
Optik I $\rightarrow \rightsquigarrow \rightarrow \circ$ Prismen- und Gitterspektroskopie

Gruppe B14

Daniel Wendland

Philipp Bremer

Olexiy Fedorets

Jonathan Hermann

22. September 2017



Inhaltsverzeichnis

1	Gitterspektrometer	1
1.1	Theoretische Grundlagen der Gitterspektroskopie	1
1.2	Aufbau	2
1.3	Durchführung	2
1.3.1	Bestimmung der Gitterkonstante	2
1.3.2	Bestimmung der Wellenlängen der Na-Doppellinie	3
1.3.3	Bestimmung des Auflösungsvermögens	3
1.4	Auswertung	4
1.4.1	Bestimmung der Gitterkonstante	4
1.4.2	Bestimmung der Wellenlängen der Na-Doppellinie	8
1.4.3	Bestimmung des Auflösungsvermögens	9
1.5	Fazit	10
2	Anhang	11

1 Gitterspektrometer

1.1 Theoretische Grundlagen der Gitterspektroskopie

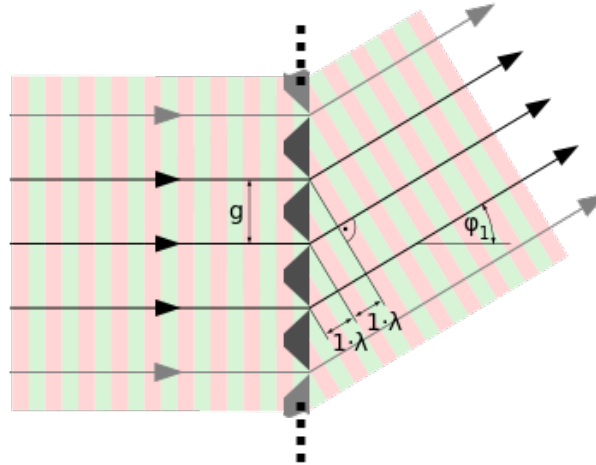


Abbildung 1: Interferenz von ebenen Wellen am Gitter, mit Gangunterschied $\Delta = \lambda$ für das Maximum erster Ordnung ²

Ein Gitter wird charakterisiert durch die Spaltbreite b , Gitterkonstante d und die Anzahl der **ausgeleuchteten** Spalte N . Auf das Gitter treffen parallele, ebene Wellenfronten (*Fraunhofer-Beugung*) und werden an den Spalten gebeugt, wobei jeder Punkt der Spaltöffnungen Ausgangspunkt einer gleichphasigen Kugelwelle ist (*Huygenssches Prinzip*).

Für den Gangunterschied der Teilwellen, die konstruktiv miteinander interferieren, lässt sich folgender Zusammenhang aufstellen:

$$\Delta = g \cdot \sin(\varphi_n) = n \cdot \lambda \quad (1)$$

In Abbildung 1 ist dies für das Maximum erster Ordnung gezeigt.

Falls das Gitter jedoch nicht senkrecht zum Strahlengang ausgerichtet ist, muss zusätzlich der Gangunterschied **vor** dem Gitter berücksichtigt werden:

$$n \cdot \lambda = g \cdot (\sin(\vartheta) + \sin(\phi_n - \vartheta)) \quad (2)$$

Hier ist jetzt ϕ_n der Winkel zwischen Einfallsstrahl und Beobachtungsrichtung und ϑ der Drehwinkel des Gitters zum Lot hin.

Es ergibt sich, dass die Lage der Intensitätsmaxima antiproportional zu Wellenlänge des Lichts ist. Der Beugungswinkel (also Linienabstand) ist antiproportional zum Spaltabstand. Die Hauptmaxima des Gitters werden mit wachsender Spaltanzahl schmaler und steiler. Außerdem befinden sich zwischen diesen noch $N-2$ Nebenmaxima, deren Intensität jedoch mit N^2 abnimmt, wodurch diese im Versuch garnicht sichtbar sind.

²Quelle:Wikipedia - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beugungsgitter-erstes-Maximum.svg>

Auflösungsvermögen Das spektrale Auflösungsvermögen des Gitters lässt sich mit Hilfe des *Rayleigh-Kriteriums* herleiten und beträgt

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = n \cdot N \quad (3)$$

Dabei nimmt man an, dass wir Spektrallinien genau dann noch trennen können, wenn das Maximum der ersten Linie im Minimum der zweiten liegt.

siehe gleichung (3) bla oder auch 3 bla.

a	h
f	g

1.2 Aufbau

Der Aufbau des Gitterspektrometers ist analog zu dem vom Prismenspektrometer (siehe ??), nur das jetzt ein Gitter in den Strahlengang gestellt wird. Dabei muss darauf geachtet werden, dass dieses senkrecht zum einfallenden Strahl steht, da sonst bereits vor dem Gitter ein Gangunterschied der Strahlen vorliegt und die Lage der Maxima sich dadurch verschiebt. Da dies mit den zur Verfügung stehenden Mitteln aber nicht sichergestellt werden kann, muss später bei der Auswertung untersucht werden, ob das Gitter schräg stand.

Außerdem wird bei diesem Versuch zusätzlich zur **HgCd**-Lampe eine **Na**-Lampe verwenden, um die Wellenlänge der Natrium-Doppellinie und Anhand dieser das Auflösungsvermögen des Gitters zu bestimmen.

Der gesamte Versuch wurde mit einem Gitter mit 600 Strichen/*mm* durchgeführt.

1.3 Durchführung

Das grundlegende Vorgehen ist ähnlich zu dem beim Prismenspektrometer: durch Ausrichtung des Fernrohrs auf die einzelnen Spektrallinien und Ablesen des Nonius werden die Beugungswinkel vermessen.

Zu Beginn wird die Nulllinie (Maximum 0.-Ordnung) der **HgCd**-Lampe durch 10-fache Messung bestimmt. Es wird angenommen, dass der statistische Fehler auf die folgenden Messungen gleich bleibt, daher werden die Linien im folgenden nurnoch 3 Mal ausgemessen.

1.3.1 Bestimmung der Gitterkonstante

Zunächst werden die Wellenlängen der Spektrallinien der **HgCd**-Lampe als bekannt angenommen (diese stammen aus der NIST-Datenbank und haben nur sehr geringe Unsicherheiten, und werden daher als nicht fehlerbehaftet angenommen) und die Beugungswinkel ϕ_n werden gemessen. Dabei konnte nur bis zur zweiten Ordnung beobachtet werden. Leider konnten aus Zeitgründen nur 4 Spektrallinien (die am besten sichtbarsten) vermessen, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Die Winkel wurden immer 3 Mal gemessen und gemittelt, jeweils bis zur zweiten Ordnung auf beiden Seiten.

Element	Wellenlänge [nm]	Farbe
Cd	467.81	blau
Cd	508.58	grün
Hg	576.96	gelb
Cd	643.85	rot

Tabelle 1: Zur Vermessung ausgewählte Spektrallinien der HgCd-Lampe (Werte stammen aus der NIST-Datenbank)

Der Beugungswinkel ist dabei immer die Differenz des gemessenen Winkels und der Nulllinie. Aus den Winkel kann dann durch eine lineare Regression die Gitterkonstante bestimmt werden.

1.3.2 Bestimmung der Wellenlängen der Na-Doppellinie

Mit Hilfe der zuvor bestimmten Gitterkonstante wird nun die Natrium-Doppellinie ausgemessen. Auch hier wurde bis zur zweiten Ordnung auf beiden Seiten 3 Mal gemessen und gemittelt.

Die ermittelten Werte werden mit den realen Werte in Tabelle 2 verglichen.

Wellenlänge [nm]	Farbe
589.59	gelb
589.00	gelb

Tabelle 2: Na-Doppellinie (Werte stammen aus der NIST-Datenbank)

1.3.3 Bestimmung des Auflösungsvermögens

Das Auflösungsvermögen des Gitters wird auch anhand der Na-Doppellinie bestimmt (dieses ist unabhängig von Wellenlänge oder Gitterkonstante (!) wie in Gleichung 3 zu sehen). Um die Abhängigkeit von der Anzahl N der ausgeleuchteten Spalte zu realisieren, wird eine Schlitzblende verwendet, die feste Schlitzbreiten von $0,5\text{mm}$ bis 6mm in $0,5\text{mm}$ -Schritten bietet. Es wird beobachtet, bei welcher Schlitzbreite die Doppellinie nicht mehr unterscheidbar wird. Dieses Ergebnis wird dann mit dem nach der Formel minimal benötigten Auflösungsvermögen ($A = 589\text{nm}/0.59\text{nm} \approx 998.3$) verglichen.

1.4 Auswertung

Bestimmung der Beugungswinkel Da die abgelesenen Winkel nicht den Winkeln bezüglich der Lichteinfallrichtung entsprechen, müssen diese zunächst umgerechnet werden, indem man den Nullwinkel φ_0 (Tabelle 3) von diesen abzieht:

$$\varphi_n = \varphi_{n,\text{gemessen}} - \varphi_0 \quad (4)$$

Messung	abgelesener Winkel
1	206.5° 0'
2	206.0° 25'
3	206.5° 0'
4	206.0° 29'
5	206.5° 1'
6	206.5° 0'
7	206.5° 3'
8	206.5° 2'
9	206.5° 0'
10	206.5° 1'

Tabelle 3: Gemessene Werte der Nulllinie (Maximum 0. Ordnung)

Die Unsicherheit auf alle gemessenen Winkel $\varphi_{n,\text{gemessen}}$ wird als konstant angenommen, und berechnet sich aus der Messung der Nulllinie zu $\tilde{\sigma}_{\varphi_{n,\text{gemessen}}} = 0.034^\circ$. Bei einer dreifachen Messung der weiteren Winkel ergibt sich damit eine statistische Unsicherheit von

$$\sigma_{\varphi_{n,\text{gemessen}}} = \frac{\tilde{\sigma}_{\varphi_{n,\text{gemessen}}}}{\sqrt{3}} = 0.019^\circ.$$

Aufgrund der zehnfachen Messung ergibt sich für die Nulllinie $\varphi_0 = (260.502 \pm 0.011)^\circ$. Die Unsicherheit dieses Wertes wirkt sich dabei im Folgenden systematisch auf die Werte aus und wird daher als systematische Unsicherheit betrachtet.

1.4.1 Bestimmung der Gitterkonstante

Um die Gitterkonstante zu bestimmen, werden zunächst wie oben beschrieben vier Spektrallinien der HgCd-Lampe ausgemessen (Tabelle 4).

Farbe	-2. Ordnung [°]	-1. Ordnung [°]	1.Ordnung [°]	2. Ordnung [°]
blau, $\lambda = 467.81 \text{ nm}$	225.800	243.922	277.172	295.661
grün-blau, $\lambda = 508.58 \text{ nm}$	222.300	242.389	278.683	299.294
gelb, (1) $\lambda = 576.96 \text{ nm}$	215.978	239.900	281.250	305.850
rot, $\lambda = 643.85 \text{ nm}$	209.078	237.389	283.817	313.161

Tabelle 4: gemessene Winkel der Spektrallinien der HgCd-Lampe, jeweils mit Unsicherheit $\sigma_{\varphi_{n,\text{gemessen}}} = 0.019^\circ$

An den umgerechneten Werten $\varphi_n = \varphi_{n,\text{gemessen}} - \varphi_0$ wird dann eine lineare Regression an der umgestellten Formel für die Bedingung für konstruktive Interferenz (1) durchgeführt, damit

die x-Werte bei der linearen Regression nicht fehlerbehaftet sind.

$$\Delta = g \cdot \sin(\varphi_n) = n \cdot \lambda$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{g} \cdot n \cdot \lambda = \sin(\varphi_n)$$

Damit ergibt sich dann eine lineare Regression der Form

$$a \cdot n \cdot \lambda + b = \sin(\varphi_n)$$

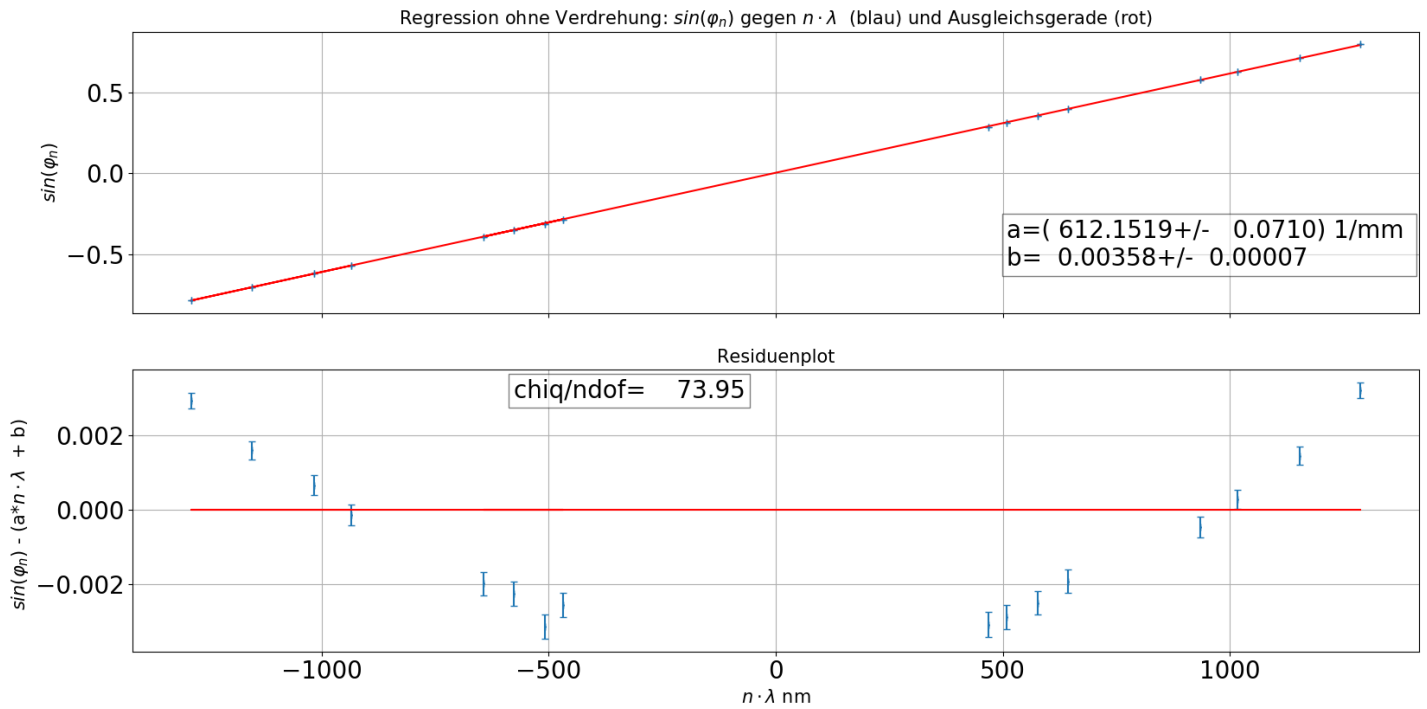


Abbildung 2: Lineare Regression ohne Beachtung der Verdrehung des Gitter

Aus der Steigung lässt sich dann die Gitterkonstante $g = \frac{1}{a}$ mit statistischer Unsicherheit $\sigma_{g,stat} = \frac{\sigma_{a,stat}}{a^2}$ bestimmen (entsprechend für die systematische Unsicherheit).

Die systematische Unsicherheit erhält man dabei aus der Verschiebemethode. Hier wurde dafür die Nulllinie jeweils um eine Standardabweichung in jede Richtung verschoben und die halbe Differenz der Steigungen als systematischer Fehler auf die Steigung der ursprünglichen linearen Regression verwendet (Tabelle 5)

a_+	$(612.1530 \pm 0.0710) \frac{1}{mm}$
a_-	$(612.1508 \pm 0.0710) \frac{1}{mm}$
$\sigma_{a_{sys}} = \frac{a_+ - a_-}{2}$	$0.011 \frac{1}{mm}$
b_+	0.00343 ± 0.00007
b_-	0.00372 ± 0.00007
$\sigma_{b_{sys}} = \frac{b_+ - b_-}{2}$	0.00015

Tabelle 5: Steigungen der um $\pm \sigma_{\varphi_0}$ verschobenen linearen Regressionen, siehe Abbildungen 4, 5

Die Ergebnisse der linearen Regression, sowie die berechnete Gitterkonstante sind in Tabelle 6 jeweils in der Form $Wert \pm \sigma_{stat} \pm \sigma_{sys}$ zusammengefasst.

a	$(612.1519 \pm 0.0710 \pm 0.0011) \frac{1}{mm}$
b	$(0.00358 \pm 0.00007 \pm 0.00015)$
$\frac{\chi^2}{ndof}$	73.95
g	$(1633.582 \pm 0.190 \pm 0.003) nm$
Abweichung vom Realwert $\frac{1mm}{600} \approx 1666.7 nm$	174.50
relative Abweichung $1 - \frac{g_{gemessen}}{g_{real}}$	1.99%

Tabelle 6: Ergebnisse der linearen Regression

Es fällt sofort auf, dass die Abweichung in Standardabweichungen mit 170.5 sehr hoch ist. Dies könnte aus zu kleinen Fehlerabschätzungen resultieren. Zum Beispiel könnte es sein, dass die Unsicherheit auf die Winkelmessung doch nicht als konstant angenommen werden kann. Auch die Nichtbeachtung einiger Systematiken könnte diese Abweichung zur Folge haben. Da jedoch die relative Abweichung mit knapp 2 Prozent noch im Rahmen liegt, werden diese wohl keinen allzu großen Einfluss haben und die hohe Abweichung folgt wahrscheinlich eher aus den recht kleinen Unsicherheiten.

Eine der hier noch nicht beachteten Systematiken ist die Verdrehung des Gitters gegenüber der Einfallrichtung des Lichtes. Dass dies bei der Auswertung eine Rolle spielt erkennt man deutlich am Residuum der linearen Regression, da diese eine Wannenform aufweist (siehe 2).

Korrektur der Gitterverdrehung Um diesen Fehler zu korrigieren wird eine erneute Anpassung durchgeführt, diesmal betrachtet man jedoch die obige Formel in der korrigierten Form

$$\frac{1}{g} \cdot n \cdot \lambda = \sin(\vartheta) + \sin(\varphi_n - \vartheta) \quad (5)$$

mit dem Verdrehungswinkel ϑ . Um gleichzeitig die Steigung \tilde{a} und den Ordinaten-Abschnitt \tilde{b} der linearen Regression

$$\tilde{a} \cdot n \cdot \lambda + \tilde{b} = \sin(\vartheta) + \sin(\varphi_n - \vartheta) \quad (6)$$

sowie den Verdrehungswinkel ϑ zu bestimmen, wird die Methode der Intervallschachtelung für ϑ angewandt und dabei versucht das $\frac{\chi^2}{ndof}$ zu minimieren.

Dabei wird ein fest vorgegebenes Winkelintervall (hier $[-\frac{\pi}{6}, +\frac{\pi}{6}]$), in dem ϑ liegt immer weiter verkleinert, indem man jeweils für einen Wert in der rechten Intervallhälfte und für einen in der Linken eine lineare Regression durchführt und die $\frac{\chi^2}{ndof}$ miteinander vergleicht. Dieses verfahren wird dann rekursiv in dem Teilintervall durchgeführt, welches das kleinere $\frac{\chi^2}{ndof}$ liefert, bis man entweder 20 Durchläufe erreicht, oder sich der berechnete Winkel (bis auf ein Epsilon) nicht mehr ändert. Abbildung 3 zeigt die finale lineare Regression.

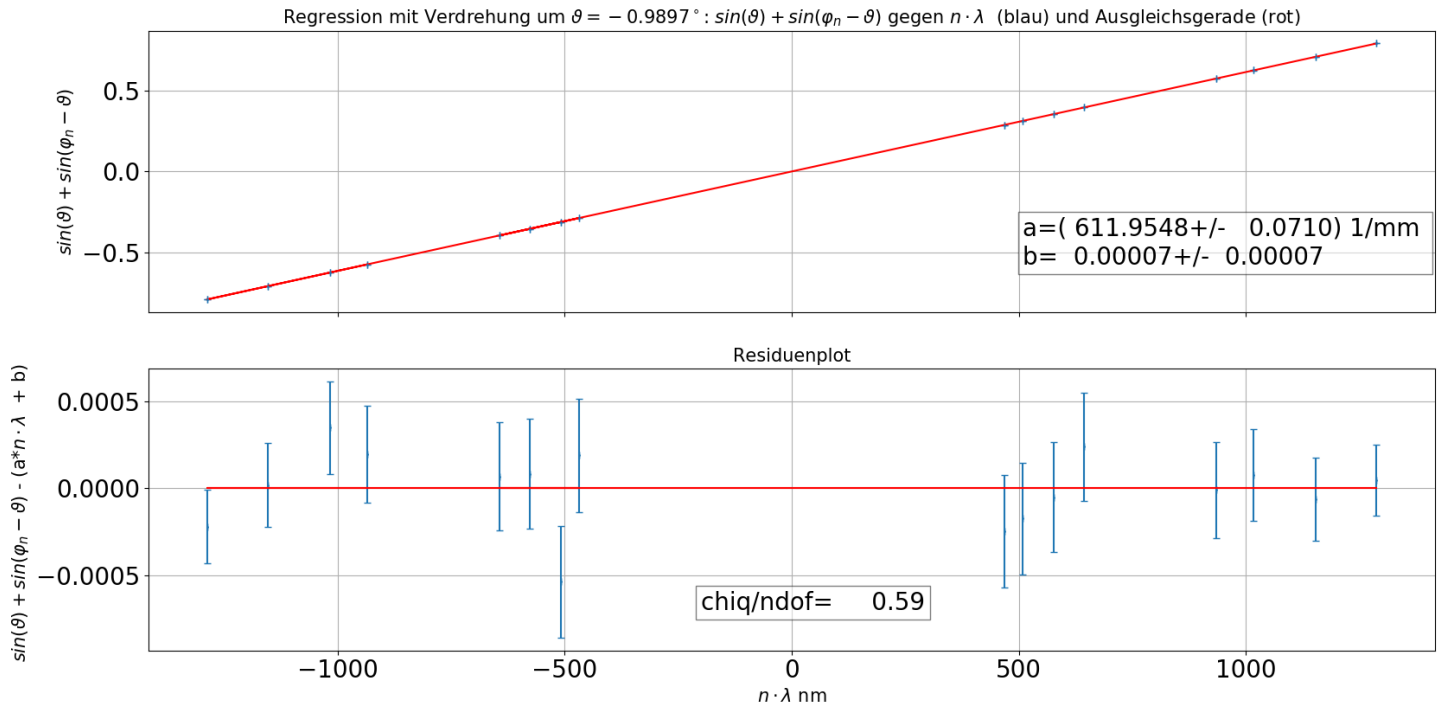


Abbildung 3: Lineare Regression mit Beachtung der Verdrehung des Gitters

Die Unsicherheiten auf die Steigung und den Achsenabschnitt ergeben sich dabei analog zur Anpassung ohne Beachtung der Verdrehung. Für die systematischen Unsicherheiten siehe Tabelle 7.

\tilde{a}_+	$(611.9579 \pm 0.0710) \frac{1}{mm}$
\tilde{a}_-	$(611.9517 \pm 0.0710) \frac{1}{mm}$
$\sigma_{\tilde{a}_{sys}} = \frac{\tilde{a}_+ - \tilde{a}_-}{2}$	$0.031 \frac{1}{mm}$
\tilde{b}_+	-0.00008 ± 0.00007
\tilde{b}_-	0.00022 ± 0.00007
$\sigma_{\tilde{b}_{sys}} = \frac{\tilde{b}_- - \tilde{b}_+}{2}$	0.00015

Tabelle 7: Steigungen der um $\pm\sigma_{\varphi_0}$ verschobenen linearen Regressionen unter Beachtung der Verdrehung des Gitters, siehe Abbildungen 6, 7

Theoretisch ließe sich der Verdrehungswinkel mit der oben beschriebenen Methode beliebig genau bestimmen. Allerdings sind die Messung der anderen Winkel fehlerbehaftet, was sich wiederum auf das Ergebnis für den Verdrehungswinkel auswirkt. Daher wird auch diese Unsicherheit mit der Verschiebungsmethode bestimmt. Hier wurden jedoch die Winkel um den kombinierten statistischen Fehler der Winkelmessung und den der Nulllinienmessung verschoben:

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\sigma_{\varphi_0}^2 + \sigma_{\varphi_n}^2}$$

Die Ergebnisse für die bestimmten Winkel ϑ sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

ϑ_+	-0.9675°
ϑ_-	-1.0119°
$\sigma_\vartheta = \frac{\vartheta_+ - \vartheta_-}{2}$	0.0222
ϑ	$-0.9897^\circ \pm 0.0222^\circ$

Tabelle 8: Verdrehungswinkel bei ursprünglicher Regression, sowie bei einer Verschiebung der Winkel um $\pm\sigma_\varphi = \pm\sqrt{\sigma_{\varphi_0}^2 + \sigma_{\varphi_n}^2}$

Damit ergeben sich für die Steigung \tilde{a} und den Ordinaten-Abschnitt \tilde{b} der linearen Regression, sowie für die daraus berechnete Gitterkonstante die in Tabelle 9 aufgeführten Ergebnisse.

ϑ	$-0.9897^\circ \pm 0.0222^\circ$
\tilde{a}	$(611.9548 \pm 0.0710 \pm 0.0031) \frac{1}{mm}$
\tilde{b}	$(0.000068 \pm 0.000069 \pm 0.000148)$
$\frac{\chi^2}{ndof}$	0.59
\tilde{g}	$(1634.108 \pm 0.190 \pm 0.008) nm$
Abweichung vom Realwert $\frac{1mm}{600} \approx 1666.7 nm$	171.47
relative Abweichung $1 - \frac{\tilde{g}_{gemessen}}{g_{real}}$	1.96%

Tabelle 9: Ergebnisse der linearen Regression, nach Korrektur um Verdrehungswinkel des Gitters

Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Tabelle 6 zeigt, dass sich die Ergebnisse nicht bedeutend ändern, sowohl die Abweichung in Standardabweichungen, als auch die relative Abweichung bleiben in der selben Größenordnung. Lediglich das $\frac{\chi^2}{ndof}$ verringert sich merklich und das resultierende Residuum des Fits in Abbildung 3 zeigt keinerlei Systematiken mehr. Dies legt den Schluss nahe, dass entweder zuvor schon vermutet die Unsicherheiten auf die Winkelmessung nicht ideal abgeschätzt wurden, oder dass der Hersteller des Gitters weniger genau gearbeitet hat als angegeben.

1.4.2 Bestimmung der Wellenlängen der Na-Doppellinie

Mit der nun bestimmten Gitterkonstante und Verdrehung des Gitters (Tabelle 9) kann aus der Messung der Na-Doppellinie dessen Wellenlänge bestimmt werden. Aus Gleichung 2 folgt für den Fehler auf die berechnete Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{g}{n} \cdot (\sin \vartheta + \sin(\varphi_n - \vartheta))$$

$$\Rightarrow \sigma_\lambda = \frac{1}{|n|} \cdot \sqrt{(\sin(\vartheta) + \sin(\varphi_n - \vartheta))^2 \sigma_g^2 + g^2 (\cos(\vartheta) - \cos(\varphi_n - \vartheta))^2 \sigma_\vartheta^2 + g^2 \cos(\varphi_n - \vartheta)^2 \sigma_{\varphi_n}^2}$$

wobei wie zuvor $\sigma_{\varphi_n} = \sqrt{\sigma_{\varphi_0}^2 + \sigma_{\varphi_n, gemessen}^2}$ gilt (siehe 1.4). Für die Na-Doppellinie wurden folgende Werte ermittelt:

Linie	-2. Ordnung [nm]	-1. Ordnung [nm]	1.Ordnung [nm]	2. Ordnung [nm]
gelb (1)	588.889 ± 0.252	588.635 ± 0.600	588.011 ± 0.592	588.435 ± 0.247
gelb (2)	589.677 ± 0.252	589.676 ± 0.599	589.331 ± 0.592	589.023 ± 0.247

Tabelle 10: Nach Gleichung 7 berechnete Wellenlängen der Spektrallinien der Na-Lampe

Die sich daraus ergebenden Wellenlängen der Na-Doppellinie sind in Tabelle 11 dargestellt.

Linie	Wellenlänge [nm]		Abweichung
	NIST-Wert	berechneter Wert	
gelb (1)	589.59	588.61 ± 0.16	2.42σ
gelb (2)	589.00	589.37 ± 0.16	1.37σ

Tabelle 11: Bestimmte Wellenlänge der Na-Doppellinie mit Abweichung vom Realwert

Mit dieser Methode konnten die Wellenlängen also mit geringem Fehler bestimmt werden, was aber auch zu einer relativ hohen Abweichung in Standardabweichung führt.

1.4.3 Bestimmung des Auflösungsvermögens

Das minimal benötigte Auflösungsvermögen beträgt nach Formel 3

$$A_{min} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{589.00nm}{0.59nm} \approx 998.31$$

Die mit Hilfe der Schlitzblende bestimmten Auflösungsvermögen für die einzelnen Ordnungen sind in Tabelle 12 zu sehen. Dabei konnte die Na-Doppellinie für die beiden ersten Ordnungen beim Wechsel der Blende d von $2mm$ zu $1.5mm$, und für die beiden zweiten Ordnungen von $1mm$ zu $0.5mm$ nicht mehr aufgelöst werden. Daher wurde jeweils die Mitte des Intervalls genommen, wobei sich der Fehler aus der Gleichverteilung mit $\sigma_d = 0.5mm/\sqrt{12}$ ergab. Daraus wurde das Auflösungsvermögen wie folgt berechnet:

$$A = n \cdot \frac{d}{g}, \quad \sigma_A = |n| \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_d}{g}\right)^2 + \left(\frac{d}{g^2}\right)^2 \sigma_g^2} \quad (7)$$

mit der Gitterkonstante g und σ_g aus Tabelle 9.

	-2. Ordnung	-1. Ordnung	1.Ordnung	2. Ordnung
A	917.93 ± 176.66	1070.92 ± 88.33	1070.92 ± 88.33	1040.32 ± 55.86
A_{Mittel}	1040.32 ± 55.86			
A_{min}	998.31			
Abweichung	0.75σ			

Tabelle 12: Bestimmte Auflösungsvermögen mit Abweichung

Somit konnte das Auflösungsvermögen ungefähr ermittelt werden und liegt innerhalb einer Standardabweichung vom theoretischen Wert. Zu beachten ist allerdings, dass die Formel 3 nur das für die Na-Doppellinie minimal benötigte Auflösungsvermögen angibt, und das Auflösungsvermögen des verwendeten Gitters durchaus darüber liegen kann.

1.5 Fazit

Gitterkonstante

Wellenlänge Die Fehler auf die bestimmten Wellenlängen waren alle relativ gering, wodurch eine relativ hohe Abweichung von $\sim 2.5\sigma$ und $\sim 1.5\sigma$ vom Datenbankwert der Na-Doppellinie resultierte.

Auflösungsvermögen Trotz der nur schrittweise einstellbaren Blende und der daraus resultierenden relativ hohen Fehler lag das bestimmte Auflösungsvermögen innerhalb einer Standardabweichung vom theoretischen Wert. Zu beachten ist allerdings, dass die Formel 3 nur das für die Na-Doppellinie minimal benötigte Auflösungsvermögen angibt, und das Auflösungsvermögen des verwendeten Gitters durchaus darüber liegen kann. Zur genaueren Bestimmung würde sich hier eine variable Schlitzblende mit Feinstellschraube anbieten.

2 Anhang

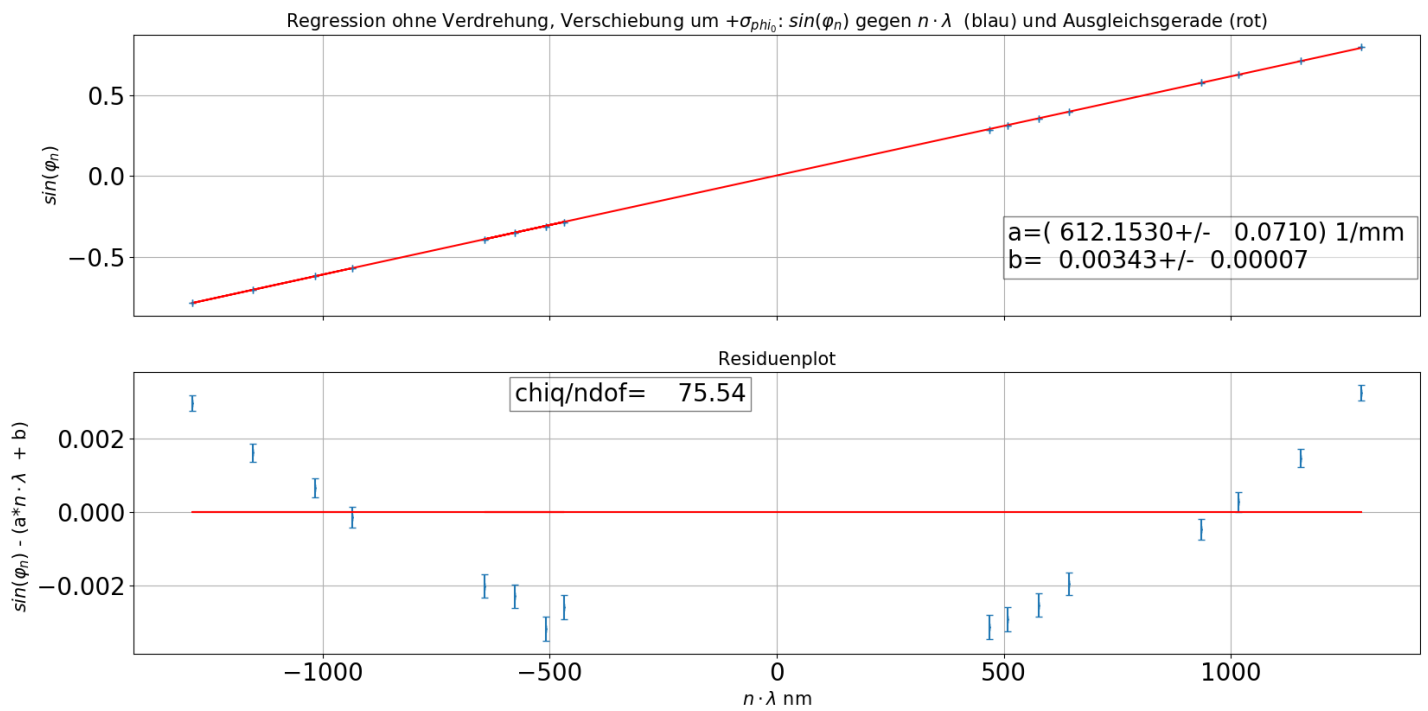


Abbildung 4: lineare Regression ohne Beachtung der Verdrehung des Gitters, verschoben um $+\sigma_{\varphi_0}$

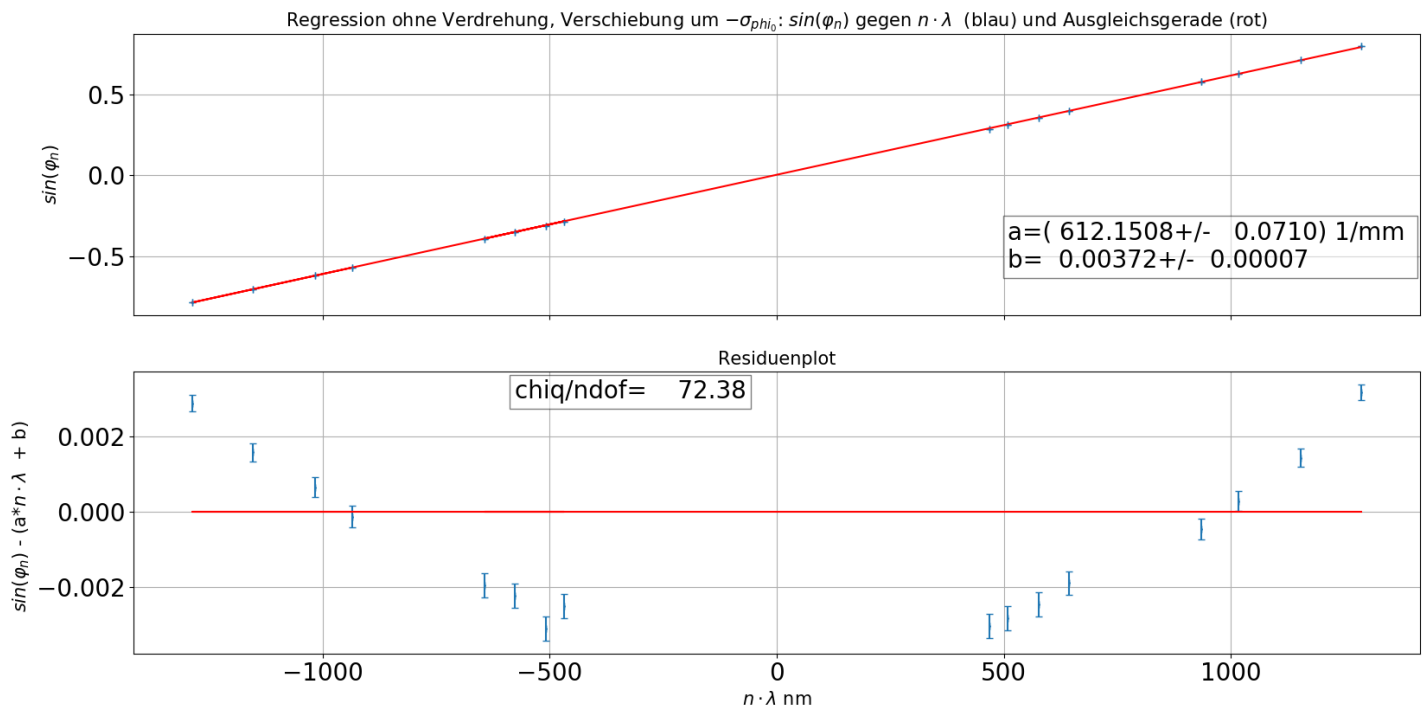
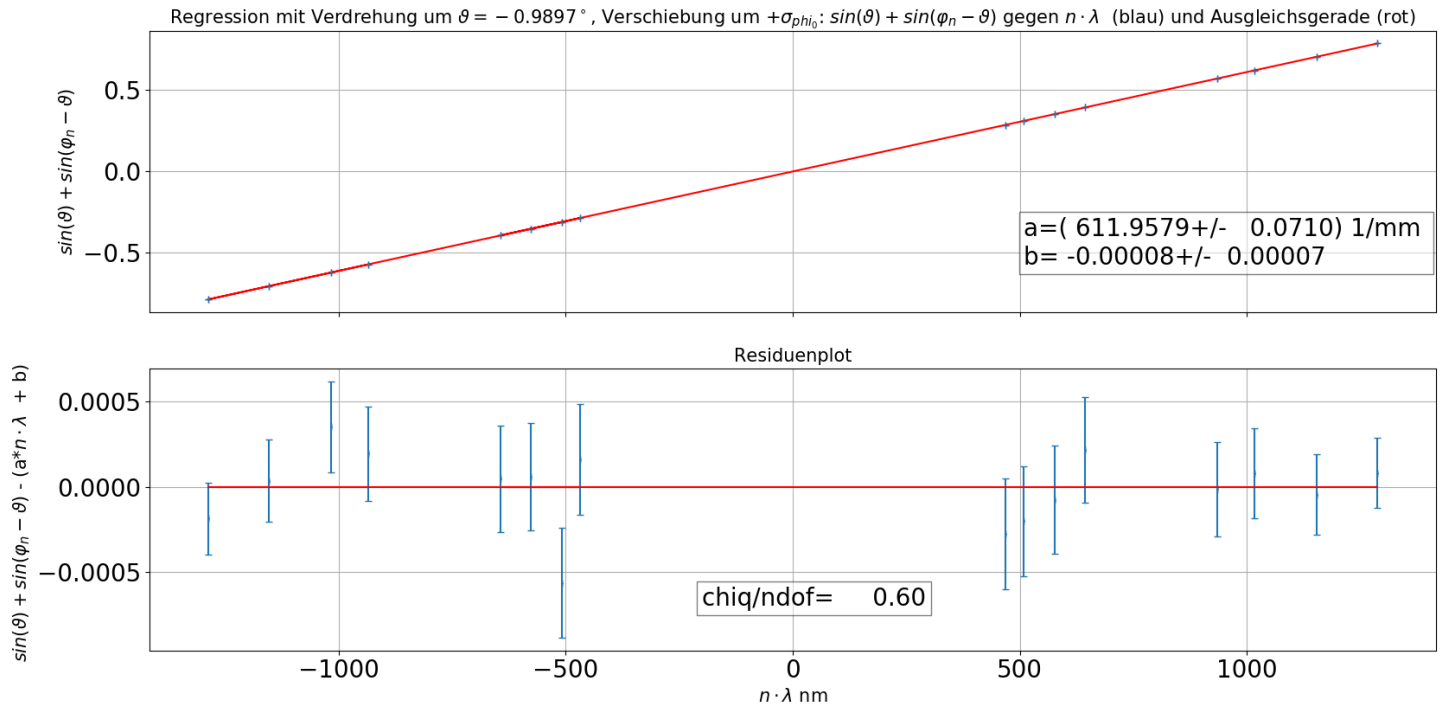
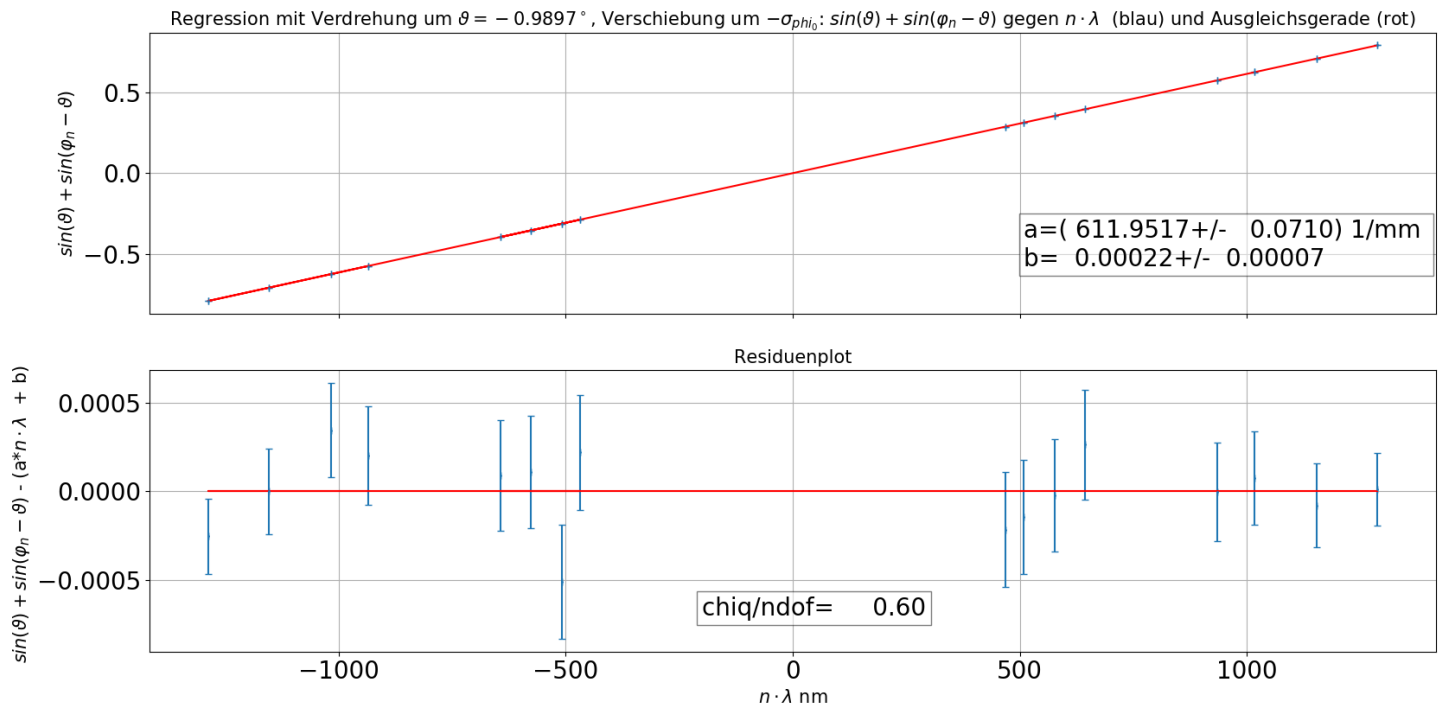


Abbildung 5: lineare Regression ohne Beachtung der Verdrehung des Gitters, verschoben um $-\sigma_{\varphi_0}$

Abbildung 6: lineare Regression mit Beachtung der Verdrehung des Gitters, verschoben um $+\sigma_{\varphi_0}$ Abbildung 7: lineare Regression mit Beachtung der Verdrehung des Gitters, verschoben um $-\sigma_{\varphi_0}$

Abbildungsverzeichnis

1	Interferenz von ebenen Wellen am Gitter, mit Gangunterschied $\Delta = \lambda$ für das Maximum erster Ordnung ³	1
2	Lineare Regression ohne Beachtung der Verdrehung des Gitter	5
3	Lineare Regression mit Beachtung der Verdrehung des Gitters	7
4	lineare Regression ohne Beachtung der Verdrehung des Gitters, verschoben um $+\sigma_{\varphi_0}$	11
5	lineare Regression ohne Beachtung der Verdrehung des Gitters, verschoben um $-\sigma_{\varphi_0}$	11
6	lineare Regression mit Beachtung der Verdrehung des Gitters, verschoben um $+\sigma_{\varphi_0}$	12
7	lineare Regression mit Beachtung der Verdrehung des Gitters, verschoben um $-\sigma_{\varphi_0}$	12

Tabellenverzeichnis

1	Zur Vermessung ausgewählte Spektrallinien der HgCd-Lampe (Werte stammen aus der NIST-Datenbank)	3
2	Na-Doppellinie (Werte stammen aus der NIST-Datenbank)	3
3	Gemessene Werte der Nulllinie (Maximum 0. Ordnung)	4
4	gemessene Winkel der Spektrallinien der HgCd-Lampe, jeweils mit Unsicherheit $\sigma_{\varphi_{n,gemessen}} = 0.019^\circ$	4
5	Steigungen der um $\pm\sigma_{\varphi_0}$ verschobenen linearen Regressionen, siehe Abbildungen 4, 5	5
6	Ergebnisse der linearen Regression	6
7	Steigungen der um $\pm\sigma_{\varphi_0}$ verschobenen linearen Regressionen unter Beachtung der Verdrehung des Gitters, siehe Abbildungen 6, 7	7
8	Verdrehungswinkel bei ursprünglicher Regression, sowie bei einer Verschiebung der Winkel um $\pm\sigma_\varphi = \pm\sqrt{\sigma_{\varphi_0}^2 + \sigma_{\varphi_n}^2}$	8
9	Ergebnisse der linearen Regression, nach Korrektur um Verdrehungswinkel des Gitters	8
10	Nach Gleichung 7 berechnete Wellenlängen der Spektrallinien der Na-Lampe . . .	9
11	Bestimmte Wellenlänge der Na-Doppellinie mit Abweichung vom Realwert	9
12	Bestimmte Auflösungsvermögen mit Abweichung	9