

Physikpraktikum für Naturwissenschaftler

Versuch: Beugung

Durchgeführt am 06. Dezember 2018

Betreuer: Devin Assenheimer

Gruppe 13

Felix Burr: felix.burr@uni-ulm.de

Johannes Spindler: johannes.spindler@uni-ulm.de

Wir bestätigen hiermit, das Protokoll selbstständig erarbeitet zu haben und in genauer Kenntnis über dessen Inhalt zu sein.

Felix Burr

Johannes Spindler

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Strukturaufklärung (Bestimmung einer Gitterkonstanten)	3
2.1	Versuchsdurchführung	3
2.2	Fehlerrechnung	4
2.3	Messwerte und Ergebnisse	4
2.4	Ergebnisdiskussion	5
3	Bestimmung der Spurweite einer CD bzw. DVD	5
3.1	Versuchsdurchführung	5
3.2	Messwerte und Ergebnisse	5
3.3	Ergebnisdiskussion	5
4	Spektralanalyse (Untersuchung einer unbekannten Lichtquelle)	6
4.1	Versuchsdurchführung	6
4.2	Messwerte und Ergebnisse	7
4.2.1	Messung von Hand	7
4.2.2	Messung mit dem Faseroptik-Spektrometer	8
4.3	Ergebnisdiskussion	10
5	Beugungserscheinungen am Einzelspalt und an einem Haar	11
5.1	Versuchsdurchführung	11
5.2	Messwerte und Ergebnisse	13
5.3	Ergebnisdiskussion	14
6	Modellversuch zum Auflösungsvermögen des Mikroskops	15
6.1	Versuchsdurchführung	15
6.2	Ergebnisdiskussion	15

1 Einleitung

Unter Beugung wird die Ausbreitung von Wellen in den Schattenbereich hinter Objekten verstanden. Da Beugung für Wellen auftritt, aber nicht für Teilchen, ist die Beugung von Licht ein Indiz für dessen Wellencharakter. Mithilfe des Strahlenmodells des Lichts ist die Beugung nicht erklärbar und die Geometrische Optik mit ihrem Strahlenmodell ist auch nur eine Annäherung an die Realität, da sie nutzt, dass die Beugung des Lichts vernachlässigbar ist, wenn Öffnungen und Hindernisse sehr viel größer sind als die Wellenlänge des Lichts. Das Phänomen der Beugung ist sehr nützlich bei der Untersuchung von Objekten. So kann zum Beispiel die Spaltbreite eines Gitters, die Gitterkonstante, berechnet werden (siehe Abschnitt 2) oder ein chemisches Element durch die Spektralanalyse bestimmt werden (siehe Abschnitt 4).

2 Strukturaufklärung (Bestimmung einer Gitterkonstanten)

2.1 Versuchsdurchführung

Das zu untersuchende Gitter mit Gitterkonstante g wird mit einem HeNe-Laser der Wellenlänge $\lambda = 632,8nm$ beleuchtet. Die Wand dient als Schirm, weshalb der Laser so positioniert sein soll, dass der Strahl senkrecht zur Wand verläuft. Es erscheinen Beugungsmaxima auf der Wand. Abbildung 1 zeigt diese Versuchsanordnung.

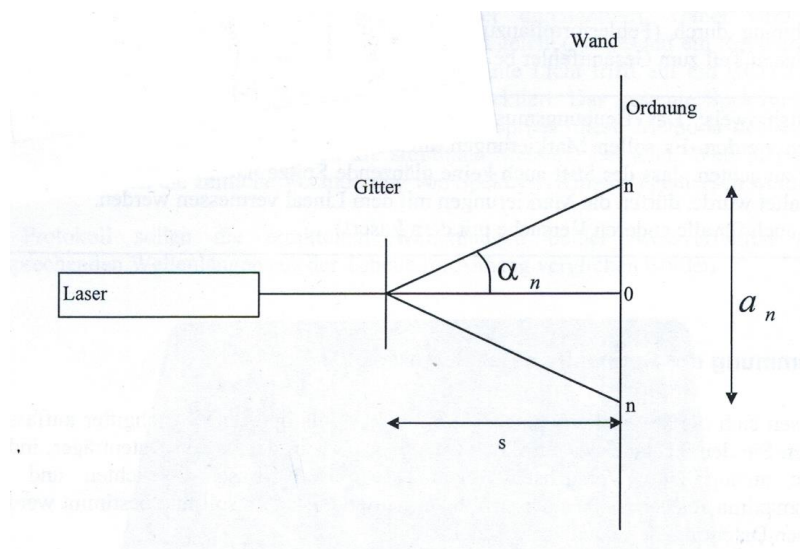


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Gitterkonstante (aus der Versuchsanleitung)

Für jedes Maximapaar der Ordnung n wird bis $n = 3$ jeweils der Abstand a_n zwischen den beiden Maxima gemessen. Mit dem Winkel α_n zwischen dem Laserstrahl und der

Strecke Gitter-Maximum kann dann die Gitterkonstante berechnet werden:

$$g = \frac{n\lambda}{\sin(\alpha_n)} \quad (1)$$

α_n wird mit dem konstanten Abstand s zwischen Gitter und Wand bestimmt durch $\tan(\alpha_n) = \frac{a_n}{2s}$, deshalb ergibt sich für g :

$$g = \frac{n\lambda}{\sin\left(\arctan\left(\frac{a_n}{2s}\right)\right)} \quad (2)$$

In diesem Versuch ist α_n klein, deshalb wird die Kleinwinkelnäherung $\tan(\alpha_n) \cong \sin(\alpha_n)$ verwendet:

$$g \cong \frac{n\lambda}{\tan\left(\arctan\left(\frac{a_n}{2s}\right)\right)} = \frac{2n\lambda s}{a_n} \quad (3)$$

2.2 Fehlerrechnung

Der Größtfehler Δg der Gitterkonstante mit Gleichung 3 beträgt

$$\Delta g = \left| \frac{\partial g}{\partial s} \right| \Delta s + \left| \frac{\partial g}{\partial a_n} \right| \Delta a_n = \left| \frac{2n\lambda}{a_n} \right| \Delta s + \left| 2n\lambda s \cdot \frac{-1}{a_n^2} \right| \Delta a_n = \frac{2n\lambda}{a_n} \cdot \left(\Delta s + \frac{s}{a_n} \Delta a_n \right)$$

Mit den Größtfehlern $\Delta s = 0,005m$ und $\Delta a_n = 0,002m$ ergeben sich die Werte aus Tabelle 1 für Δg .

2.3 Messwerte und Ergebnisse

Bekannte Wellenlänge des Lasers: $\lambda = 632,8nm = 6,328 \cdot 10^{-7}m$

Messung des Abstands Gitter-Wand: $s = 1,975m$

Tabelle 1 zeigt für jede Ordnung n die Abstandsmessung a_n zwischen den Maxima, das Ergebnis für g und den Größtfehler Δg .

Tabelle 1: Maxima-Abstand a_n , damit errechnete Gitterkonstante g und deren Größtfehler Δg nach Ordnungen n der Maxima

n	a_n [m]	g [m]	Δg [m]
1	0,248	$1,008 \cdot 10^{-5}$	$1,068 \cdot 10^{-7}$
2	0,504	$9,919 \cdot 10^{-6}$	$6,477 \cdot 10^{-8}$
3	0,773	$9,701 \cdot 10^{-6}$	$4,966 \cdot 10^{-8}$
Mittelwert		$9,900 \cdot 10^{-6}$	$7,364 \cdot 10^{-8}$

2.4 Ergebnisdiskussion

Der tatsächliche Wert für die Gitterkonstante ist mit $10\mu m = 10^{-5}m$ angegeben. Diesen unterschreitet der Mittelwert um 1% und liegt damit außerhalb des Größtfehlerintervalls. Diese Abweichung ist akzeptabel, da bei der Bestimmung von g die Kleinwinkelnäherung in Gleichung 3 statt der genauen Gleichung 2 genutzt wurde.

3 Bestimmung der Spurweite einer CD bzw. DVD

3.1 Versuchsdurchführung

Ziel des Versuches ist es, die Spurweite eines Datenträgers zu berechnen und damit zu bestimmen, ob es sich um eine CD oder um eine DVD handelt. Dazu wird dasselbe Vorgehen wie bei der Berechnung der Gitterkonstante im vorherigen Abschnitt angewandt, diesmal ist g die Spurweite. Es wird wieder der HeNe-Laser verwendet, die CD ersetzt das Gitter. Es werden nur die Maxima erster Ordnung betrachtet, da die Maxima höherer Ordnung nicht zu erkennen sind. Der Laser muss dieses Mal etwas näher zur Wand gerückt werden, da die Winkel α_n wesentlich größer als beim Gitter sind. Daher wird die Berechnung per Kleinwinkelnäherung (Gleichung 3) zu ungenau, stattdessen wird der genaue Wert mit Gleichung 2 berechnet.

3.2 Messwerte und Ergebnisse

Bekannte Wellenlänge des Lasers: $\lambda = 632,8nm = 6,328 \cdot 10^{-7}m$

Messung des Abstands CD-Wand: $s = 0,196m$

Abstand der Maxima: $a_n = 0,185m$

$$g = \frac{n\lambda}{\sin\left(\arctan\left(\frac{a_n}{2s}\right)\right)} = \frac{1 \cdot 6,328 \cdot 10^{-7}m}{\sin\left(\arctan\left(\frac{0,185m}{2 \cdot 0,196m}\right)\right)} = 1,483 \cdot 10^{-6}m$$

3.3 Ergebnisdiskussion

Da der tatsächliche Werte für die Spurweite einer CD mit $1,6\mu m = 1,6 \cdot 10^{-6}m$, einer DVD mit $0,74\mu m$ und einer Blu-ray mit $0,32\mu m$ in der Versuchsanleitung angegeben ist, muss es sich bei dem Datenträger um eine CD handeln. Die berechnete Spurweite unterschreitet die tatsächliche also um 7,3%. Gründe für diese Abweichung sind wohl Fehler bei der Messung von a_n und s , sowie eine nicht genau senkrechte Ausrichtung des Lasers zur Wand.

4 Spektralanalyse (Untersuchung einer unbekannten Lichtquelle)

4.1 Versuchsdurchführung

In diesem Versuch soll anhand der Spektrallinien einer Gasentladungslampe bestimmt werden, welches chemische Element in ihr verwendet wird. Dazu wird ein optisches Gitter mit dem Lampenlicht beleuchtet, welches vor dem Gitter durch den Aufbau einer Kondensorlinse, eines Spalts und einer Kollimationslinse zu intensiven parallelen Strahlen aufbereitet wird.

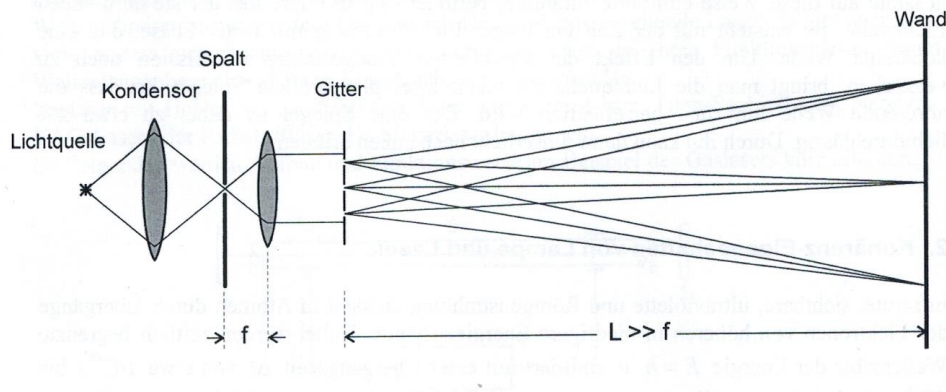


Abbildung 2: Der Aufbau für die Spektrallinienmessung von Hand (aus der Versuchsanleitung)

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, sollten die Abstände der Linsen zum Spalt ihren Brennweiten (f ist in der Abbildung die Brennweite der Kollimatorlinse) entsprechen und der Abstand Gitter-Wand L sollte wesentlich größer als f sein. Auf der Wand entsteht durch die Beugung ein für das Element der Lampe typisches Muster aus Spektrallinien. Das Muster ist achsensymmetrisch zur Achse Lampe-Gitter, das heißt es befindet sich jeweils links und rechts eine Linie der gleichen Wellenlänge. Durch Umstellen von Gleichung 3 nach λ kann jeder Spektrallinie eine Wellenlänge zugeordnet werden:

$$\lambda = \frac{ga_n}{2ns} = \frac{ga_n}{2s}$$

Hierbei ist g die Gitterkonstante, a_n der Abstand zwischen den beiden Spektrallinien gleicher Wellenlänge und s der Abstand zwischen Gitter und Wand. Die sichtbaren Spektrallinien sind Maxima erster Ordnung, also $n = 1$.

Als alternative Messmethode soll ein Faseroptik-Spektrometer verwendet werden, um das Licht der Lampe zu analysieren. Auch dieses arbeitet nach dem Beugungsprinzip. Das Licht wird durch eine Glasfaser in das Gerät geleitet. Dort wird es an einem Reflexionsgitter gebeugt. Ein CCD-Array detektiert auf jedem Pixel einen kleinen Wellenlängenbereich und ordnet also den Wellenlängen die Intensität im spektral aufgetrennten Licht

zu. Am Laptop kann das Ergebnis in Form eines Wellenlänge-Intensitäts-Diagramms betrachtet werden.

4.2 Messwerte und Ergebnisse

4.2.1 Messung von Hand

Bekannte Gitterkonstante des optischen Gitters: $g = 10nm = 10^{-5}m$

Messung des Abstands Gitter-Wand: $s = 1,367m$

Tabelle 2 zeigt für jedes Linienpaar die Abstandsmessung a_n zwischen den Linien, das Ergebnis für λ und die Farbe.

Tabelle 2: Linien-Abstand a_n , damit errechnete Wellenlänge λ und Farbe der fünf sichtbaren Spektrallinien-Paare

Linie	a_n [m]	λ [m]	Farbe
1	0,100	$3,658 \cdot 10^{-7}$	UV (violett auf Papier)
2	0,109	$3,987 \cdot 10^{-7}$	violett
3	0,118	$4,316 \cdot 10^{-7}$	blau
4	0,149	$5,450 \cdot 10^{-7}$	grün
5	0,153	$5,596 \cdot 10^{-7}$	gelb

4.2.2 Messung mit dem Faseroptik-Spektrometer

Das Faseroptik-Spektrometer liefert das in Abbildung 3 gezeigte Ergebnis.

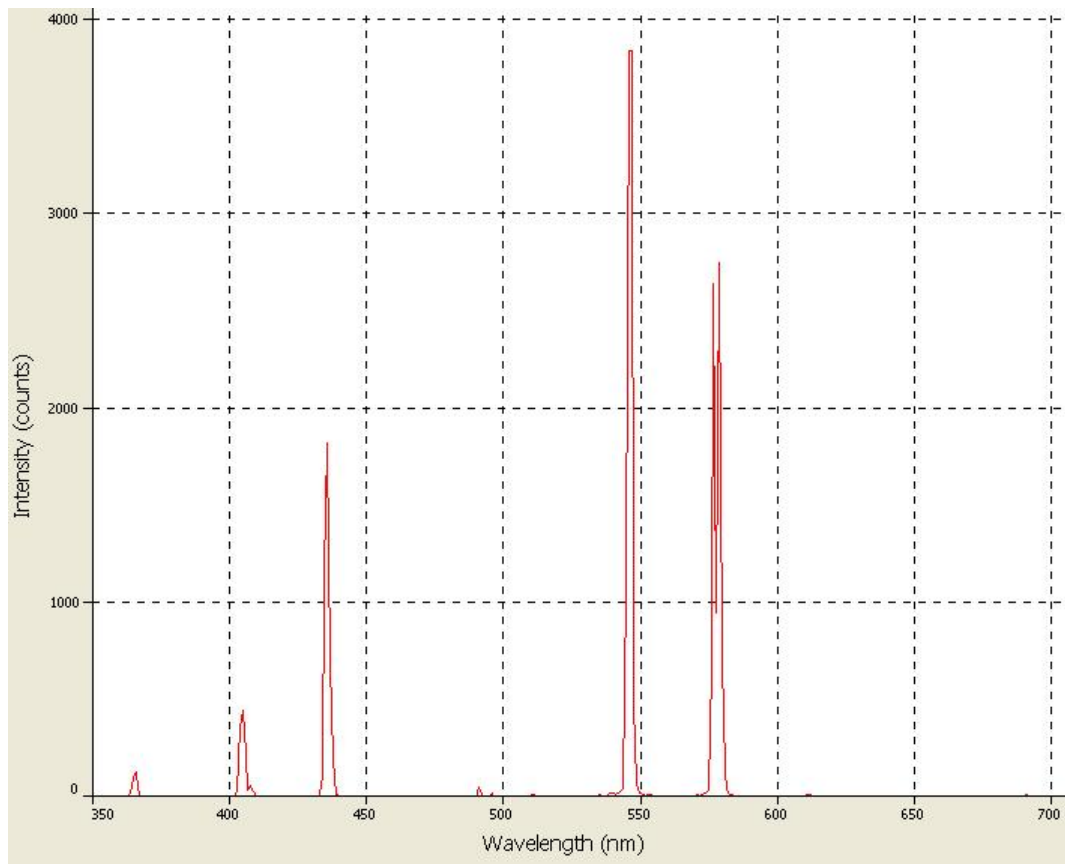


Abbildung 3: Messung der Intensität der Wellenlängen im Lampenlicht

Tabelle 3 zeigt die Werte von Abbildung 3 an den Peak-Stellen, das bedeutet die Tabelle beinhaltet alle Wellenlängen, deren Intensität einen positiven Wert hat. Die sechs Peak-Bereiche sind in der Tabelle durch '...' getrennt.

Tabelle 3: Wellenlänge und Intensität der sechs Peaks bei Spektrometer-Messung

Peak	Wellenlänge $[nm]$	Intensität $[s^{-1}]$
1	365	576,84
	366	705,64
	367	162,70
	...	
2	404	878,62
	405	1172,16
	406	525,76
	...	
3	434	177,96
	435	2604,96
	436	3730,64
	437	1645,22
4	438	381,72
	...	
	491	10,90
	...	
5	545	1713,45
	546	3738,40
	547	3738,65
	548	2743,87
6	549	95,36
	...	
	576	1400,62
	577	3727,04
7	578	2921,99
	579	3717,30
	580	3203,98
	581	306,09

4.3 Ergebnisdiskussion

Die Versuchsanleitung gibt die in Abbildung 4 gezeigten Literaturwerte zu den für Quecksilber typischen Wellenlängen an.

Quecksilber	708,19	rot	schwach
	690,72	rot	schwach
	579,07	gelb	sehr stark
	576,96	gelb	sehr stark
	546,07	grün	stark
	491,60	blaugrün	mittel
	435,84	blau	stark
	407,78	violett	mittel
	404,66	violett	mittel
	365,0 / 365,5 / 366,3	UV	stark

Abbildung 4: Auszug aus der Beschreibung der Spektrallinien einiger Elemente in der Versuchsanleitung

In Tabelle 4 wird den Literaturwerten für die Spektrallinien eine Linie der Handmessung (siehe Tabelle 2) und ein Peak der Spektrometer-Messung (siehe Tabelle 3) zugeordnet.

Tabelle 4: Den Literaturwerten λ_L für die Spektrallinien wird eine Linie aus der Handmessung mit ihrer Wellenlänge λ_H und ein Peak der Spektrometer-Messung mit seiner Wellenlänge λ_S zugeordnet und es wird die Abweichung beider Methoden vom Literaturwert berechnet.

λ_L [nm]	Linie	λ_H [nm]	Abweichung [%]	Peak	λ_S [nm]	Abweichung [%]
365,50	1	365,8	+0,08	1	366,0	+0,14
404,66	2	398,7	-1,47	2	405,0	+0,08
435,84	3	431,6	-0,97	3	436,0	+0,04
491,60	/	/	/	4	491,0	-0,12
546,07	4	545,0	-0,20	5	546,0	-0,01
576,96	5	559,6	-3,01	6	577,0	+0,01
579,07	/	/	/	7	579,0	-0,01

Wie die Betrachtung der Tabelle 4 zeigt, ist die Spektrometermessung der Handmessung überlegen. Erstens hat die Spektrometermessung sieben der Spektrallinien detektiert, während bei der Handmessung nur fünf entdeckt wurden. Insbesondere sind die Peaks 6 und 7 bei der Handmessung zu einer Linie 5 verschwommen. Die UV-Linie (Linie 1) wurde hier auch erst auf bleichmittel-haltigem Papier sichtbar. Zweitens ist die Abweichung bei der Spektrometermessung geringer, da diese die Literaturwerte immer auf einen Nanometer genau angenähert hat.

Jedenfalls waren beide Methoden genau genug, um zu erkennen, dass das zu untersuchende Element die Spektrallinien von Quecksilber aufweist.

5 Beugungserscheinungen am Einzelspalt und an einem Haar

5.1 Versuchsdurchführung

In diesem Versuch beleuchten wir einen Einzelspalt mittels eines HeNe-Lasers. Wir beobachten hier, wie sich die Beugungserscheinungen bei unterschiedlichen Spaltbreiten verhalten. Mittels Photodiode erfassen wir die Positionen lokaler Minima. Später ersetzen wir den Einzelspalt mit einem Haar, und bestimmen dessen Durchmesser.

5.2 Messwerte und Ergebnisse

Tabelle 5: Gemessene Intensität zu deren Position

Position [mm]	Intensität [V]
0,5	0,04
1	0,06
1,5	0,33
2	0,85
2,5	1,17
3	0,94
3,5	0,37
4	0,09
4,5	0,86
5	2,44
5,5	3,54
6	3,47
6,5	1,9
7	0,7
7,5	3,51
8	13,77
8,5	13,77
9	13,77
9,5	13,77
10	13,78
10,5	13,78
11	13,78
11,5	13,77
12	13,77
12,5	11,23
13	2,16
13,5	0,82
14	2,74
14,5	4,22
15	3,95
15,5	2,4
16	0,9
16,5	0,23
17	0,55
17,5	0,99
18	1,1
18,5	0,8
19	0,35
19,5	0,08
20	0,07

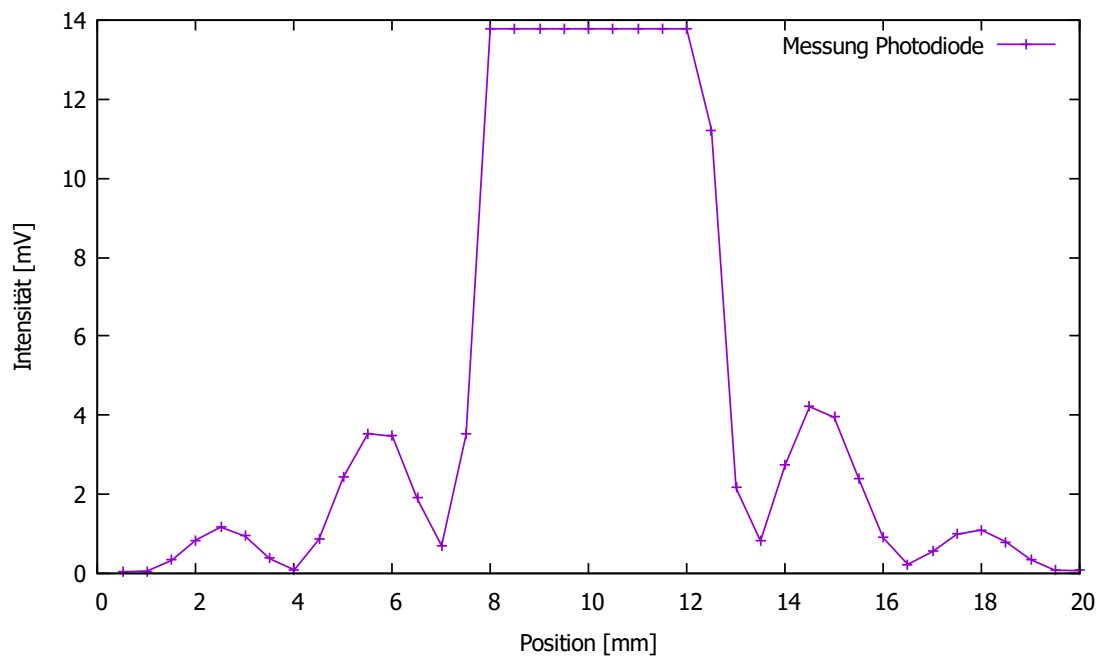


Abbildung 5: Visualisierung von Tabelle 5

Tabelle 6: Auswertung der Daten aus Tabelle 5 und Abbildung 5

Minima-Ordnung	Abstand Minima [m]	Spaltbreite [m]
1	0,018	0,000132888
2	0,034	0,000140704941176
3	0,051	0,000140704941176
Mittelwert		0,000138099294118

Tabelle 7: Auswertung des Beugungsmusters an einem Haar

Minima-Ordnung	Abstand Minima [m]	Spaltbreite [m]
1	0,032	7,8309E-05
2	0,064	7,8309E-05
3	0,096	7,8309E-05

5.3 Ergebnisdiskussion

Beim Herumexperimentieren mit der Spaltbreite des Einzelspalts ist uns aufgefallen, dass bei Verkleinerung des Spalts die Minima und Maximas n-ter Ordnung näher zu-

sammenrücken. Dies deckt sich mit Gleichung 2, in der zu sehen ist, dass die Abstände zwischen den Minimas proportional zu der Einzelspaltbreite verhält. Mittels Tabelle 5 und Abbildung 5 erhalten wir eine Spaltbreite von

$$d = \frac{3 \cdot 632,8 \cdot 10^{-9}m}{\sin \arctan \frac{0.02m}{2 \cdot 0.776m}} = 0.147mm$$

Durch Messen erhalten wir aus Tabelle 6 eine Spaltbreite von $0.138mm$. Somit weicht die mit der Photodiode gemessene Spaltbreite um 6.7% von der per Lineal gemessenen ab. Die Messmethode mittels Photodiode ist viel genauer, da die Werte bei unserer Messung um $0.5mm$ abweichen können, und bei der Messung mit dem Lineal war dies bei etwa $2mm$.

Bei der Messung der Haarbreite (Tabelle 7) erhalten wir einen Wert von $7,8309E-05m$. Dies ist im Rahmen von gängigen Haarbreiten.

6 Modellversuch zum Auflösungsvermögen des Mikroskops

6.1 Versuchsdurchführung

Hier bilden wir das mit dem Laser beleuchtete Gitter aus dem ersten Versuch auf die Wand ab, indem wir eine Linse der Brennweite $f = 20mm$ zur Hilfe nehmen. Mit einer Irisblende blenden wir alle höheren Beugungsordnungen aus, sodass nur noch das Maximum 0. Ordnung hindurch passt. Danach werden wir auch Maxima 1. und höher durch die Blende hindurch lassen.

6.2 Ergebnisdiskussion

Es war keine Struktur zu erkennen, wenn man nur das Maximum 0. Ordnung durch die Blende liess. Bei hinzufügen von mehreren Maximas konnte man parallele Linien erkennen. Dies zeigt, dass man beim Mikroskopieren nur eine genaue Aussage über ein Objekt machen kann, wenn mehr als 1 Maxima abgebildet wird