

# **V61 - He-Ne-Laser**

Jan Herdieckerhoff

jan.herdieckerhoff@tu-dortmund.de

Karina Overhoff

karina.overhoff@tu-dortmund.de

Durchführung: 08.06.2020, Abgabe: 22.06.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Theorie</b>	<b>3</b>
1.1 Aufbau und Prinzip eines Lasers . . . . .	3
1.2 Optischer Resonator und Stabilität . . . . .	4
1.3 Moden im Resonator . . . . .	5
1.4 Polarisation eines Lasers . . . . .	6
<b>2 Durchführung</b>	<b>6</b>
2.1 Justierung . . . . .	6
2.2 Überprüfung der Stabilitätsbedingung . . . . .	7
2.3 Vermessung von TEM-Moden . . . . .	7
2.4 Messung der Polarisation . . . . .	7
2.5 Bestimmung der Wellenlänge . . . . .	7
<b>3 Auswertung</b>	<b>7</b>
3.1 Überprüfung der Stabilitätsbedingung . . . . .	8
3.2 Vermessung von TEM-Moden . . . . .	10
3.3 Messung der Polarisation . . . . .	14
3.4 Bestimmung der Wellenlänge . . . . .	15
<b>4 Diskussion</b>	<b>16</b>
<b>Literatur</b>	<b>17</b>

# 1 Theorie

## 1.1 Aufbau und Prinzip eines Lasers

Ein Laser (light amplification by stimulated emission of radiation) besteht aus drei Komponenten: einer Energiepumpe, einem verstärkenden Medium und einem Resonator. Durch die Energiepumpe wird dem verstärkenden Medium Energie zugeführt, was zu induzierter Emission durch die aktivierte Atome des Mediums führt. Der Resonator schickt das emittierte Licht durch optische Rückkopplung wieder durch das verstärkende Medium. Ein Laser ist also ein optischer Oszillatator. [1]

Die Wellenlänge eines Lasers wird durch den Übergang zwischen zwei Energieniveaus des aktiven Mediums definiert. Die Atome gehen dabei unter Abgabe eines Photons der Frequenz

$$\nu = \frac{E_k - E_i}{h}$$

vom angeregten Zustand  $E_k$  in den tieferen Zustand  $E_i$  über. [1]

Das aktive Medium beim He-Ne-Laser ist ein Helium-Neon-Gasmisch. Diesem wird in einer elektrischen Entladung Energie zugeführt. Die durch die Ionisation gelösten Elektronen stoßen mit den He-Atomen, die dadurch in einen angeregten Zustand versetzt werden. Die Energie dieser angeregten He-Atome wird durch sogenannte Stöße zweiter Art auf die Ne-Atome übertragen. Die He-Atome wirken also als Energiepumpe für die Ne-Atome. Die nun angeregten Ne-Atome gehen unter Emission eines Photons in ein tiefer liegendes Niveau über. Dieser Übergang definiert, wie zuvor beschrieben, die Wellenlänge des Lasers. [2]

Es gibt Drei-Niveau- und Vier-Niveau-Laser. Bei Vier-Niveau-Lasern ist  $E_3$  das obere Laserniveau, welches langlebig ist. Das kurzlebige Niveau  $E_4$  steht für alle darüberliegenden Niveaus. Das untere Laserniveau  $E_2$  ist ebenfalls kurzlebig. Das Grundniveau wird durch  $E_1$  beschrieben. Beim Drei-Niveau-Laser ist das Grundniveau  $E_1$  auch das untere Laserniveau. [3]

Beim He-Ne-Laser handelt es sich um einen Vier-Niveau-Laser. Der Übergang von  $3s_2$  nach  $2p_4$  ist für die rote Linie verantwortlich. [2]

Die Wellenlänge eines Lasers lässt sich mithilfe eines Gitters mit der Formel

$$\lambda = \frac{b \cdot a}{\sqrt{d^2 + a^2}} \quad (1)$$

bestimmen, wobei  $b$  der Spaltbreite des Gitters entspricht,  $a$  dem Abstand der Maxima und  $d$  der Entfernung zwischen Gitter und Schirm.

## 1.2 Optischer Resonator und Stabilität

Bei einem optischen Resonator verteilt sich das Strahlungsfeld nicht auf alle Moden, sondern bleibt auf wenige konzentriert. Für diese Moden hat der Resonator kleine Verlustfaktoren, für den Rest große. Die Wahrscheinlichkeit der induzierten Emission wird in den verlustarmen Moden größer, wodurch die Pumpenergie bevorzugt in Strahlungsenergie dieser Moden umgesetzt wird. [1]

In einem stabilen Resonator reproduziert sich die Feldverteilung nach jedem Umlauf der Welle. Die Stabilitätsbedingung lautet

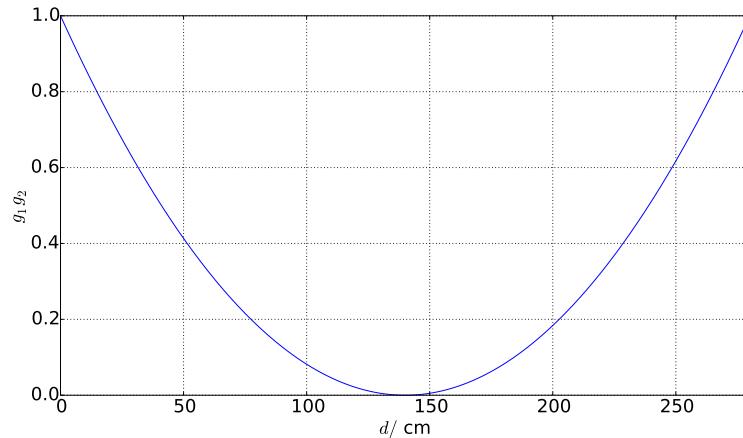
$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1 \text{ oder } g_1 = g_2 = 0, \quad (2)$$

wobei  $g_i$  die Stabilitätsparameter sind. Für diese gilt

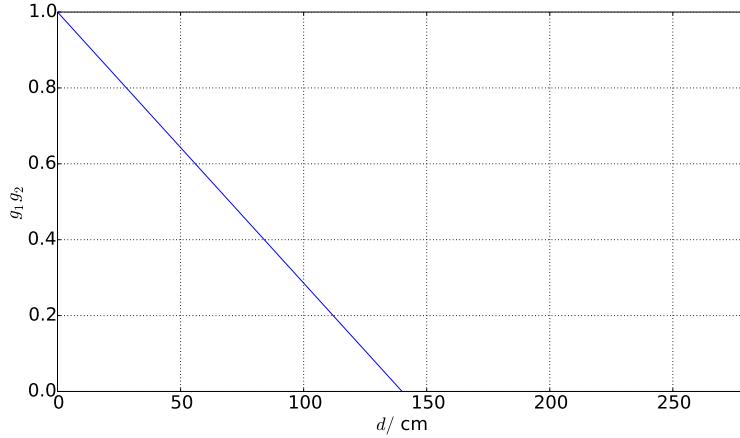
$$g_1 \cdot g_2 = \left(1 - \frac{d}{b_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{d}{b_2}\right), \quad (3)$$

wobei  $d$  die Länge des Resonators, also der Abstand der Spiegel, und  $b_i$  jeweils der Krümmungsradius des Spiegels ist. [1]

Die Stabilitätsparameter für zwei verschiedene Resonatoren sind in den Abbildungen 1 und 2 mithilfe von Formel 3 dargestellt.



**Abbildung 1:** Die Stabilitätsparameter für zwei konkave Spiegel mit jeweils einem Krümmungsradius von  $b_i = 140$  cm sind in Abhängigkeit von der Resonatorlänge dargestellt. Der maximale Resonatorabstand beträgt  $d = 280$  cm.



**Abbildung 2:** Die Stabilitätsparameter für einen flachen und einen konkaven Spiegel mit einem Krümmungsradius von  $b_2 = 140$  cm sind in Abhängigkeit von der Resonatorlänge dargestellt. Der maximale Resonatorabstand beträgt  $d = 140$  cm.

### 1.3 Moden im Resonator

Zur Selektion einzelner  $\text{TEM}_{mn}$ -Moden eines Multimodenlasers können optische Elemente in den Resonator eingesetzt werden, welche die Oszillation der unerwünschten Moden (höhere Moden) unterdrücken.

Die Amplitudenverteilung der TEM-Moden kann mit der Formel

$$A_{m,n}(x, y, z) = C_{mn} H_m(x^*) \cdot H_n(y^*) \cdot \exp(-(x^{*2} + y^{*2})/4) \exp(-i\phi(x, y, z)) \quad (4)$$

beschrieben werden, wobei  $C_{mn}$  ein Normierungsfaktor ist,  $H_m$  und  $H_n$  die Hermiteschen Polynome darstellen und  $x^*$  und  $y^*$  die normierten Koordinaten mit  $x^* = \sqrt{2}x/w$  und  $y^* = \sqrt{2}y/w$  sind mit

$$w(z) = \sqrt{\lambda \cdot \frac{d}{2\pi} \left[ 1 + \left( \frac{2z}{d} \right)^2 \right]},$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge und  $d$  die Resonatorlänge ist. Für die Intensitätsverteilung gilt  $I(x, y) \propto |A_{mn}|^2$ . [1]

Daraus ergibt sich mit Formel (4) für die  $\text{TEM}_{00}$ -Mode der Ausdruck

$$I(x, y) = I_0 \cdot \frac{2}{w^2} \cdot \exp\left(-\left(\frac{(x - \mu)}{w}\right)^2\right). \quad (5)$$

Für die  $\text{TEM}_{10}$ -Mode und die  $\text{TEM}_{20}$ -Mode gilt dies analog.

## 1.4 Polarisation eines Lasers

Durch Einfügen eines Brewster-Fensters in den Resonator kann eine Polarisationsrichtung selektiert werden. Die Fensterflächen stehen zur optischen Achse im Brewster-Winkel. Licht, das unter dem Brewster-Winkel auftrifft und parallel zur Einfallsebene polarisiert ist, wird an der Oberfläche nicht reflektiert, sondern tritt ohne Verlust durch das Brewster-Fenster. Die senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Komponente des Lichts wird allerdings reflektiert und somit im Laser unterdrückt.

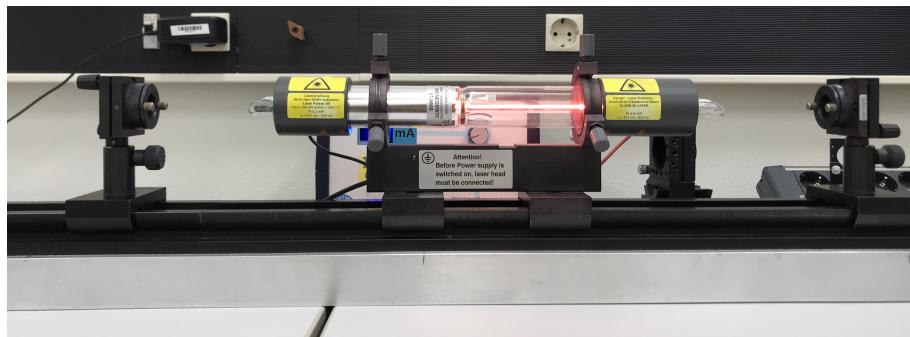
Das Modell, mit dem sich die Polarisation beschreiben lässt, lautet

$$P(\phi) = P_0 \cdot \cos(\phi + \delta)^2. \quad (6)$$

## 2 Durchführung

### 2.1 Justierung

Als erstes muss der Aufbau richtig ausgerichtet werden. Dazu wird ein Justierlaser verwendet, der auf der optischen Schiene steht. Zunächst wird das ebenfalls auf der Schiene stehende Plasmarohr ausgerichtet, indem die Justierschrauben so verstellt werden, dass das Licht des Justierlasers das Fadenkreuz am Ende der optischen Schiene trifft. Anschließend wird ein Resonatorspiegel aufgestellt. Mit den Justierschrauben wird dieser ebenfalls so ausgerichtet, dass der Laser das Fadenkreuz auf der anderen Seite trifft. Mit dem zweiten Resonatorspiegel wird genauso verfahren. Der Justierlaser wird anschließend ausgeschaltet. Der Aufbau ist in Abb. 3 zu sehen.



**Abbildung 3:** Der Versuchsaufbau: Laserrohr und Resonatorspiegel auf der optischen Schiene.

## **2.2 Überprüfung der Stabilitätsbedingung**

Der Strom der Hochspannung wird auf  $I = 6,5 \text{ mA}$  eingestellt, wodurch das Laserrohr rot leuchtet. Damit die Lasertätigkeit einsetzt, müssen die Resonatorspiegel nachjustiert werden.

Sobald der Laser läuft, wird er mithilfe einer Photodiode auf maximale Leistung eingestellt. Der Resonatorabstand wird vergrößert und dabei die Leistung aufgenommen. Dabei müssen jedes mal die Spiegel nachjustiert werden, sodass die Leistung maximal ist. Der maximale Abstand der Resonatoren soll eingestellt werden. Diese Messung wird für einen weiteren Resonator erneut durchgeführt.

## **2.3 Vermessung von TEM-Moden**

Es werden verschiedene Moden vermessen. Zunächst wird die  $\text{TEM}_{00}$ -Mode vermessen. Dazu wird der Strahldurchmesser mit einer Streulinse vergrößert. Mit einer Photodiode wird die Intensitätsverteilung senkrecht zur Strahlachse gemessen.

Anschließend wird ein Draht aus Wolfram zwischen Resonatorspiegel und Laserrohr gestellt, der dafür sorgt, dass die  $\text{TEM}_{10}$ -Mode und  $\text{TEM}_{20}$ -Mode sichtbar werden. Die Intensitätsverteilungen dieser Moden werden ebenfalls vermessen.

## **2.4 Messung der Polarisation**

Die Polarisation des Lasers wird mit einem Polarisator und einer Photodiode, die die Intensität für verschiedene Polarisationen bestimmt, gemessen. Der Polarisator wird dafür hinter den Auskoppelspiegel gestellt und es werden verschiedene Winkel eingestellt.

## **2.5 Bestimmung der Wellenlänge**

Zuletzt wird die Wellenlänge des He-Ne-Lasers bestimmt, indem drei verschiedene Gitter in den Aufbau gesetzt werden und der Abstand der Beugungsmaxima des entstehenden Beugungsbildes vermessen wird.

# **3 Auswertung**

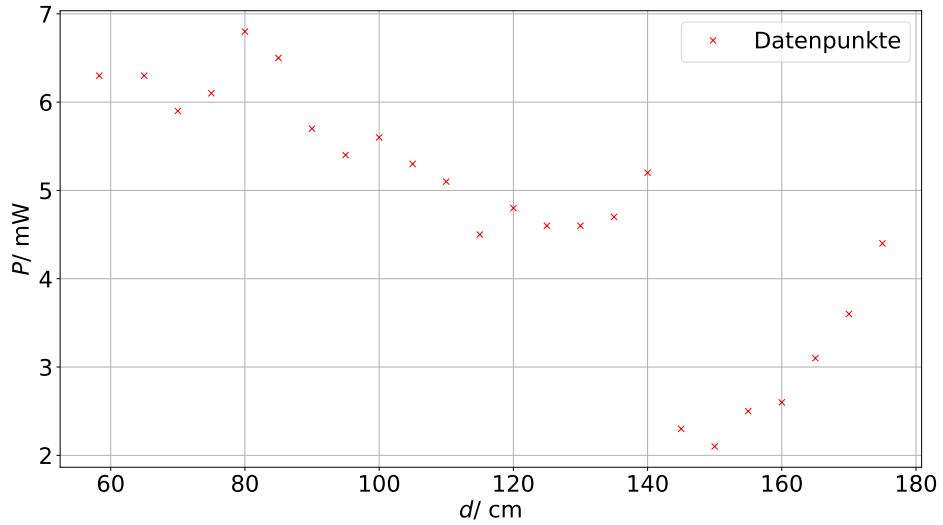
Die Auswertung ist mithilfe von Matplotlib [4], SciPy [5], Uncertainties [6] und NumPy [7] erstellt worden.

### 3.1 Überprüfung der Stabilitätsbedingung

Im ersten Teil des Versuchs wird die Stabilität überprüft. Nach Voraussage gilt, dass für die zwei konkaven Spiegel mit einem Radius von 140 cm eine Instabilität bei einem Abstand derselben Länge zu bemerken sein sollte. In Tab. 1 sind die zu Abb. 4 gehörenden Werte eingetragen. Tatsächlich ist ein entsprechender Einbruch der Leistung um den Wert zu erkennen.

**Tabelle 1:** Die Werte zur Überprüfung der Stabilitätsbedingung zweier konkaver Spiegel mit dem Radius 140 cm sind aufgelistet. Dabei sind die Abstände der Spiegel  $d$  gegen die Leistung  $P$  aufgetragen.

$d/\text{cm}$	$P/\text{mW}$	$d/\text{cm}$	$P/\text{mW}$	$d/\text{cm}$	$P/\text{mW}$
58,3	6,3	115,0	4,5	170,0	3,6
65,0	6,3	120,0	4,8	175,0	4,4
70,0	5,9	125,0	4,6		
75,0	6,1	130,0	4,6		
80,0	6,8	135,0	4,7		
85,0	6,5	140,0	5,2		
90,0	5,7	145,0	2,3		
95,0	5,4	150,0	2,1		
100,0	5,6	155,0	2,5		
105,0	5,3	160,0	2,6		
110,0	5,1	165,0	3,1		

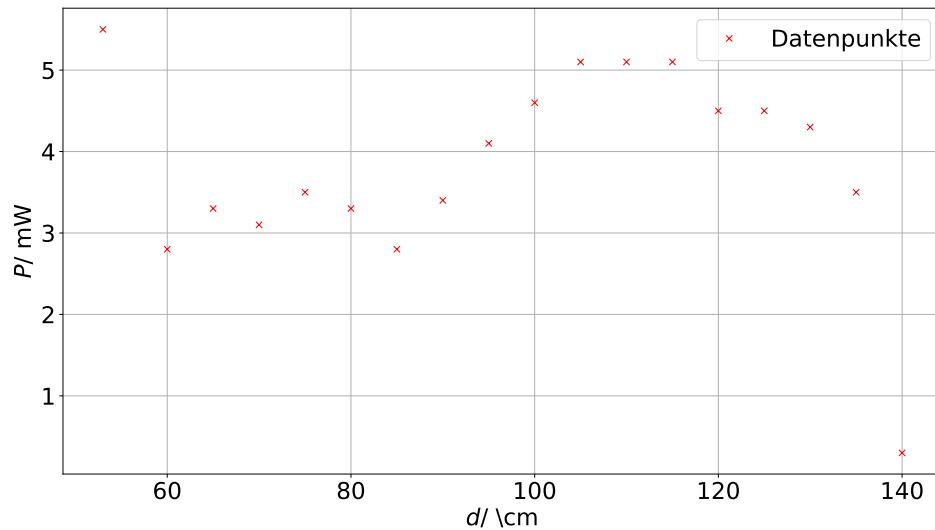


**Abbildung 4:** Die Resonatorlänge ist gegen die Leistung aufgetragen. Dabei besteht der Resonator aus zwei konkaven Spiegeln mit jeweils  $b_i = 140 \text{ cm}$ .

Die Stabilität wird auch für einen konkaven Spiegel mit Radius 140 cm in Kombination mit einem flachen Spiegel betrachtet. Die Werte sind in Tab. 2 eingetragen. Dargestellt sind diese in Abb. 5. Hier ist bei der Grenze von 140 cm keine Leistung mehr zu messen.

**Tabelle 2:** Die Werte zur Überprüfung der Stabilitätsbedingung eines konkaven Spiegels mit dem Radius 140 cm und eines flachen Spiegels sind aufgelistet. Dabei sind die Abstände der Spiegel  $d$  gegen die Leistung  $P$  aufgetragen.

$d/\text{cm}$	$P/\text{mW}$	$d/\text{cm}$	$P/\text{mW}$
53,0	5,5	110,0	5,1
60,0	2,8	115,0	5,1
65,0	3,3	120,0	4,5
70,0	3,1	125,0	4,5
75,0	3,5	130,0	4,3
80,0	3,3	135,0	3,5
85,0	2,8	140,0	0,3
90,0	3,4		
95,0	4,1		
100,0	4,6		
105,0	5,1		



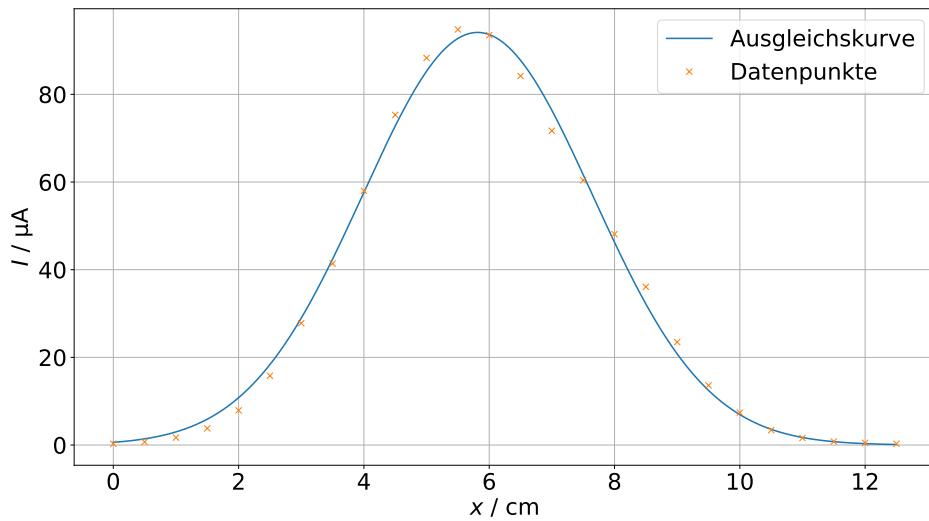
**Abbildung 5:** Die Resonatorlänge ist gegen die Leistung aufgetragen. Dabei besteht der Resonator aus einem flachen und einem konkaven Spiegel mit  $b_2 = 140 \text{ cm}$ .

### 3.2 Vermessung von TEM-Moden

Die gemessenen Werte der TEM<sub>00</sub>-Mode sind in Tab. 3 eingetragen und in Abb. 6 abgebildet. Die Funktionsparameter lassen sich entsprechend dem in Sektion 1.3 beschriebenen Modell mit Formel (5) beschreiben.

**Tabelle 3:** Die TEM<sub>00</sub>-Mode. Der Abstand senkrecht zur Laserachse ist gegen die Stromstärke aufgelistet.

$x / \text{mm}$	$I / \mu\text{A}$	$x / \text{mm}$	$I / \mu\text{A}$	$x / \text{mm}$	$I / \mu\text{A}$
0,0	0,3	5,5	94,8	11,0	1,6
0,5	0,7	6,0	93,5	11,5	0,8
1,0	1,7	6,5	84,2	12,0	0,5
1,5	3,8	7,0	71,7	12,5	0,3
2,0	7,9	7,5	60,4		
2,5	15,8	8,0	48,1		
3,0	27,8	8,5	36,1		
3,5	41,4	9,0	23,5		
4,0	58,0	9,5	13,6		
4,5	75,3	10,0	7,4		
5,0	88,3	10,5	3,4		



**Abbildung 6:** Der Abstand senkrecht zur Laserachse ist gegen die gemessene Stromstärke aufgetragen. Zu sehen ist die TEM<sub>00</sub>-Mode.

Die Fitparameter ergeben sich zu

$$\mu = (5,814 \pm 0,023) \text{ cm}$$

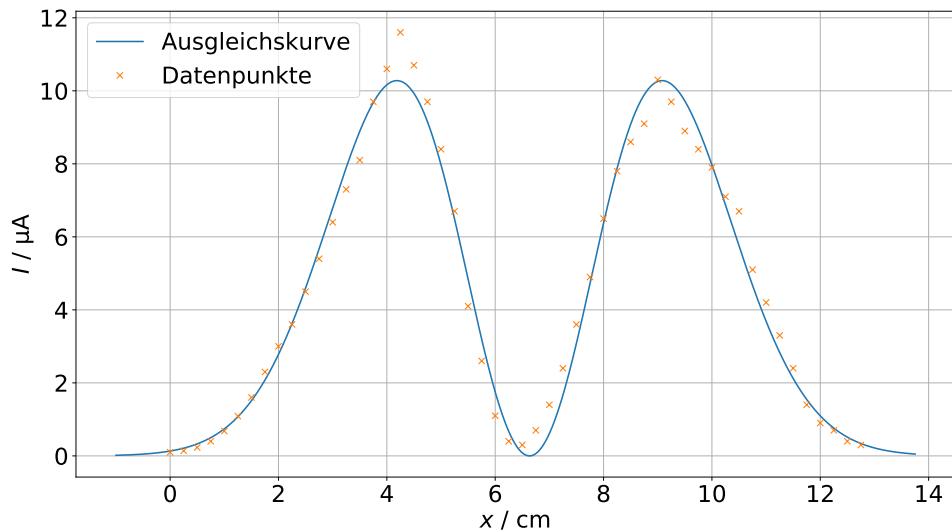
$$w = (2,592 \pm 0,033) \text{ cm}$$

$$I_0 = (316 \pm 7) \mu\text{A}.$$

Die gemessenen Werte der TEM<sub>10</sub>-Mode sind in Tab. 4 eingetragen und in Abb. 7 abgebildet. Die Funktionsparameter lassen sich nach Formel (4) modellieren.

**Tabelle 4:** Die TEM<sub>10</sub>-Mode. Der Abstand senkrecht zur Laserachse ist gegen die Stromstärke aufgelistet.

$x/\text{mm}$	$I/\mu\text{A}$								
0,0	0,1	2,8	5,4	5,5	4,1	8,3	7,8	11,0	4,2
0,3	0,1	3,0	6,4	5,8	2,6	8,5	8,6	11,3	3,3
0,5	0,2	3,3	7,3	6,0	1,1	8,8	9,1	11,5	2,4
0,8	0,4	3,5	8,1	6,3	0,4	9,0	10,3	11,8	1,4
1,0	0,7	3,8	9,7	6,5	0,3	9,3	9,7	12,0	0,9
1,3	1,1	4,0	10,6	6,8	0,7	9,5	8,9	12,3	0,7
1,5	1,6	4,3	11,6	7,0	1,4	9,8	8,4	12,5	0,4
1,8	2,3	4,5	10,7	7,3	2,4	10,0	7,9	12,8	0,3
2,0	3,0	4,8	9,7	7,5	3,6	10,3	7,1		
2,3	3,6	5,0	8,4	7,8	4,9	10,5	6,7		
2,5	4,5	5,3	6,7	8,0	6,5	10,8	5,1		



**Abbildung 7:** Der Abstand senkrecht zur Laserachse ist gegen die gemessene Stromstärke aufgetragen. Zu sehen ist die TEM<sub>10</sub>—Mode.

Die Fitparameter ergeben sich zu

$$\mu = (6,634 \pm 0,018) \text{ cm}$$

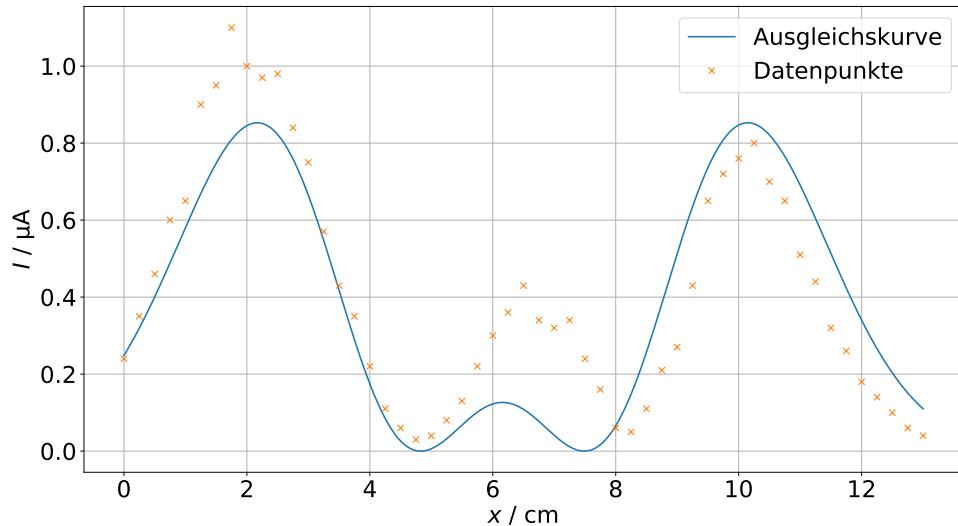
$$w = (2,447 \pm 0,018) \text{ cm}$$

$$I_0 = (10,46 \pm 0,17) \mu\text{A}.$$

Die gemessenen Werte der TEM<sub>20</sub>-Mode sind in Tab. 5 eingetragen und in Abb. 8 abgebildet. Die Funktionsparameter lassen sich nach Formel (4) modellieren.

**Tabelle 5:** Die TEM<sub>20</sub>-Mode. Der Abstand senkrecht zur Laserachse ist gegen die Stromstärke aufgelistet.

$x/\text{mm}$	$I/\mu\text{A}$								
0,00	0,24	2,75	0,84	5,50	0,13	8,25	0,05	11,00	0,51
0,25	0,35	3,00	0,75	5,75	0,22	8,50	0,11	11,25	0,44
0,50	0,46	3,25	0,57	6,00	0,30	8,75	0,21	11,50	0,32
0,75	0,60	3,50	0,43	6,25	0,36	9,00	0,27	11,75	0,26
1,00	0,65	3,75	0,35	6,50	0,43	9,25	0,43	12,00	0,18
1,25	0,90	4,00	0,22	6,75	0,34	9,50	0,65	12,25	0,14
1,50	0,95	4,25	0,11	7,00	0,32	9,75	0,72	12,50	0,10
1,75	1,10	4,50	0,06	7,25	0,34	10,00	0,76	12,75	0,06
2,00	1,00	4,75	0,03	7,50	0,24	10,25	0,80	13,00	0,04
2,25	0,97	5,00	0,04	7,75	0,16	10,50	0,70		
2,50	0,98	5,25	0,08	8,00	0,06	10,75	0,65		



**Abbildung 8:** Der Abstand senkrecht zur Laserachse ist gegen die gemessene Stromstärke aufgetragen. Zu sehen ist die TEM<sub>20</sub>-Mode.

Die Fitparameter ergeben sich zu

$$\begin{aligned}\mu &= (6,16 \pm 0,07) \text{ cm} \\ w &= (2,66 \pm 0,05) \text{ cm} \\ I_0 &= (0,112 \pm 0,006) \mu\text{A}.\end{aligned}$$

### 3.3 Messung der Polarisation

Die bestimmten Werte der Polarisation ergeben sich aus Tab. 6 und sind in Abb. 9 dargestellt.

**Tabelle 6:** Die Werte zur Beschreibung der Polarisation. Es sind die Winkel und die Leistung gegeneinander aufgelistet.

$\phi/^\circ$	$P/\text{mW}$	$\phi/^\circ$	$P/\text{mW}$
0,0	0,9	180,0	0,9
20,0	0,1	200,0	0,1
40,0	0,3	220,0	0,3
60,0	1,5	240,0	1,3
80,0	2,9	260,0	2,8
100,0	3,9	280,0	4,1
120,0	4,4	300,0	4,4
140,0	3,7	320,0	3,7
160,0	2,3	340,0	2,4

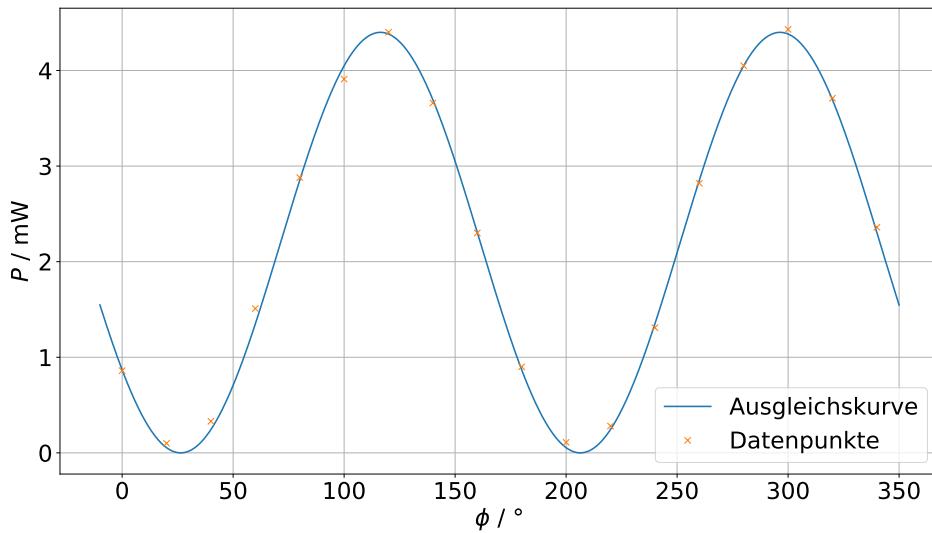


Abbildung 9: Der Polarisationswinkel ist gegen die Leistung aufgetragen.

Die Messung ist mit dem in Formel (6) beschriebenen Modell gefittet. Die Fitparameter ergeben sich zu

$$P_0 = (4,399 \pm 0,026) \text{ mW}$$

$$\delta = (63,63 \pm 0,29)^\circ.$$

### 3.4 Bestimmung der Wellenlänge

Die Wellenlänge des Lasers wird mit verschiedenen Gittern bestimmt. Dazu wird sowohl der Abstand zwischen drei verschiedenen Gittern und Schirm, als auch jeweils der Abstand der Maxima auf dem Schirm bestimmt.

Mit Formel (1) kann somit jeweils die Wellenlänge berechnet werden. Die gemessenen Daten und berechneten Ergebnisse für drei verschiedene Gitter sind in Tab. 7 eingetragen.

Tabelle 7: Die Daten und Ergebnisse der Wellenlgen-Messung.

Gitter	$d/\text{cm}$	$a/\text{cm}$	$\lambda/\text{nm}$
80/mm	22,50	1,20	665,72
100/mm	32,50	2,10	644,81
600/mm	12,50	5,30	650,60

## 4 Diskussion

Im Fall der Stabilitätsbedingung ergab sich bei beiden Messungen wie erwartet ein Tiefpunkt der Leistung bei den zuvor bestimmten Stabilitätsbedingungen. Bei den konkaven Spiegeln fällt die Leistung in der Nähe des theoretisch bestimmten Wertes rapide um fast 60 % ab. Bei der Kombination des konkaven mit dem flachen Spiegel ließ sich ab der maximalen Resonatorlänge gar keine Leistung mehr feststellen.

Die Messung der TEM-Moden funktionierte dank der guten Justierung gut und sogar eine TEM<sub>20</sub>-Mode ließ sich bestimmen. Je höher die Moden werden, desto weniger gut wird der Fit an die aus der Theorie kommenden Modelle.

Wie erwartet wird mit dem Polfilter eine  $\pi$ -periodische Intensität festgestellt. Der Laser ist linear polarisiert. Das genutzte Modell passt hier sehr gut zu den gemessenen Werten. Es ist lediglich eine Verschiebung von 63,36° mit einer relativen Abweichung von 0,46 % festgestellt worden. Diese Verschiebung ist allerdings abhängig von der Polarisationsachse.

Die theoretische Wellenlänge des He-Ne-Lasers liegt bei 633 nm. Die gemessenen Werte weichen je Gitter zwischen 1,87 % und 5,17 % von dem erwarteten Wert ab. Dies ist trotz der recht groben Messung mithilfe eines Maßbandes ein gutes Ergebnis.

## Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Laserspektroskopie 1 (Grundlagen)*. Springer-Verlag, 2011.
- [2] Hans Joachim Eichler und Jürgen Eichler. *Laser (Bauformen, Strahlführung, Anwendungen)*. Springer-Verlag, 2015.
- [3] Prof. Dr. Jürgen Jahns. *Photonik (Grundlagen, Komponenten und Systeme)*. Oldenbourg-Verlag, 2001.
- [4] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [5] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [6] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [7] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.

① Stabilitätsbedingung

<u>L (cm)</u>	<u>P (mW)</u>	$b_1 = b_2 = 140 \text{ cm}$
58,3	6,3	
65	6,3	
70	5,9	
75	6,1	
80	6,8	
85	6,5	
90	5,7	
95	5,4	
100	5,6	
105	5,3	
110	5,1	
115	4,5	
120	4,8	
125	4,6	
130	4,6	
135	4,7	
140	5,2	
145	2,3	
150	2,1	
155	2,5	
160	2,6	
165	3,1	
170	3,6	
175	4,4	

<u>L (cm)</u>	<u>P(mW)</u>	$b_1 = \infty, b_2 = 140 \text{ cm}$ (f(ach))
53	5,5	
60	2,8	
65	3,3	
70	3,1	
75	3,5	
80	3,3	
85	2,8	
90	3,4	
95	4,1	
100	4,6	
105	5,1	
110	5,1	
115	5,1	
120	4,5	
125	4,5	
130	4,3	
135	3,5	
140	0,3	
145		

(3) Polarisation

$$L = 58,6 \text{ cm}$$

$$P_0 = 0,04 \text{ mW}$$

$\varphi$	$P$ (mW)
0	0,86
20	0,10
40	0,33
60	1,51
80	2,88
100	3,91
120	4,40
140	3,66
160	2,30
180	0,90
200	0,11
220	0,28
240	1,31
260	2,82
280	4,05
300	4,43
320	3,71
340	2,36
0	0,93

$$b_1 = b_2 = 140 \text{ cm}$$

(2)

$X$  (mm)       $I$  (mA)       $TEM_{\infty}$  - Mode

-5	0,09
-4	0,5

$X$ (mm)	$I$ (mA)
11	1,6
11,5	0,8
12	0,5
12,5	0,3

neu:

0	0,3
0,5	0,7
1	1,67
1,5	3,8
2	7,9
2,5	15,8
3	27,8
3,5	41,4
4	58,0
4,5	75,3
5	88,3
5,5	94,8
6	93,5
6,5	84,2
7	71,7
7,5	60,4
8	48,1
8,5	36,1
9	23,5
9,5	13,6
10	7,4
10,5	3,4

$$I_0 = 0,005 \mu\text{A}$$

TEM<sub>01</sub> - Mode

mit Draht (

x (mm)	I (mA)
0	0,10
0,25	0,14
0,5	0,23
0,75	0,40
1,0	0,68
1,25	1,09
1,5	1,6
1,75	2,3
2	3,0
2,25	3,6
2,5	4,5
2,75	5,4
3	6,4
3,25	7,3
3,5	8,1
3,75	9,7
4	10,6
4,25	11,6
4,5	10,7
4,75	9,7
5	8,4
5,25	6,7
5,5	4,1
5,75	2,6
6	1,1
6,25	0,4
6,5	0,3
6,75	0,7
7	1,4
7,25	2,4
7,5	3,6
7,75	4,9
8	6,5
8,25	7,8
8,5	8,6
8,75	9,1
9	10,3
9,25	9,7
9,5	8,3
9,75	8,4
10	7,9
10,25	7,1
10,5	6,7
10,75	5,1
11	4,2
11,25	3,3
11,5	2,4
11,75	1,4
12	0,9
12,25	0,7
12,5	0,4
12,75	0,3

$\text{TEM}_{02}$  - Mode

$x$ (mm)	I (mA)
0	0,24
0,25	0,35
0,5	0,46
0,75	0,60
1	0,65
1,25	0,90
1,5	0,95
1,75	1,1
2	1,0
2,25	0,97
2,5	0,98
2,75	0,84
3	0,75
3,25	0,57
3,5	0,43
3,75	0,35
4	0,22
4,25	0,11
4,5	0,06
4,75	0,03
5	0,04
5,25	0,08
5,5	0,13
5,75	0,22
6	0,30
6,25	0,36
6,5	0,43
6,75	0,34
7	0,32
7,25	0,34
7,5	0,24
7,75	0,16
8	0,06
8,25	0,05
8,5	0,11
8,75	0,21
9	0,27
9,25	0,43
9,5	0,65
9,75	0,72
10	0,76
10,25	0,80
10,5	0,70
10,75	0,65
11	0,51
11,25	0,44
11,5	0,32
11,75	0,26
12	0,18
12,25	0,14
12,5	0,10
12,75	0,06
13	0,04

④ Abstand der Maxima

$$b_1 = b_2 = 140 \text{ cm}$$

Gitter 1 (100 lines / mm)

4  
6,1  
8,12  
10,3  
12,4

$$y = \cancel{27} 29,5 \text{ cm} \quad (\text{Schirmabstand})$$

+ 3 cm  
↑

Gitter 2 (600 lines / mm)

4  
9,3  
14,3

$$y = 9,5 \text{ cm} + 3 \text{ cm}$$

Gitter 3 (80 lines / mm)

4  
5,2  
6,2535  
7,45  
8,6

$$y = \cancel{27} 22,5 \text{ cm} \quad (\text{schon inkl. } 3 \text{ cm})$$