

Versuch 76

Beugung am Gitter

Protokoll des Anfänger-Praktikums II



Gruppe 14

Durchgeführt am 21.02.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsziel	3
2	Physikalische Grundlagen	3
3	Versuchsaufbau	4
4	Versuchsdurchführung	5
5	Auswertung	6
5.1	Bestimmung der Gitterkonstanten	6
5.2	Beugungsordnungen	8
5.3	Messung unbekannter Linien	9
6	Zusammenfassung und Diskussion	11
7	Literatur	13
8	Anhang	14
8.1	Lineare Regression	14

1 Versuchsziel

Ziel des Versuchs ist zunächst der Aufbau des Strahlengangs eines Gitterspektrometers. Anschließend sollen die Gitterkonstanten zweier Gitter G_1 und G_2 aus der Lage der Spektrallinien bekannter Wellenlänge einer Quecksilberdampfampe bestimmt werden.

Außerdem soll für das Gitter G_2 das Beugungsbild einer Linie mit bekannter Wellenlänge für mehrere Ordnungen gemessen und daraus die Gitterkonstante bestimmt werden sowie die Überschneidung der Spektren höherer Ordnungen für sichtbares Licht in einer Skizze gezeigt werden. Zuletzt gilt es, mit dem Gitter G_1 zusätzlich die Wellenlängen der sichtbaren Linien zu berechnen, deren Werte nicht angegeben sind.

2 Physikalische Grundlagen

Beugung am Gitter

Bei diesem Versuch wird das Phänomen der Beugung betrachtet, nach dem Licht, das auf ein Hindernis wie einen Spalt trifft, sich danach nach dem Huygenschen Prinzip in alle Richtungen ausbreitet, wobei jeder Punkt der Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle ist. Dieses Prinzip wird hier für ein Gitter betrachtet, welches aus einer großen Zahl paralleler Spalte mit der selben Breite besteht.

Dabei wird das Licht an den Spalten gebeugt und es kommt zur Interferenz hinter dem Gitter, weswegen sich Intensitätsmaxima und -minima beobachten lassen.

Hierfür wichtige Größen sind die Gitterkonstante g , die den Abstand zweier Spaltmitten beschreibt sowie der Gangunterschied δ , den zwei benachbarte Strahlenbündel unter Betrachtung eines bestimmten Winkels α zueinander haben. Dieser berechnet sich über

$$\delta = g \cdot \sin \alpha, \quad (2.1)$$

wie in Abbildung 1 nachvollzogen werden kann.

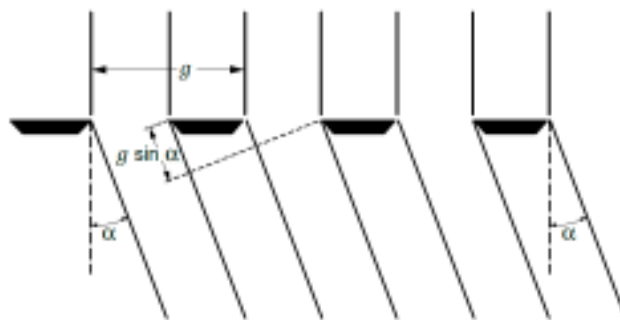


Abbildung 1: Beugung am Gitter [1]

Helligkeitsmaxima

Über den Gangunterschied lassen sich Bedingungen für die Helligkeitsmaxima und -minima festlegen. Ist der Winkel α so groß, dass der Gangunterschied gerade ein Vielfaches der Wellenlänge beträgt, so kommt es zur konstruktiven Interferenz und man erhält ein Maximum. Für bestimmte Richtungen kommt es somit zu Helligkeitsmaxima, die durch

$$\delta = g \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda \quad (2.2)$$

gegeben sind, wobei es sich bei k um eine natürliche Zahl mit der Bedingung $k < g/\lambda$ handelt, die für die Ordnung der Beugung steht. Diese Gleichung gibt dabei lediglich die Lage des Maximums an, die Intensität ist daraus nicht ersichtlich.

Überlappung von Spektren

Für jede Ordnung k gibt es dabei ein eigenes Spektrum, dessen Ausdehnung proportional zur Ordnung ist. Die Positionen einzelner Wellenlängen sind dabei leicht auseinanderzuhalten, betrachtet man jedoch ein ausgedehntes Spektrum, kann es zur Überlappung von Spektren verschiedener Ordnung kommen. Je ausgedehnter das Spektrum dabei ist, desto früher ist eine Überlappung zu beobachten, wobei die Überlappung lediglich von der Breite des Spektrums und nicht jedoch von der Gitterkonstante abhängig ist.

3 Versuchsaufbau

Der Versuch besteht aus einer optischen Schiene, an deren Ende eine Quecksilberdampfampe als Lichtquelle befestigt wurde, sowie diversen optischen Elementen, die auf der Schiene fixiert werden können. Bei diesen handelt es sich um eine Sammellinse, zwei achromatische Linsen, einen verstellbaren Spalt und ein Gestell, an dem die Gitter angebracht werden können. Die Vorrichtung für das Gitter und die dritte Linse sind dabei in einem festen Abstand aneinander fixiert. Am anderen Ende der Schiene befindet sich ein Schirm, der in seiner Position verschoben werden kann. Bei der Lichtquelle handelt es sich um eine stabförmige Lichtquelle anstatt einer Punktlichtquelle, da das Licht so deutlich paralleler auf die erste Linse trifft und somit weniger Linsenfehler durch die starke Winkeldivergenz der Lichtstrahlen vorkommen. Der ungefähre Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

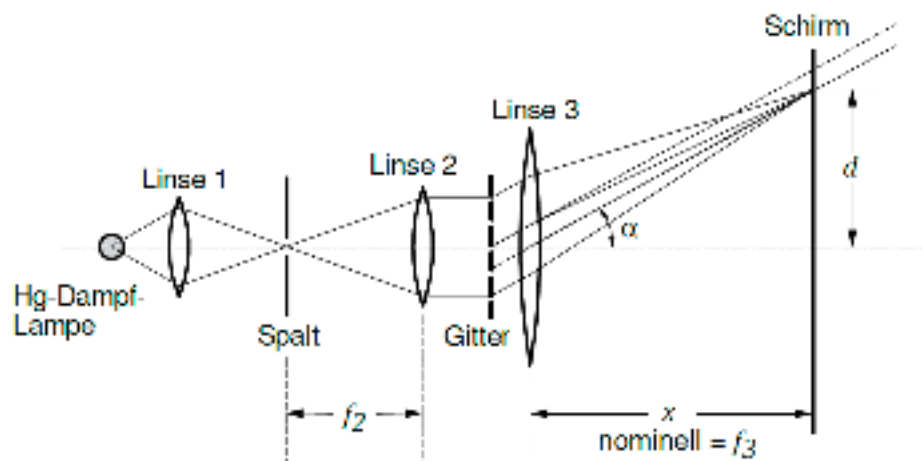


Abbildung 2: Versuchsaufbau [2]

4 Versuchsdurchführung

Zunächst galt es, die Lichtquelle so zu justieren, dass das Bild zentral und symmetrisch ausgerichtet wird. Nach der ersten Justierung wird die erste Linse, eine Kollektorlinse, und der Spalt eingefügt. Diese Linse sorgt dafür, dass die Strahlen der Lichtquelle gebrochen werden und gebündelt auf den Spalt treffen. Anschließend wird die Kollimationslinse hinter dem Gitter eingefügt. Die Linse wird verwendet, um aus den durch den Spalt kommenden Lichtstrahlen paralleles Licht zu erzeugen. Damit die Parallelität der Lichtstrahlen nicht von der Wellenlänge abhängt, handelt es sich hierbei um einen Achromaten.

Danach wurde die feste Kombination aus Gitter und der dritten Linse dicht hinter die Kollimationslinse gesetzt.

Bei der dritten Linse handelte es sich um eine achromatische Sammellinse, die dafür sorgte, dass die aus dem Gitter kommenden Lichtstrahlen in endlicher Entfernung interferieren, ohne dass dies von der Wellenlänge abhängt. Es war dabei wichtig, dass die Linse möglichst dicht hinter dem Gitter steht, da das Licht dort noch nahezu parallel ist.

Durch die letzten beiden Linsen wird letztendlich ein Bild des Spalts auf dem Schirm erzeugt, jedoch für jede Wellenlänge und jede Ordnung an einer anderen Stelle, sodass das typische Linienspektrum entsteht, wobei rotes Licht durch das Gitter stärker gebeugt wird als blaues Licht.

Durch Bewegen des Schirms konnte der Abstand d der Linien von der Mitte verändert werden. Beim Messen dieses Abstands wurden die Spektrallinien dabei durch die Verkleinerung des Abstands x zwischen Schirm und Linse möglichst weit an den Rand verschoben. Dieses Anpassen ist sinnvoll, da die Brennpunkte durch das teilweise schräge Einfallen der Strahlen auf einer Kugeloberfläche, also nicht auf einer Ebene, zur Seite wandern, was Bildfeldwölbung genannt wird. Die einzelnen Linien konnten anschließend durch leichtes Verschieben der Kollimationslinse scharf gestellt werden.

Zuerst sollten für die beiden Gitter die intensivsten Spektrallinien hergenommen und deren Abstände d_1 nach links und d_2 nach rechts vom Mittelpunkt aus auf dem Schirm gemessen werden. Da die Linien dabei durch Bewegen des Schirms nach außen verschoben wurden, war auch der Abstand x der letzten Linse zum Schirm zu datieren. Dabei wurden hier für das erste Gitter G_1 gleich alle sichtbaren Linien, deren Wellenlänge jedoch unbekannt ist, für den späteren Aufgabenteil mitgemessen und danach die beschriebene Messreihe für das zweite Gitter durchgeführt.

Für das zweite Gitter G_2 sollte außerdem für eine der intensiveren Linien für jede sichtbare Ordnung der Abstand d der Beugungsbilder gemessen werden. Die Distanz x war dabei konstant.

5 Auswertung

5.1 Bestimmung der Gitterkonstanten

Die Ablesefehler s_d des Abstandes d der Spektrallinien vom 0. Maximum sowie der Fehler s_x auf den Abstand x des Schirms von der letzten Linse wurden auf $s_d = s_x = 0,1\text{cm}$ abgeschätzt. d_1 bezeichnet den vom Mittelpunkt nach links gemessenen Abstand des Beugungsbildes, d_2 den nach rechts.

Gitter 1

Zunächst werden aus den gemessenen Werten für x und d die Öffnungswinkel α über die Formel $\alpha = \arctan(d/x)$ berechnet. Die zugehörigen Werte können Tabelle 1 entnommen werden. Dabei werden hier die Werte von d_1 verwendet, da das System nahezu symmetrisch ausgerichtet wurde und es im Rahmen des Fehlerintervalls keinen Unterschied macht.

Gitter 1 - Gitterkonstante					
Farbe	x / cm	d_1 / cm	λ / nm	$\sin(\alpha)$	s_α
Blau	100,5	38,3	435,80	0,356	0,001
Grün 3	70,7	35,4	546,10	0,448	0,002
Orange 1	71,2	38,3	577,00	0,474	0,002
Orange 2	71,8	38,6	579,10	0,474	0,002

Tabelle 1: Messergebnisse und berechnete Werte von Gitter 1

Anschließend werden die gegebenen Wellenlängen λ der Hauptlinien des Spektrums über $\sin \alpha$ in ein Diagramm aufgetragen, wie in Abbildung 3 zu sehen ist.

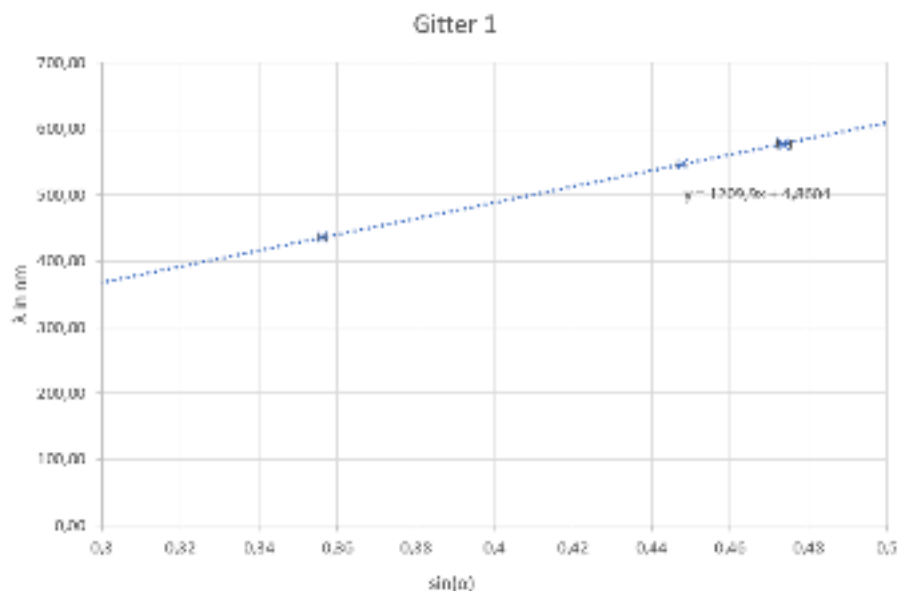


Abbildung 3: Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Gitterkonstanten

Der in x-Richtung eingezeichnete Fehler s_α ergibt sich über Fehlerfortpflanzung aus

$$s_\alpha = \underbrace{\frac{d}{x}}_{\alpha} \cdot \sqrt{\left(\frac{s_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{s_d}{d}\right)^2}. \quad (5.1)$$

Es ist dabei möglich, bei der Fehlerrechnung die Kleinwinkelnäherung anzuwenden, sodass statt des Fehlers auf $\sin \alpha$ nur der auf α betrachtet werden kann und $\tan \alpha \approx \alpha \approx \sin \alpha$ gilt.

Um die Steigung der Geraden zu berechnen, wird eine lineare Regression durchgeführt. Alle für die lineare Regression verwendeten Formeln sind dabei im Anhang zu finden. Die sich daraus ergebende Steigung entspricht aufgrund von Formel 2.2 der Gitterkonstanten g . In diesem Fall gilt $k = 1$, da lediglich die Spektrallinien der ersten Ordnung gemessen wurden. Aus der linearen Regression folgt demnach

$$g_1 = 1209,9 \text{ nm} \quad (5.2)$$

mit dem Fehler

$$s_{g_1} = 12,8 \text{ nm} \quad (5.3)$$

sodass die Gitterkonstante

$$g_1 = (1209,9 \pm 12,8) \text{ nm} \quad (5.4)$$

beträgt.

Gitter 2

Bei diesem Gitter werden die Öffnungswinkel α ebenfalls über x und d_1 ausgerechnet, die Tabelle 2 entnommen werden können.

Gitter 2 - Gitterkonstante					
Farbe	x / cm	d_1 / cm	λ / nm	$\sin(\alpha)$	s_α
Blau	102,7	5,9	435,80	0,057	0,001
Grün	102,7	7,7	546,10	0,075	0,001
Orange	102,7	8,1	577,00	0,079	0,001

Tabelle 2: Gemessene und berechnete Werte zum Gitter 2

Im Anschluss wird erneut $\sin \alpha$ über λ aufgetragen. Dies ist in Diagramm 4 zu sehen. Der eingetragene Fehler berechnet sich dabei äquivalent zu dem von Gitter 1.

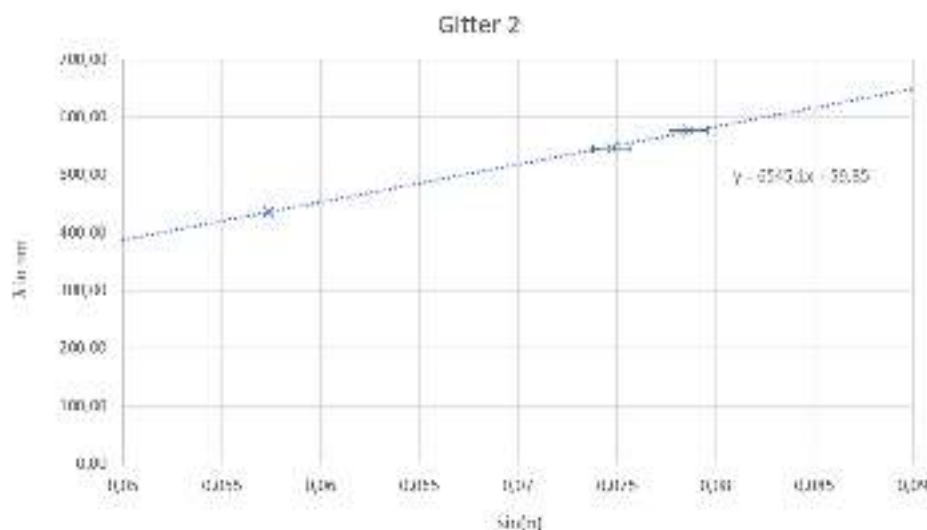


Abbildung 4: Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Gitterkonstanten

Über eine erneute lineare Regression kann die Steigung und damit die Gitterkonstante berechnet werden. Diese ergibt sich zu

$$g_2 = 6545,1 \text{ nm} \quad (5.5)$$

mit dem Fehler

$$s_{g_2} = 252,2 \text{ nm} , \quad (5.6)$$

sodass man insgesamt einen Wert von

$$g_2 = (6545,1 \pm 252,2) \text{ nm} \quad (5.7)$$

erhält.

5.2 Beugungsordnungen

Diese Aufgabe wurde ausschließlich mit Gitter 2 durchgeführt.

Um den linearen Zusammenhang zwischen $\sin \alpha$ und der Ordnungszahl k verifizieren zu können, werden zunächst erneut die Winkel α über x und d berechnet und die Unsicherheit auf diesen Wert über die Formel 5.1 bestimmt. Alle verwendeten Messungen und errechneten Werte sind in Tabelle 3 abzulesen.

Für die Untersuchung der Beugungsordnungen wurde lediglich die grünen Linien gemessen, da diese auch bei höheren Ordnungen am stärksten sichtbar waren.

Beugungsordnung Gitter 2					
k	x / cm	d ₁ / cm	sin(α)	s _α	
1	82,90	6,20	0,07	0,001	
2	82,90	12,60	0,15	0,001	
3	82,90	19,20	0,23	0,001	
4	82,90	25,90	0,30	0,001	

Tabelle 3: Gemessene und errechnete Werte zu den Beugungsordnungen

Der lineare Zusammenhang wird erneut über eine lineare Regression gezeigt. Deren zugehörige Ausgleichsgerade ist in Abbildung 5 zu sehen.

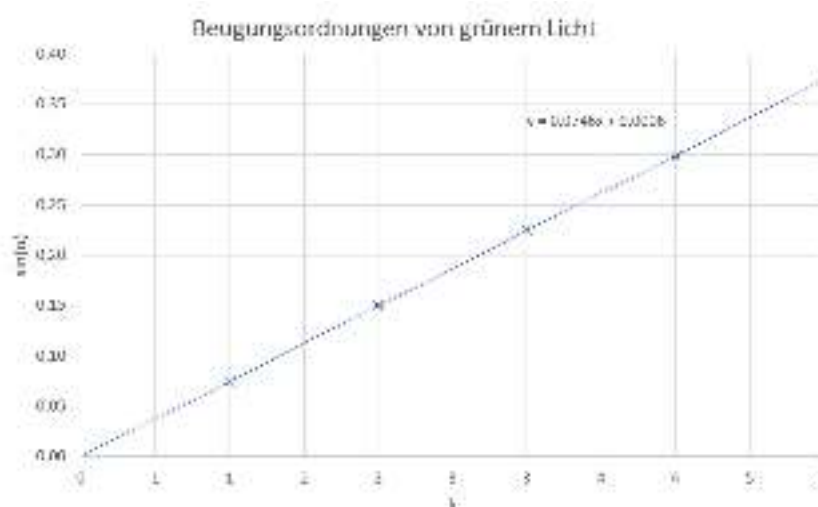


Abbildung 5: Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Gitterkonstanten

Aufgrund des Zusammenhangs 2.2 entspricht die Steigung der Geraden $b = \lambda/g$. Der errechnete Wert der Steigung ist dabei

$$b = 0,075 \quad (5.8)$$

mit dem Fehler

$$s_b = 0,001. \quad (5.9)$$

Über den gegebenen Wert für $\lambda = 546,1\text{nm}$ ergibt sich die Gitterkonstante über $g = \lambda/b$ zu

$$g_2 = 7317,9\text{nm}. \quad (5.10)$$

Der zugehörige Fehler wird über Fehlerfortpflanzung mit

$$s_{g_2} = \lambda \cdot \frac{s_b}{b} \quad (5.11)$$

ausgerechnet. Dieser beträgt

$$s_{g_2} = 51,1\text{nm}. \quad (5.12)$$

Demnach ist die Gitterkonstante hier

$$g_2 = (7317,9 \pm 51,1)\text{nm}. \quad (5.13)$$

Im Bereich des sichtbaren Lichts von etwa 400nm bis 750nm überlappen sich die Spektren höherer Ordnungen bis zu einem gewissen Grad. Wie stark diese Überlappungen sind, kann Abbildung 6 entnommen werden.

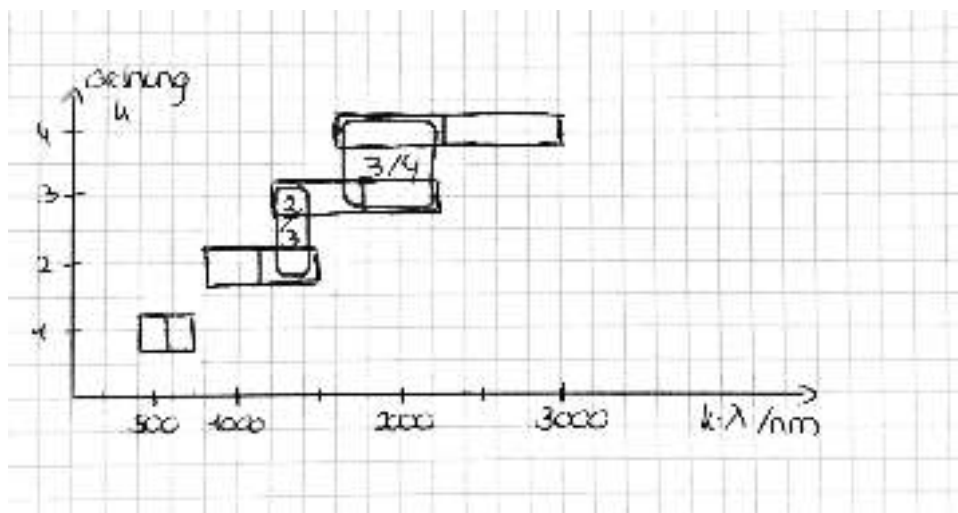


Abbildung 6: Skizze zur Überschneidung von Spektren höherer Ordnungen

5.3 Messung unbekannter Linien

Zuletzt wurden am Gitter 1 noch vier unbekannte Linien, die nicht zu den Hauptspektrallinien mit gegebener Wellenlänge gehören, gemessen. Um deren Wellenlängen zu erhalten, wurde der Zusammenhang aus Gleichung 2.2 verwendet. Umgestellt ergibt sich daraus

$$\lambda = \sin \alpha \cdot g_1. \quad (5.14)$$

Für die Gitterkonstante wird hier der berechnete Wert aus dem ersten Versuchsteil verwendet. Die Unsicherheit der Wellenlängen berechnet sich mit Fehlerfortpflanzung über

$$s_\lambda = \lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{s_\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{s_g}{g}\right)^2}. \quad (5.15)$$

Dies wird zum Vergleich auch noch mit den schon bekannten Linien durchgeführt, um deren Richtigkeit zu überprüfen.

Alle gemessenen und berechneten Werte sind in Tabelle 4 zu finden.

Bestimmung der Wellenlängen							
bekannt:	Farbe	x /cm	d ₁ /cm	sin(α)	s _α	λ /nm	s _λ /nm
	Blau	100,5	38,3	0,356	0,001	430,85	4,73
	Grün 3	70,7	35,4	0,448	0,002	541,68	6,03
	Orange 1	71,2	38,3	0,474	0,002	573,15	6,35
	Orange 2	71,8	38,6	0,474	0,002	572,89	6,35
unbekannt:	Farbe	x /cm	d ₁ /cm	sin(α)	s _α	λ /nm	s _λ /nm
	UV	92	31,1	0,320	0,001	387,45	4,32
	Violett	102,8	36	0,331	0,001	399,88	4,40
	Grün 1	83,5	36,6	0,401	0,001	485,70	5,37
	Grün 2	83,5	37,1	0,406	0,001	491,25	5,43

Tabelle 4: Gemessene und berechnete Werte zu den bekannten und unbekannten Linien am Gitter 1

6 Zusammenfassung und Diskussion

Bestimmung der Gitterkonstanten

Der lineare Zusammenhang zwischen $\sin\alpha$ und λ ist hier deutlich ersichtlich. Die Steigung entspricht dabei der Gitterkonstanten von Gitter 1 und beträgt

$$g_1 = (1209,9 \pm 12,8)\text{nm} \quad (6.1)$$

Der in der Versuchsanleitung zum Vergleich angegebene Wert für die Liniendichte ist $1/g_1 = 0,0008301/\text{nm}$ [3], was einer Gitterkonstante von $g_1 = 1204,8\text{nm}$ entspricht. Diese Werte stimmen innerhalb des einfachen Fehlerintervalls miteinander überein.

Für Gitter 2 wurde eine Gitterkonstante von

$$g_2 = (6545,1 \pm 252,2)\text{nm} \quad (6.2)$$

berechnet, wobei auch hier der lineare Zusammenhang deutlich zu sehen ist. Der dazu in der Anleitung angegebene Wert ist $g_2 = 7142,9\text{nm}$ mit einer Liniendichte von $1/g_2 = 0,0001401/\text{nm}$ [3]. Diese beiden Werte entsprechen einander innerhalb einer 3σ -Umgebung.

Der deutlich größere Fehler s_{g_2} für Gitter 2 kommt dadurch zustande, dass aufgrund des sehr viel engeren Spektrums, deutlich kleinere d als bei Gitter 1 gemessen wurden. Die Unsicherheit auf die Messung bleibt allerdings gleich groß, weshalb der Fehler auf den Abstand insgesamt in diesem Fall sehr viel höher ausfällt.

Die Werte liegen dabei nahe an den Vergleichswerten, obwohl es hier leicht zu systematischen Fehlern kommen kann, dadurch dass die Dampfampe nicht exakt symmetrisch zentriert worden ist. Da hier bei der Auswertung lediglich d_1 und nicht der Mittelwert der beiden Abstände verwendet wurde, hätten dadurch leicht größere Abweichungen entstehen können. Da die Werte jedoch innerhalb eines kleineren Fehlerintervalls liegen, spricht dies für eine gute Symmetrie beim Versuchsaufbau.

Beugungsordnungen

Der lineare Zusammenhang zwischen der Ordnung k und $\sin\alpha$ ist gut sichtbar, wobei auch hier die Steigung der Gitterkonstanten g_2 entspricht, die hier den Wert

$$g_2 = (7317,9 \pm 51,1)\text{nm} \quad (6.3)$$

hat. Der in diesem Aufgabenteil ermittelte Wert stimmt innerhalb eines 4σ -Intervalls mit dem in der Versuchsanleitung genannten Wert von $g_2 = 7142,9\text{nm}$ überein und liegt innerhalb einer 3σ -Umgebung mit dem im vorherigen Teil bestimmten Wert der Gitterkonstanten für das zweite Gitter mit $g_2 = (6545,1 \pm 252,2)\text{nm}$ überein.

Die Abweichung kann unter anderem daher kommen, dass bei diesem Versuchsteil alle sichtbaren Beugungsordnungen auf einmal auf dem Schirm zu sehen sein mussten und der Abstand x somit nicht geändert wurde. Dadurch war der Abstand d der Beugungslinien vor allem für kleinere Ordnungen teilweise sehr klein, sodass hier Ungenauigkeiten entstanden sein könnten.

Messung unbekannter Linien

Die unbekannten Wellenlängen des Spektrums, die im Versuch beobachtet werden konnten, sind

$$\lambda_{UV} = (387,45 \pm 4,32)\text{nm}, \quad (6.4)$$

$$\lambda_{Violett} = (399,88 \pm 4,40)\text{nm}, \quad (6.5)$$

$$\lambda_{Grün_1} = (485,70 \pm 5,37)\text{nm}, \quad (6.6)$$

$$\lambda_{Grün_2} = (491,25 \pm 5,43)\text{nm}. \quad (6.7)$$

Aufgrund der Tatsache, dass alle ausgerechneten Werte der bekannten Linien innerhalb einer 1σ - oder 2σ -Umgebung liegen, kann man allgemein von ähnlich genauen Werten für die unbekannten Wellenlängen ausgehen. Im Speziellen allerdings waren manche der Linien sehr schwach, weshalb ein genaues Ablesen teilweise bedeutend schwerer und ungenauer war als bei den starken Linien. Außerdem war auch der Abstand x schwieriger zu messen, da bei schwachen Linien der schärfste Abstand nur sehr schwer gefunden werden kann. Dies könnte insgesamt dazu führen, dass die Werte für die unbekannten Linien nicht genau so gut sind wie die der bekannten.

7 Literatur

- [1] Beugung am Gitter
*Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Teil B, S.88*
- [2] Versuchsaufbau
*Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Teil A, S.142*
- [3] Werte für die Gitterkonstanten g_1 und g_2
*Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Teil A, S.144*

8 Anhang

8.1 Lineare Regression

Der Ansatz der linearen Regression ist die Geradengleichung

$$y(x) = a + bx, \quad (8.1)$$

wobei es sich bei b um die Steigung und bei a um den Achsenabschnitt handelt. Die Steigung wird über die Formel

$$b = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (8.2)$$

berechnet. $\bar{x}$ bezeichnet dabei den arithmetischen Mittelwert der x-Werte, der über

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8.3)$$

ermittelt werden kann, und x_i bzw. y_i die einzelnen x bzw. y-Werte. Der Achsenabschnitt kann über die Gleichung

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (8.4)$$

bestimmt werden.

Des Weiteren wird noch die Standardabweichung der Einzelwerte benötigt, die sich über folgenden Zusammenhang herausfinden lassen:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_i (y_i - a - bx_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_i v_i^2}, \quad (8.5)$$

wobei die Varianz mit

$$v_i := y_i - a - bx_i \quad (8.6)$$

berechnet werden kann.

Die Unsicherheit der Steigung beträgt dabei

$$s_b = s \sqrt{\frac{1}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (8.7)$$

und die des Achsenabschnitts

$$s_a = s \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (8.8)$$

20.02.18

Versuch 76

Gitter G1

Messung der grünen Linie auf beiden Seiten als Test

$d_1 = 35,4 \text{ nm}$ $d_2 = 35,6 \text{ nm}$

	Farbe	x	d_1	d_2	/cm
⑥	grün +3	70,7	35,4	35,6	
③	orange-1	71,2	38,3	38,6	(linere Linie)
②	blau	100,5	38,3	38,5	
④	lila/violett	102,8	36,0	36,3	
⑤	grün-2	86,3	38,3	38,7	
④	grün + blau	87,3	38,2	38,7	
③	orange-2	74,8	38,6	38,9	
⑥	UV	92	31,1	31,9 31,2	

noch messen:

d_1	d_2
→ 37,1	37,2
→ 36,6	36,8

mit $x = 83,5$
vorher Messfehler

Gitter G2

intensive Linien

	Farbe	x	d_1	d_2
	blau	102,7	5,9	6,4
	grün	102,7	7,7	7,7
	orange	102,7	8,1	8,1

Ordnungen:

Betrachten der grünen Linie

$x = 82,9$

Ordnung	d_1	d_2
1	6,2	6,2
2	12,6	12,5
3	19,2	19,1
4	25,9	25,8

Ableseschrift

$$s_x = \pm 0,1 \text{ cm}$$

$$s_d = \pm 0,1 \text{ cm}$$

