resonators können aus zwei planparallelen, zwei sphärischen oder aus einer Kombination bestehen. Damit es zu Oszillatorverhalten kommt, müssen die Verluste durch die Spiegel möglichst gering gehalten werden. Sobald die Resonatorverluste kleiner als die Verstärkung durch die induzierte Emission ist, ist ein selbsterregender Resonator gegeben. Somit gilt für einen stabilen Resonator

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

Die Resonatorparameter sind im Allgemeinen gegeben durch $g_i = 1 - L/r_i$ gegeben; die Krümmungsradien r_i der Spiegel und die Resonatorlänge L sind hierbei veränderlich. Die Resonatorlänge ist sehr viel größer als die Wellenlänge des Lasers. Aufgrund dessen erfüllen viele Frequenzen die Resonatorbedingung einer stehenden Welle. Die Anzahl der Wellenlängen im Resonator wird als longitudinale Mode bezeichnet; aufgrund von zum Beispiel Spiegelunebenheiten kann es auch zu transversalen Moden kommen. Die Eigenschwingungen oder Moden eines Resonator werden als TEM_{lqp} bezeichnet. Die Indizes l und p beschreiben die Knoten in x- und y-Richtung. Sie sind somit die transversalen Moden. q ist folglich die longitudinale Mode. Im Allgemeine gilt: höhere Moden haben größere Verluste als niedrigere Moden mit höherer Symmetrie. Die TEM_{00} Grundmode ist die Mode mit der höchsten Symmetrie und mit den wenigsten Verlusten. Sie hat keine

Nullstellen in transversaler Richtung. Die Intensitätsverteilung wird für eine solche durch eine Gaußverteilung der Form

$$I(r) = I_0 e^{\frac{-2r^2}{\omega^2}} \quad (3)$$

beschrieben. I_0 ist die Maximalintensität, r der Abstand zur optischen Achse und ω der Strahlradius. Dieser lässt sich durch

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\theta z}{\omega_0}\right)^2} \quad (4)$$

mit dem Abstand z von der minimalen Strahltaillie ω_0 berechnen. $\theta = \frac{\lambda}{\pi} \omega_0$ ist hierbei die Divergenz des Gaußschen Strahls.

2.2 Der HeNe-Laser

Der Helium-Neon-Laser ist, wie der Name schon sagt, ein Laser mit einem Gasgemisch aus Helium- und Neon-Atomen. Das Verhältnis beträgt 5:1. Das Gas befindet sich in einem Laserrohr, an dessen Enden jeweils ein Brewsterfenster ist. Es dient dazu, Reflexionsverluste zu minimieren. Am Laserrohr wird eine Spannung angelegt, sodass über elektrische Entladungen eine Besetzungsinversion geschieht. Durch diese Entladungen wird das Helium in metastabile Zustände angeregt und durch Stöße zweiter Art wird die Anregungsenergie weitergegeben, dass Besetzungsinversion auftritt. Die rote Linie mit $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ist die dominante.

3 Versuchsaufbau und -durchführung

Alle an der Justage und an der anschließenden Messung beteiligten Komponenten sind auf einer optischen Schiene beweglich angeordnet. Für die Justage ist ein Justagelaser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$, einer maximalen Leistung $P_{\text{max}} = 1 \text{ mW}$ und einer reduzierten Laserleistung $P_{\text{red}} = 0,2 \text{ mW}$ montiert. Für den eigentlichen HeNe-Laser befinden sich zwei austauschbare hochreflektierende Spiegel an den Enden des Resonators. Das gesamte Laserrohr hat eine Länge von $l = 408 \text{ mm}$ und einen Durchmesser von $d_{\text{HeNe}} = 1,1 \text{ mm}$. Für das Vermessen der Eigenschaften des Lasers stehen ebenfalls mehrere Komponenten wie eine Photodiode oder Polarisationsfilter zur Verfügung.

Vor Beginn der eigentlichen Abschnittsmessungen muss der HeNe-Laser justiert werden. Erst dann kann mit der Überprüfung der Stabilitätsmessung begonnen werden. Dafür wird der Laserstrahl mithilfe einer Photodiode auf seine maximale Leistung eingestellt. Im Folgenden wird der Abstand der Laserspiegel immer weiter vergrößert und der Laser nachjustiert. Daraus lässt sich ableiten, ob der theoretisch errechnete Wert auch in der Praxis erreicht werden kann. Anschließend folgt die Messung der TEM-Moden. Für die Stabilisierung der Moden wird ein dünner Wolframdraht in den Strahlengang gespannt. Mit einer fein verstellbaren Photodiode werden möglichst viele vermessen. Ebenso wird eine Polarisationsmessung durchgeführt. Dazu wird ein verstellbarer Polarisationsfilter

hinter den Auskoppelspiegel gesetzt und die Strahlenintensität bei verschiedenen Polarisationswinkeln gemessen.

Als letztes folgt die Messung zur Bestimmung der Wellenlänge, die aus den Beugungsminima und -maxima eines eingesetzten Gitters berechnet werden kann.

4 Auswertung

4.1 Wellenlängenbestimmung

Die zur Bestimmung der Wellenlänge λ aufgenommenen Werte sowie die daraus berechneten Wellenlängen sind in Tabelle 1 dargestellt. Für λ gilt hierbei

$$\lambda = \frac{b}{n} \cdot \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{s_n}{L} \right) \right). \quad (5)$$

Hierbei bezeichnet n die Ordnung des Maximums, $b = \frac{1}{80}$ mm die Gitterbreite, s_n den Abstand des n -ten Maximums zum 0-ten Maximum und L den Abstand zwischen Gitter und Schirm, welcher hier $L = 125$ cm beträgt.

n	s_n [cm]	λ [nm]
1	6,4	639,2
2	6,3	631,7
3	6,5	632,6
4	6,5	629,3
5	6,4	621,8
6	6,5	614,7

Tabelle 1: Messwerte sowie berechnete Werte der Wellenlängenbestimmung.

Als Mittelwert ergibt sich hierbei

$$\lambda = (628,2 \pm 8,7) \text{ nm}. \quad (6)$$

4.2 Modenuntersuchung

4.2.1 Grundmode

Zur Untersuchung der Grundmode werden die Messwerte an eine Gaußfunktion der Form

$$I_{(0,0)}(L) = I_0 \exp \left(-2 \left(\frac{L - d_0}{\omega} \right)^2 \right) \quad (7)$$

gefittet. Hierbei bezeichnet I_0 die Maximalintensität, d_0 die Verschiebung der Photodiode senkrecht zur Strahlebene und ω den Strahlradius.

Mit den Messwerten aus Tabelle aus der folgenden Tabelle ergibt sich:

$$I = (1,04 \pm 0,04) \text{ A}$$

$$d = (6,8 \pm 0,2) \text{ mm}$$

$$\omega = (6,6 \pm 0,3) \text{ A}$$

Die Messwerte sowie der dazugehörige Fit sind in Abbildung 3 dargestellt.

L [mm]	I [A]
0	0,1444
1	0,18
2	0,37
3	0,59
4	0,765
5	0,9
6	0,85
7	1,127
8	0,97
9	0,906
10	0,667
11	0,415
12	0,269
13	0,17
14	0,083
15	0,05

Tabelle 2: Die aufgenommenen Messwerte zur Untersuchung der Grundmode.

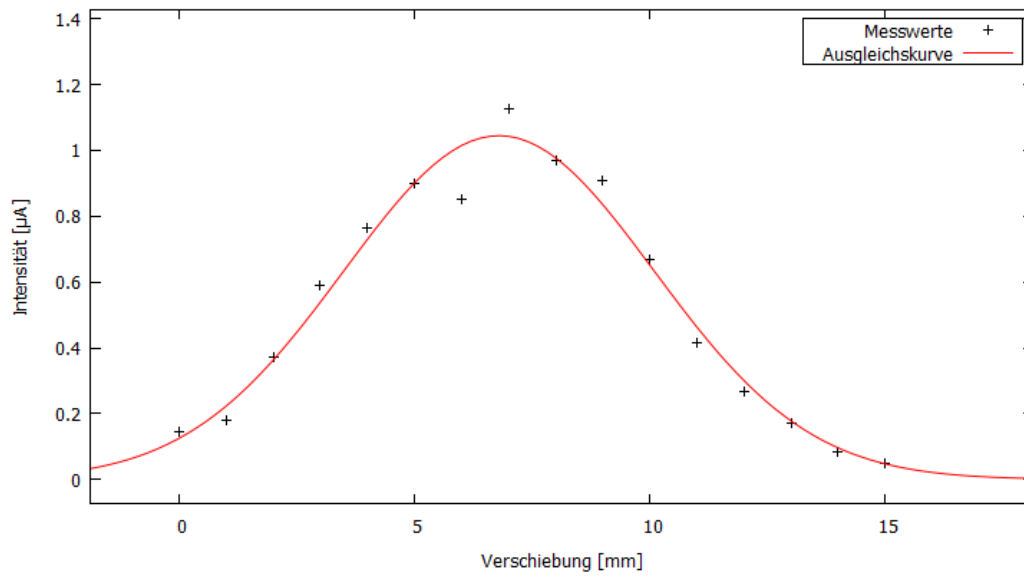


Abbildung 3: Messwerte sowie Fit zur Grundmode.

4.2.2 TEM₀₁-Mode

Zur Untersuchung der TEM₀₁-Mode werden die aufgenommenen Messwerte aus Tabelle 3 mit einer Funktion der Form

$$I(r) = I_{01} \cdot \frac{8(x - d_{01})^2}{\omega_1^2} \cdot e^{\frac{-2(x-d_{01})^2}{\omega_1^2}}, \quad (8)$$

wobei die Bedeutungen von I_{01} , d_{01} und ω_1 analog zu denen bei der Grundmode sind, gefittet. Es ergibt sich hierbei

$$I_{0,1} = (0,24 \pm 0,02) \text{ A} \quad (9)$$

$$d_{0,1} = (8,6 \pm 0,3) \text{ mm} \quad (10)$$

$$\omega_1 = (5,8 \pm 0,3) \text{ A.} \quad (11)$$

Die Ausgleichskurve ist zusammen mit den Messwerten in Abbildung 4 dargestellt.

L [mm]	I [A]
0	0,088
1	0,135
2	0,112
3	0,17
4	0,4
5	0,3
6	0,202
7	0,07
8	0,0093
9	0,0178
10	0,091
11	0,218
12	0,38
13	0,41
14	0,29
15	0,25

Tabelle 3: Messwerte zur Untersuchung der ersten angeregten Mode.

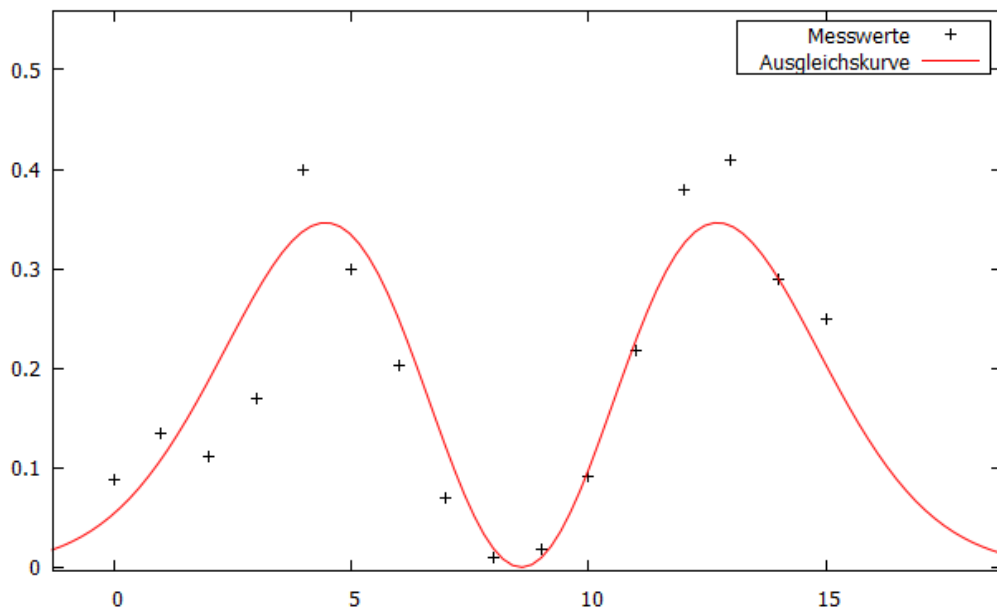


Abbildung 4: Messwerte und Fit der TEM_{01} -Mode.

4.3 Polarisationsmessung

Zur Untersuchung der Polarisation des Lasers werden die aufgenommenen Messwerte an eine Funktion der Form

$$I(\varphi) = I_0 \cos^2(\varphi - \varphi_0) \quad (12)$$

gefittet. Die in Abbildung 5 dargestellte Ausgleichsrechnung ergibt

$$I_0 = (2,68 \pm 0,05) \text{ A}$$

$$\varphi_0 = 72.5^\circ \pm 0,96^\circ.$$

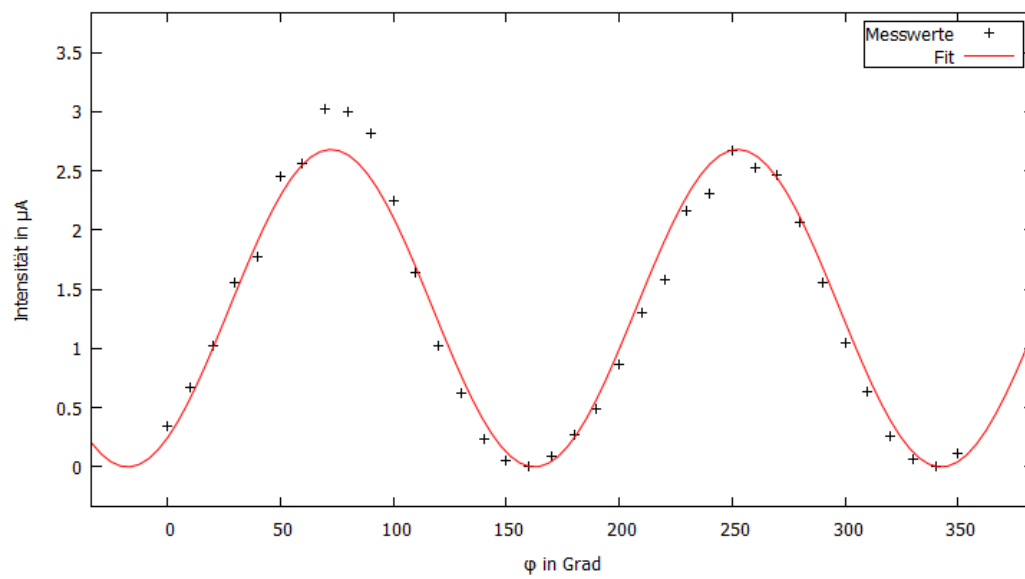


Abbildung 5: Messwerte und Fit für die Polarisationsuntersuchung.

Die aufgenommenen Messwerte befinden sich in Tabelle 4.

Winkel [°]	Intensität [A]
0	0,35
10	0,67
20	1,024
30	1,555
40	1,78
50	2,45
60	2,56
70	3,02
80	2,999
90	2,815
100	2,25
110	1,637
120	1,021
130	0,619
140	0,231
150	0,058
160	0,005
170	0,096
180	0,27
190	0,492
200	0,864
210	1,306
220	1,582
230	2,156
240	2,31
250	2,667
260	2,527
270	2,46
280	2,069
290	1,557
300	1,052
310	0,636
320	0,26
330	0,063
340	0,007
350	0,11

Tabelle 4: Messwerte zur Untersuchung der Polarisierung.

4.4 Stabilitätsmessung

Bei der ersten untersuchten Spiegelkonfiguration handelt es sich um zwei konkave Spiegel. Die aufgenommenen Messwerte werden an eine Funktion der Form

$$I(s) = a \cdot s^2 + bs + c \quad (13)$$

gefittet. Dies ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Ausgleichsrechnung ergibt

$$a = (0,0017 \pm 0,0007) \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

$$b = (-0,4 \pm 0,2) \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$c = (22,1 \pm 7,1) \text{ A}.$$

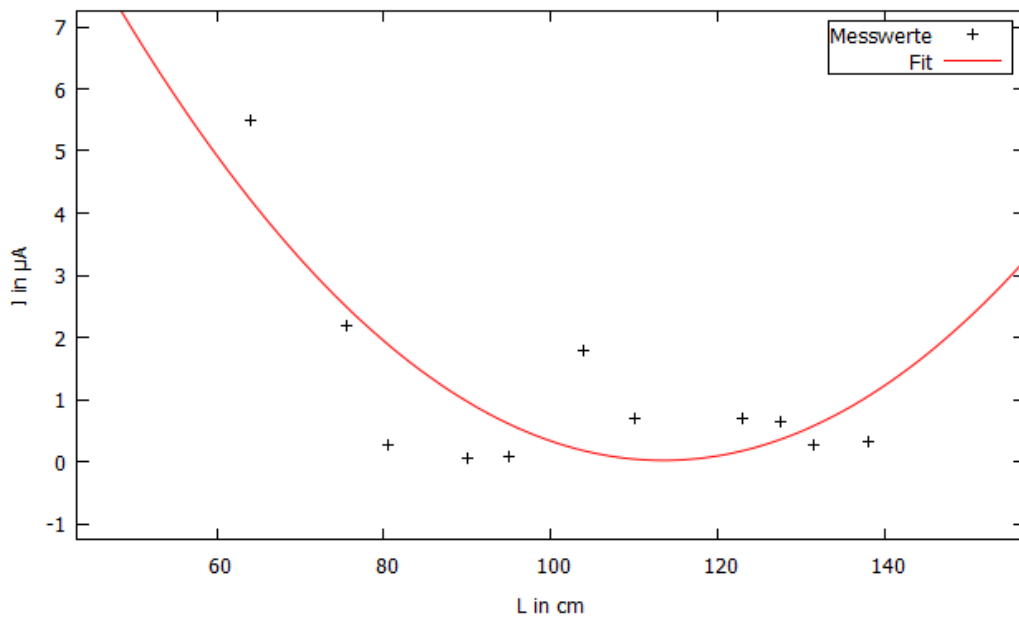


Abbildung 6: Messwerte und Fit für die Stabilitätsmessung mit zwei konkaven Spiegeln.

Die zweite Spiegelkonfiguration besteht aus einem konkaven und einem planaren Spiegel. Hierbei wird als Fitfunktion eine lineare Funktion der Form

$$I(s) = m \cdot s + b \quad (14)$$

verwandt. Es ergibt sich

$$m = (-0,004 \pm 0,02) \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$b = (0,91 \pm 1,4) \text{ A}.$$

Die Messwerte mit Ausgleichsgerade sind in Abbildung 7 dargestellt.

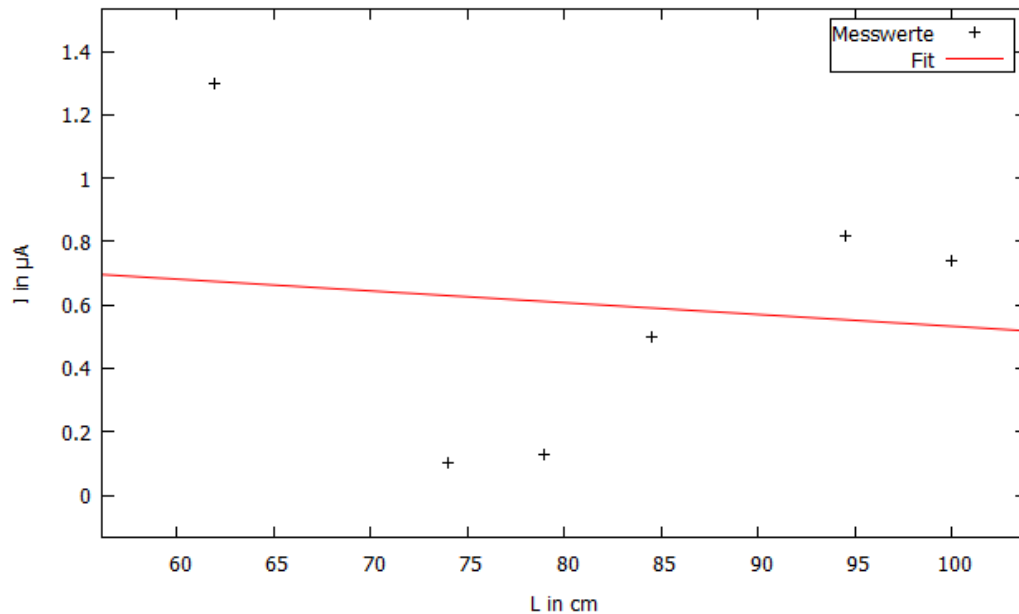


Abbildung 7: Messwerte und Fit für die Stabilitätsmessung mit einem konkaven und einem konvexen Spiegel.

5 Diskussion

Die ermittelten Werte weisen zum Teil eine gute Übereinstimmung mit der Theorie auf. So weicht die berechnete Wellenlänge nur um 4,6 nm vom Literaturwert $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ [1] ab, was innerhalb der Messungenauigkeit liegt. Die Polarisationsuntersuchung zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und der Ausgleichsfunktion. Auch die TEM-Moden entsprechen den theoretischen Erwartungen, mit zwei deutlich erkennbaren Maxima für die TEM_{01} -Mode.

Die Stabilitätsmessung zeigte, dass bei einer Kombination aus zwei konkaven Spiegeln eine größere Resonatorlänge möglich ist als bei einer Kombination aus planaren und konkaven Spiegeln. Dies deckt sich mit dem aus der Theorie Erwartbarem. Bei der Spiegelkonfiguration mit einem planaren Spiegel fällt jedoch auf, dass die maximale Resonatorlänge unter dem theoretischen Maximum von 140 cm liegt. Eine wahrscheinliche Erklärung hierfür liegt am Versuchsaufbau, da es beim Verschieben der Spiegel nur schwer möglich ist den Strahl aufrechtzuerhalten.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 606*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V606.pdf> (besucht am 20.06.2018).