

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK

Übungsnummer: 1

Übungstitel: Abbe-Theorie (KFU)

Betreuer: Robert Nuster

Gruppennummer: 42

Name: Nico Eisner

Name: Philip Waldl

Mat. Nr.: 12214121

Mat. Nr.: 12214120

Datum der Übung: 01.12.2023

WS 2023/2024

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen & Grundlagen	3
2.1 Auflösungsvermögen und numerische Apertur	3
2.2 Variation der numerischen Apertur	4
2.3 Abbesche Abbildungstheorie	4
2.4 Wichtige Zusammenhänge	5
3 Versuchsanordnung	5
4 Geräteliste	7
5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse	7
5.1 Vertrautmachen mit dem Versuch	9
5.2 Quantitative Bestimmung des Auflösungsvermögens	9
5.3 Zusammenhang Auflösung Spaltgitterbildes und Anzahl Beugungsordnungen	10
5.4 Freies Experimentieren	12
6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse	12
6.1 Quantitative Bestimmung des Auflösungsvermögens	13
6.2 Zusammenhang Auflösung Spaltgitterbildes und Anzahl Beugungsordnungen	14
6.3 Freies experimentieren	15
7 Diskussion	16
7.1 Vertrautmachen mit dem Versuch	16
7.2 Quantitative Bestimmung des Auflösungsvermögens	16
7.3 Zusammenhang Auflösung Spaltgitterbildes und Anzahl Beugungsordnungen	16
7.4 Freies Experimentieren	16
8 Zusammenfassung	17
8.1 Quantitative Bestimmung des Auflösungsvermögens	17
8.2 Zusammenhang Auflösung Spaltgitterbildes und Anzahl Beugungsordnungen	17
9 Anhang	18
Literatur	18

1 Aufgabenstellung

Der Versuch Abbe-Theorie behandelt, wie aus dem Namen bereits hervorgeht, die gleichnamige Idee von Ernst Abbe, die in erster Linie die von allen Objekten hervorgehenden Beugungseffekte und deren Zusammenhang mit dem Auflösungsverhalten beinhaltet. Mittels Experiment der Abbe-Theorie soll dies- und einige weitere Eigenschaften dieses Verhaltens nun gezeigt werden. Die genauen Arbeitsaufträge sehen dabei wie folgt aus:

- Vertrautmachen mit dem experimentellen Aufbau
- Bestimmung des Auflösungsvermögens einer Linse in Abhängigkeit ihrer numerischen Apertur für
 - blaues Licht
 - rotes Licht
- Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Bildauflösung von einem Spaltgitter und der Zahl der transmittierten Beugungsordnungen
- Freies Experimentieren
 - Beugungsbild horizontaler Balken
 - Änderung des Beugungsbild mit dem Abstand der Balken
 - Grund für Beugungerscheinungen in der Richtung normal zu den Hauptordnungen
 - Dunkelfeldmikroskopie
 - Verbindung zu Fourieroptik

2 Voraussetzungen & Grundlagen

Das Kapitel Voraussetzungen und Grundlagen wurde basierend auf den literarischen Werken Demröder [1] und dem Script Abbe-Theorie [4] verfasst.

2.1 Auflösungsvermögen und numerische Apertur

Bei optischen Instrumenten wird das Auflösungsvermögen Δx_{min} als der Minimalabstand zwischen zwei Punkten definiert, bei dem das Gerät diese noch als zwei punktförmige Objekte unterscheiden kann. Dieser Versuch kann mit in dieser Hinsicht mit einem Mikroskop verglichen werden, dessen Auflösungsvermögen wie folgt definiert ist:

$$\Delta x_{min} = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

Dabei stellt λ die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und NA die numerische Apertur des optischen Instrumentes, also grob gesagt dem Öffnungswinkel, durch den das Licht eintreten kann, dar. Letzteres ist wiederum definiert als:

$$NA = n \sin(\alpha) \quad (2)$$

mit n als Brechzahl des Mediums und α dem halben Öffnungswinkel des Lichtkegels. Da n in der Regel (sofern Luft als Medium dient) einen Wert von ziemlich genau 1 annimmt und α als $\tan^{-1}(\frac{R}{g})$ (R ... Linsenradius, g ... Gegenstandsweite) angesehen werden kann (veranschaulicht in Abbildung 1), lässt sich die Formel für die numerische Apertur auch folgendermaßen umschreiben:

$$NA = \sin(\tan^{-1}(\frac{R}{g})) \quad (3)$$

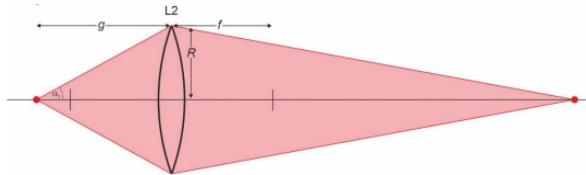


Abb. 1: Schematische Darstellung Bestimmung NA [4]

2.2 Variation der numerischen Apertur

Der Einfluss des numerischen Apertur kann nur experimentell gezeigt werden, indem man sie variiert. Hierfür bietet es sich an, Linsen mit verschiedenen Durchmessern (Veränderung von R in 3) zu verwenden, oder der Einsatz einer Lochblende in der hinteren Brennebene der Linse. Wie genau die numerische Apertur das Auflösungsverhalten beeinflusst wird im folgenden Experiment gezeigt.

2.3 Abbesche Abbildungstheorie

Wie im Kapitel Aufgabenstellung bereits einleitend erwähnt, besagt die Abbe Theorie, dass von jedem Objekt Beugungsmaxima hervorgehen und die Auflösung einen Zusammenhang zur Zahl der Beugungsmaxima besitzt. Wichtig hierbei ist außerdem die Verwendung eines Gitters, dessen Spaltbreite dem halben Spaltabstand entspricht. Somit fehlen fehlen dem Gitter die gradzahligen Beugungsmaxima und am Bild hinter dem Vielfachspalt sind nur die ungradzahligen Maxima erkennbar (wird im Verlauf des Experiments noch gezeigt). Mit Hilfe des Tools für die grafische Darstellung solcher Muster von Leifi-Physik [2] kann dieses Scenario theoretisch simuliert werden:

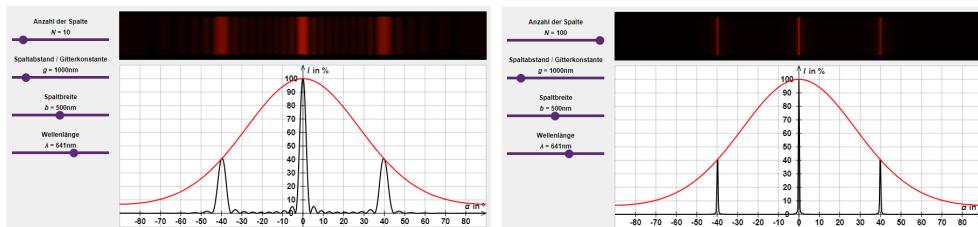


Abb. 2: Simulation der Maxima einer Gitterbeugung von rotem Licht mit 10/100 Spaltöffnungen

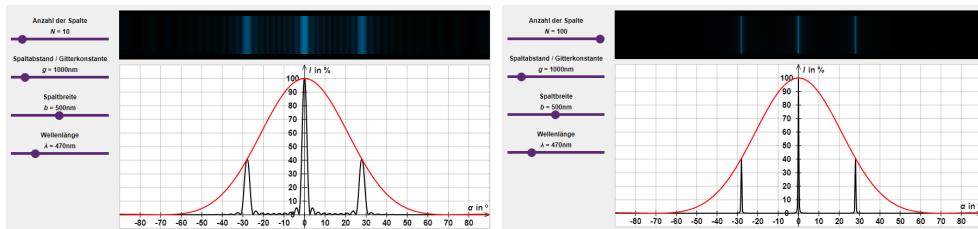


Abb. 3: Simulation der Maxima einer Gitterbeugung von blauem Licht mit 10/100 Spaltöffnungen

2.4 Wichtige Zusammenhänge

Für eine erfolgreiche Auswertung der Daten werden außerdem folgende Zusammenhänge benötigt:

$$\text{Mittelwert} \quad M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

$$\text{Numerische Apertur} \quad NA = \frac{D_{Blende}}{2f_2} \quad \Delta NA = \left| \frac{\partial NA}{\partial D_{Blende}} * \Delta D_{Blende} \right| + \left| \frac{\partial NA}{\partial f_2} * \Delta f_2 \right| \quad (5)$$

$$\text{Auflösungsvermögen theoretisch} \quad d_{th} = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad \Delta d_{th} = \left| \frac{\partial d_{th}}{\partial \lambda} * \Delta \lambda \right| + \left| \frac{\partial d_{th}}{\partial NA} * \Delta NA \right| \quad (6)$$

$$\text{Räumliche Frequenz} \quad f_R = 2^{n_g \frac{n_E - 1}{6}} \quad \Delta f_R = \left| \frac{\partial f_R}{\partial n_g} * \Delta n_g \right| + \left| \frac{\partial f_R}{\partial n_E} * \Delta n_E \right| \quad (7)$$

$$\text{Auflösungsvermögen experimentell} \quad d_{exp} = \frac{1}{f_R} \quad \Delta d_{exp} = \left| \frac{\partial d_{exp}}{\partial f_R} * \Delta f_R \right| \quad (8)$$

3 Versuchsanordnung

Der Aufbau des Experiments ist im Grunde sehr simpel. Es besteht aus einer Aluschiene, auf der acht verschiedene Module in einem bestimmten Abstand angebracht sind.

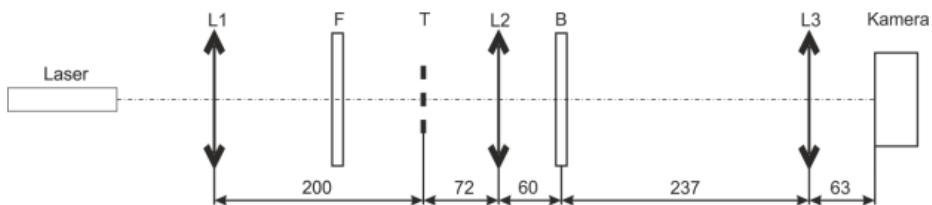


Abb. 4: Optischer Aufbau des Experiments; L1: $f_1 = 200\text{mm}$, F: Filterrad mit roter/blauer LED, Graufilter und freiem Durchgang, T: Testobjekt; L2: $f_2 = 60\text{mm}$; B: Filterrad mit 2/3/6 mm Lochblenden, einer Irisblende und einer Drahtblende, L3(einklappbar): $f_3 = 50\text{mm}$. [4]

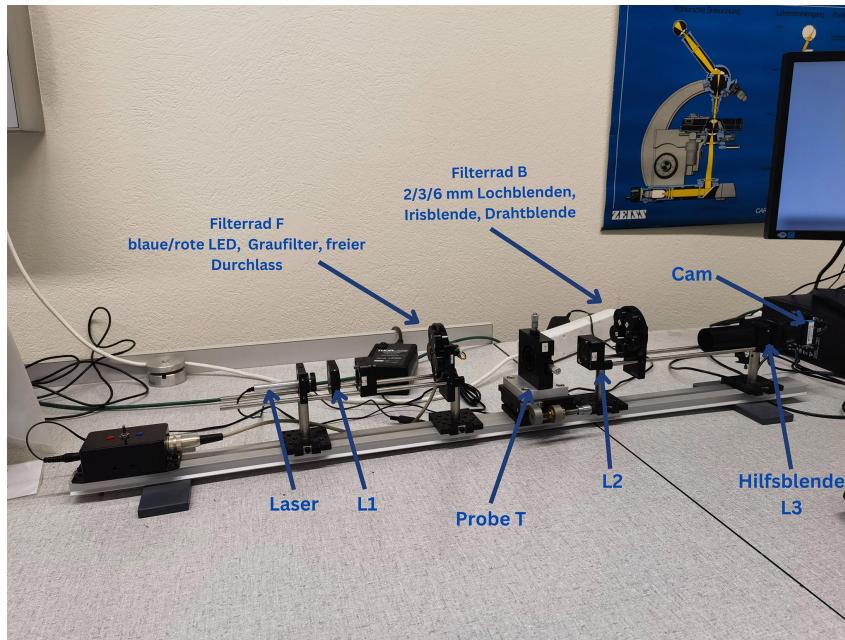


Abb. 5: Versuchsaufbau laut Abbildung 4

Die Einzelteile mit Beschreibung sind in folgender Tabelle ersichtlich:

Tab. 1: Aufbau: Module

Nr.	Modul	Bezeichnung	Eigenschaft
1	Laser	Laser	$\lambda = 531,9 \text{ nm}$
2	Sammellinse 1	L1	$f_1 = 200 \text{ mm}$
3	Filterrad	F	rote/blauer LED, Graufilter und freier Durchgang
4	Testobjekt bzw. Probe	T	
5	Sammellinse 2	L2	$f_2 = 60 \text{ mm}$
6	Filterrad	B	2/3/6 mm Lochblenden, Irisblende und Drahtblende
7	Sammellinse 3	L3	$f_3 = 50 \text{ mm}$
8	Kamera	Kamera	Fotosensor mit PC/IC Capture Verbindung

Mit dem Drehrad an der Seite des Testobjektes ist es außerdem möglich, die Schärfe der Probe zu adjustieren.

Teil der Vorbereitung war es auch, mögliche Strahlengänge durch diesen Aufbau theoretisch zu zeichnen. Diese sind in nachfolgenden Abbildungen zu sehen.

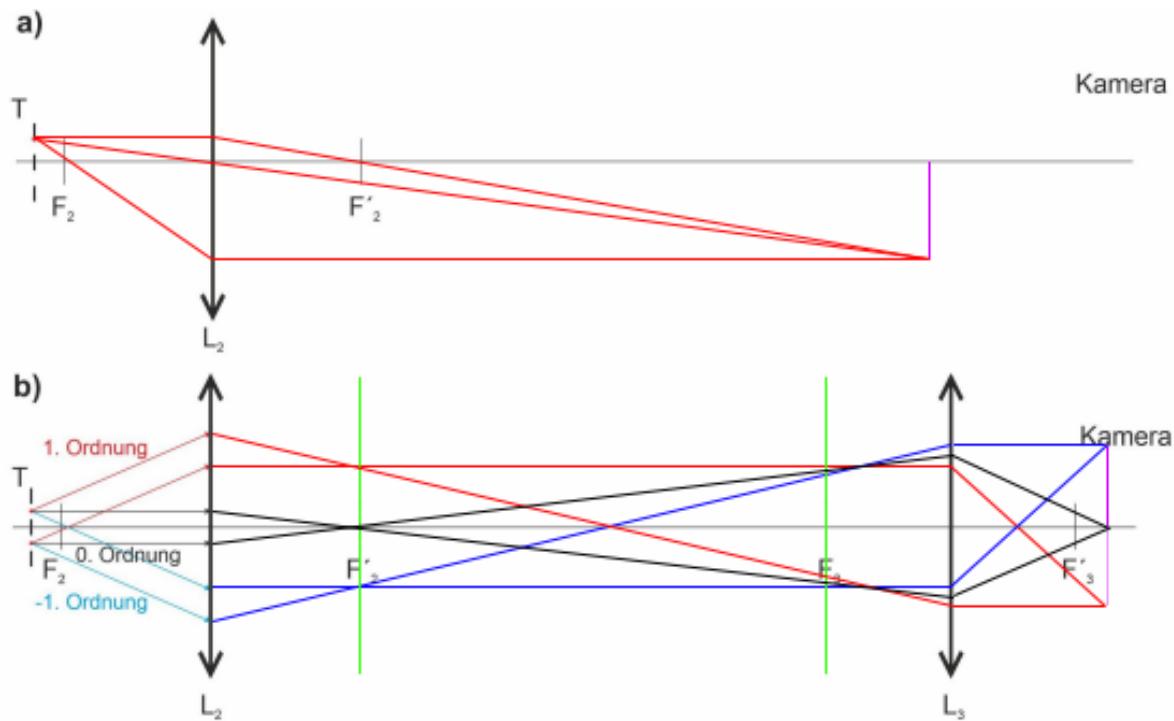


Abb. 6: Theoretische Strahlengänge

4 Geräteliste

Tab. 2: Im Versuch verwendete Geräte und Utensilien.

Gerät	Bezeichnung	Hersteller	Eigenschaften	Unsicherheit
Sammellinse	L1	n.a.	f ₁ = 200 mm	1 mm
Sammellinse	L2	n.a.	f ₁ = 60 mm	1 mm
Sammellinse	L3	n.a.	f ₁ = 50 mm	1 mm
Laser	Laser	Thorlabs	λ = 531,9 nm	n.a.
LED blau	LED _b	Cxxx	λ = 470 nm	5 nm
LED rot	LED _r	Cxxx	λ = 635 nm	5 nm
Kamera	Kamera	The Imaging Source	n.a.	n.a.
Kamera	n.a.	The Imaging Source	n.a.	n.a.
SciDAVis	n.a.	CXXX	n.a.	n.a.

5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse

Bevor die eigentlichen Messvorgänge starten konnten, war es laut Aufgabe 0 wichtig, sich zuvor mit dem Aufbau und Messinstrumenten vertraut zu machen. Der erste Blick fällt dabei auf das Testobjekt des Versuches, dargestellt in folgender Abbildung 7.

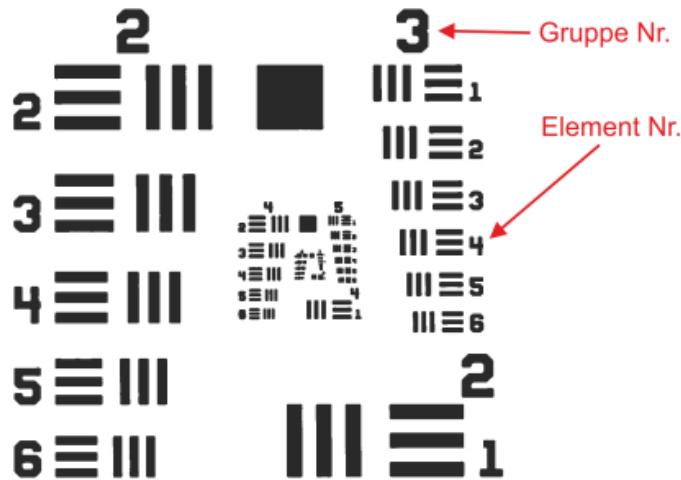


Abb. 7: Testelement des Versuches [4]

Wie sich erkennen lässt, besteht dieses aus mehreren Strichblöcken, die sich aus drei gleichweit voneinander entfernten Linien (je drei horizontal und drei vertikal ausgerichtet) zusammensetzen. Zur genauen Beschriftung wurden die Blöcke in Gruppen eingeteilt, welche sich jeweils auf einer Seite der Spirale befinden und durch die großen Zahlen gekennzeichnet sind. Jede Gruppe besteht weiters aus sechs dieser horizontalen- und vertikalen Strichelementen, gekennzeichnet mit einer weiteren Nummerierung. Mit der nachfolgenden Tabelle 3 ist jedem Element der Gruppen ein eindeutiger Wert für die räumliche Frequenz f_R in 1/mm zugeteilt.

Tab. 3: Räumliche Frequenz der Balken in 1/mm für die unterschiedlichen Elemente des Testobjektes [4]

Element Nr.	Gruppen Nr.									
	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
1	0,250	0,500	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	32,0	64,0	128,0
2	0,280	0,561	1,12	2,24	4,49	8,98	17,95	36,0	71,8	144,0
3	0,315	0,630	1,26	2,52	5,04	10,10	20,16	40,3	80,6	161,0
4	0,353	0,707	1,41	2,83	5,66	11,30	22,62	45,3	90,5	181,0
5	0,397	0,793	1,59	3,17	6,35	12,70	25,39	50,8	102,0	203,0
6	0,445	0,891	1,78	3,56	7,13	14,30	28,50	57,0	114,0	228,0

Das Testobjekt wird für spätere Messwerte benötigt. Weiters wurde der Pc gestartet und das Programm IC-Capture gestartet. Nachdem die Kamera verbunden wurde, wurden einige Einstellungen getroffen:

- Bildformat: "RGB1280-720 3"
- Histogramm eingeblendet - 2

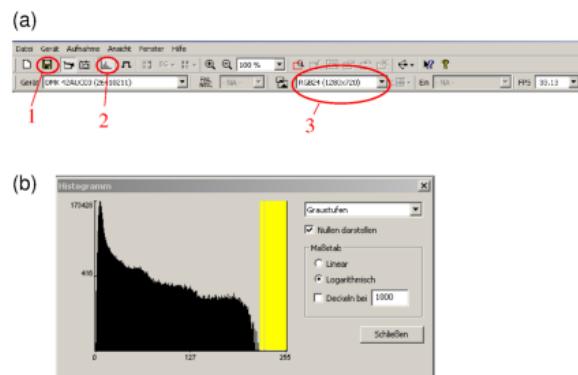


Abb. 8: a.) IcCapture Einstellungen b.) eingebladetes Histogramm

Das Histogramm dient dazu, die Belichtung des aufzunehmenden Bildes zu adjustieren. Hierfür sollte die Exposure-Time so eingestellt werden, dass der gelbe Balken rechts gerade noch zu sehen ist, um das Bild optimal zu belichten.

5.1 Vertrautmachen mit dem Versuch

Um nun zu Aufgabe 0 zurückzukommen, zu Beginn wurde eine der beiden LEDs (rot oder blau) eingeschaltet und ungehindert durch die Vorrichtung gelassen. Dann wurde die Hilfslinse L3 weggeklappt und die verstellbare Irisblende auf Filterrad B in den Strahlengang gedreht. Mit dem kleinen Hebel kann diese geöffnet bzw. geschlossen werden, wobei zunächst für ersteres gesorgt wurde. Am Verschiebeschlitten des Testobjektes konnte nun auf das Testobjekt fokussiert und dieses somit scharf gestellt werden. Mit den Mikrometerschrauben am Verschiebeschlitten des Testelementes konnte nun unterschiedliche Bereiche davon dargestellt werden, wobei die obere Schraube eine Änderung an der x-Achse und die seitliche Schraube eine Änderung auf der y-Achse bewirkt. Nun soll ein Bild des Testelementes mit geöffneter- und beinahe geschlossener Irisblende aufgenommen werden. Das Messergebnisse ist in nachfolgenden Abbildungen zu erkennen.

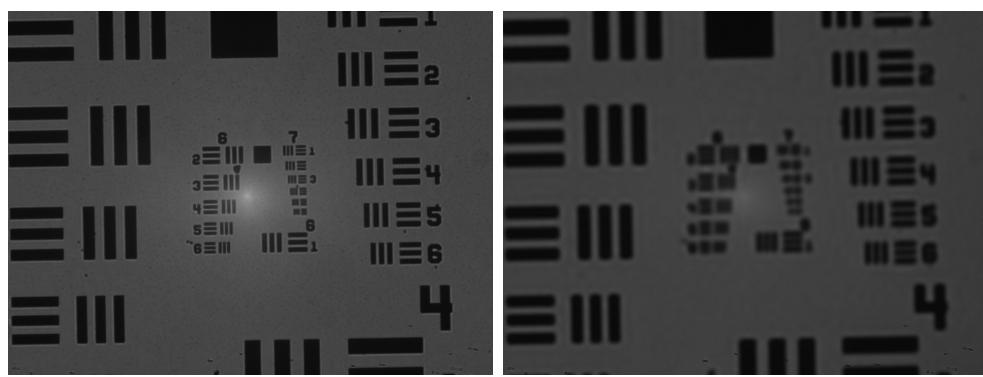


Abb. 9: Testelement mit geöffneter/fast geschlossener Irisblende

5.2 Quantitative Bestimmung des Auflösungsvermögens

Beim nächsten Punkt drehte sich alles um das Auflösungsvermögen. Dieses galt es nämlich in Abhängigkeit der numerischen Apertur für zwei verschiedene Wellenlängen (rotes/blaues Licht) zu bestimmen. Hierfür wurde die benötigte LED eingeschaltet und in

den Strahlengang eingebracht. Mit Hilfe der drei verschiedenen Lochblenden am Filterrad B kann die numerische Apertur gemäß Formel 3 (Änderung des Radius R) variiert werden.

Zu beachten gibt es einen Abbildungsfehler, der durch die LED-Linse entsteht und einen weißen Punkt am Bild erscheinen lässt. Durch verschieben des Testelement mittels der beiden Drehschrauben soll dieser Punkt an einen für die Messung unwichtigen Ort (am Besten die Mitte der Spirale) verschoben werden.

Nun sollen die Bilder für jede Lochblende untersucht werden. Dabei wird jenes Balkenelement (horizontal und vertikal) bestimmt, welches nichtmehr erkennbar ist. Dieses Element gilt es in der Tabelle 3 ausfindig zu machen und die daraus folgenden Werte zu notieren. Bei dieser Herangehensweise gibt es einen Ermessensspielraum bei der Entscheidung, ob die Balken noch erkennbar sind oder nicht. Dieser Spielraum stellt für die spätere Auswertung die Unsicherheit dar.

Tab. 4: Messung des Auflösungsvermögens für rotes Licht

Nr.	Blende / mm	Gruppe	Element	Unsicherheit	
1	2	5	4	5/3	5/5
2	3	6	1	5/6	6/2
3	6	6	5	6/4	6/6

Tab. 5: Messung des Auflösungsvermögens für blaues Licht

Nr.	Blende / mm	Gruppe	Element	Unsicherheit	
1	2	5	5	5/4	5/6
2	3	6	3	6/2	6/4
3	6	7	1	6/6	7/2

5.3 Zusammenhang Auflösung Spaltgitterbildes und Anzahl Beugungsordnungen

Im weiteren Versuchsverlauf soll nun der Zusammenhang zwischen Bildauflösung und Beugungsordnungen dargestellt werden. Hierfür wird zunächst das Testobjekt mit der roten LED und dem Hebel an der Testelementschiene fokussiert. Dann sollen die drei horizontalen Balken des Elementes 3/4 ausfindig gemacht werden. Sobald dies erreicht ist, wird die LED ausgeschaltet und der Laser in den Strahlengang eingebracht.

Nun soll immer jeweils ein Bild des Objektes mit einem Bild der dazugehörigen Beugung aufgenommen werden. Um vom Objektbild zum Bild der Ordnungen zu gelangen, kommt die Hilfsblende L3 ins Spiel. Durch ein- bzw. ausklappen dieser in den Strahlengang kann zwischen dem Ordnungsbild und dem dazugehörigen Testobjektbild gewechselt werden. Mit Hilfe der adjustierbaren Irisblende kann weiters durch zudrehen der Öffnung eine Beugungsordnung reduziert werden. Wichtig ist hierbei, dass die geraden Beugungsordnungen nicht angezeigt werden. Somit sind nur die ungeraden Ordnungen zu sehen (0., 1., 3., 5., ...). In diesem Sinne folgen nun die aufgenommenen Messergebnisse:

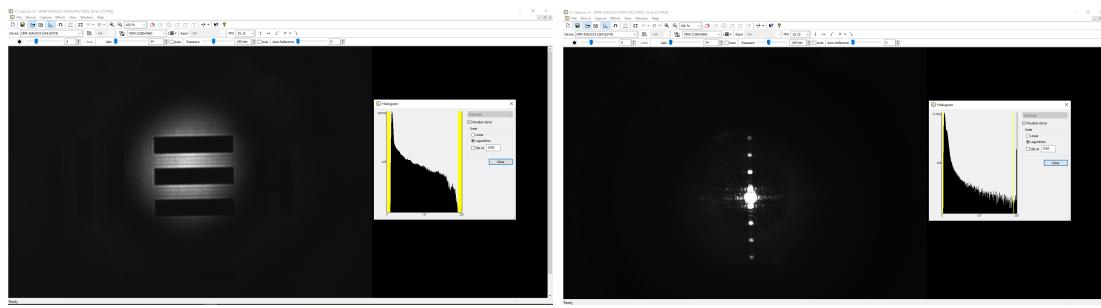


Abb. 10: Testobjekt mit 7 dazugehörigen Beugungsordnungen

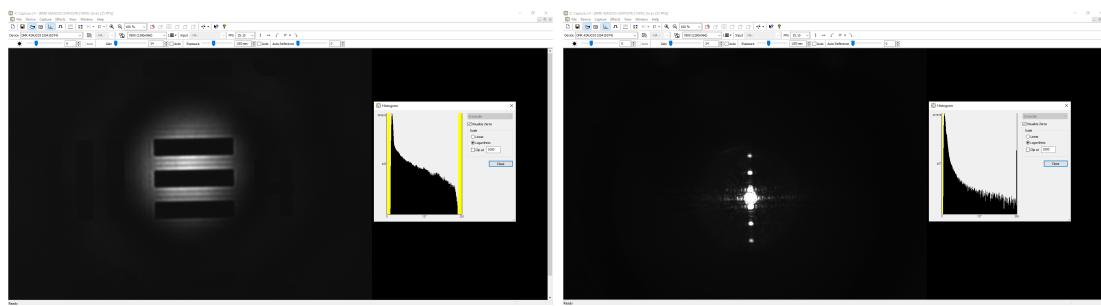


Abb. 11: Testobjekt mit 5 dazugehörigen Beugungsordnungen

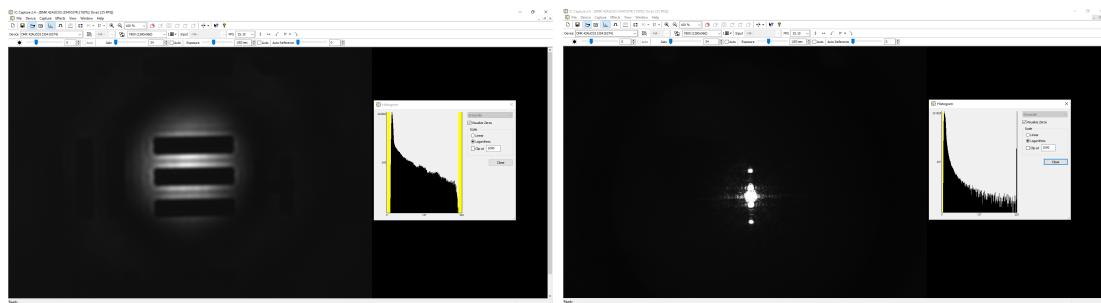


Abb. 12: Testobjekt mit 3 dazugehörigen Beugungsordnungen

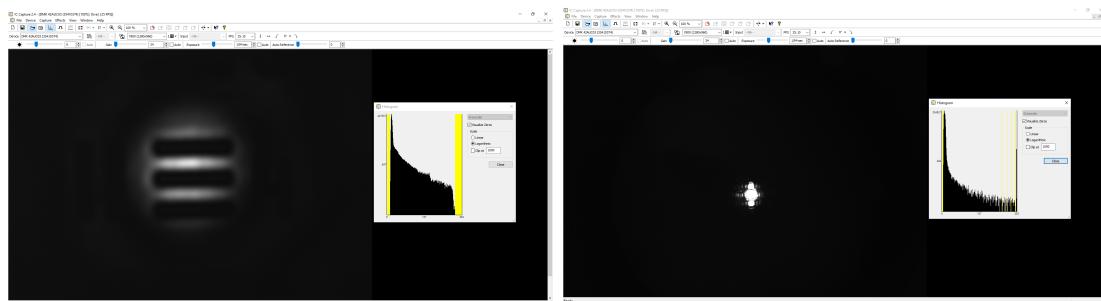


Abb. 13: Testobjekt mit 1 dazugehörigen Beugungsordnungen

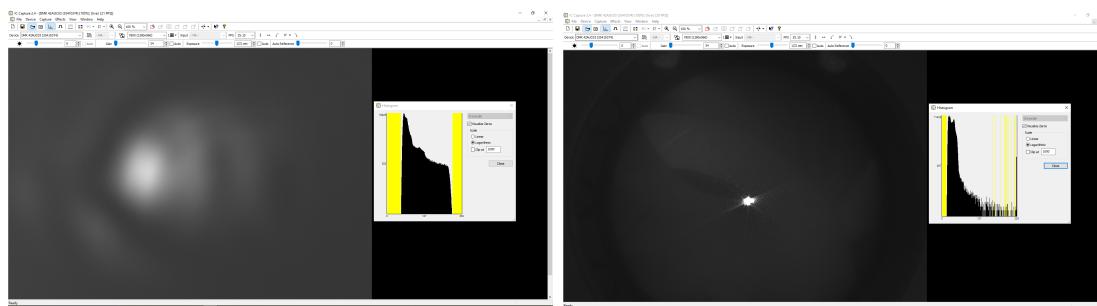


Abb. 14: Testobjekt mit 0 dazugehörigen Beugungsordnungen

Bei der 0. und 1. Ordnung lässt sich eine Sättigung des Beugungsbildes nicht wirklich vermeiden, jedoch wurde die Belichtungszeit für ein bestmögliches Ergebniss angepasst.

5.4 Freies Experimentieren

Zu guter Letzt sind der Kreativität keine Grenzen gesetzt. Jedoch gibt es auch beim freien Experimentieren eine kleine Aufgabenstellung.

Zunächst sollte sich das Beugungsbild für die vertikal Objektbalken angesehen werden:

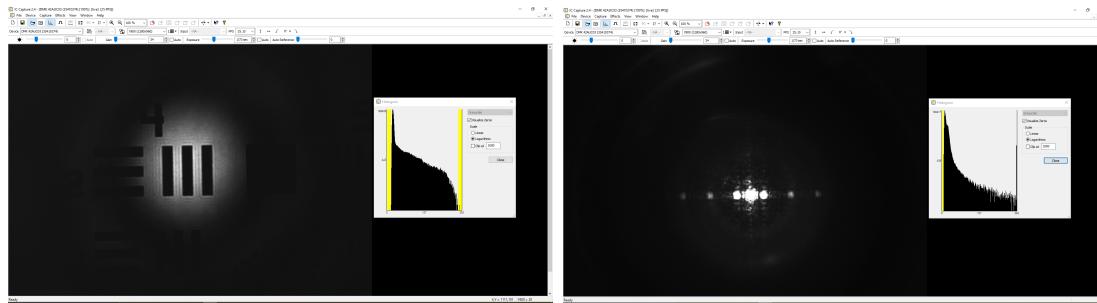


Abb. 15: Testobjekt vertikal 3 Beugungsordnungen

Weiters soll nun die nullte Ordnung mit der Drahtblende des Filterrads B ausgeblendet und das Ergebniss visuell dargestellt werden.

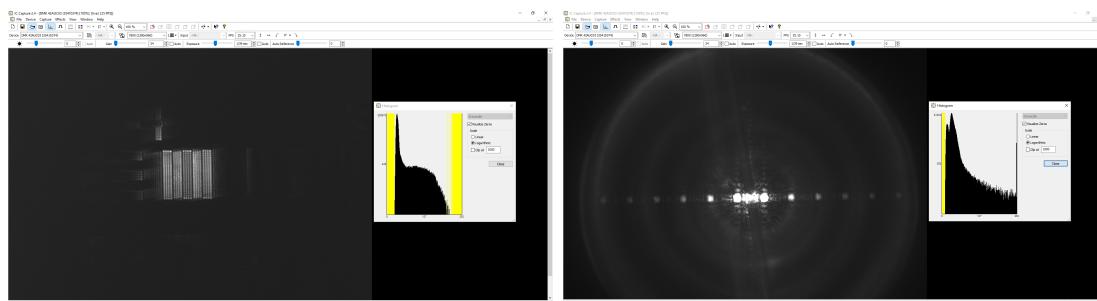


Abb. 16: Testobjekt und Beugungsordnungen ohne Ordnung 0

6 Auswertung und Unsicherheitsanalyse

In der Auswertung werden zur erhöhten Genauigkeit durchgehend ungerundete Werte bis zu den Endergebnissen verwendet und nur zur Darstellung gerundet.

Zur Berechnung der Unsicherheiten wird, wenn nicht anders angegeben, die Größtunsicherheitsmethode verwendet.

6.1 Quantitative Bestimmung des Auflösungsvermögens

Um das Auflösungsvermögen zu bestimmen, werden zunächst die gewonnenen Daten aus den Tabellen 4 und 5 mit Hilfe der Tabelle 3 für die räumlichen Frequenzen ausgewertet. Die Unsicherheit setzt sich dabei aus der Mittelwertsformel 4 der Abweichung zwischen dem Wert der räumlichen Frequenz und der Unsicherheitselemente zusammen.

Tab. 6: Umrechnen in die räumliche Frequenz für rotes Licht

Nr.	Blende / mm	Räumliche Frequenz / $\frac{1}{mm}$	Unsicherheitselemente / $\frac{1}{mm}$		Unsicherheit $\Delta f_R / \frac{1}{mm}$
1	2	45.3	40.3	50.8	5.25
2	3	64.0	57.0	71.8	7.40
3	6	102.0	90.5	114.0	11.75

Tab. 7: Umrechnen in die räumliche Frequenz für blaues Licht

Nr.	Blende / mm	Räumliche Frequenz / $\frac{1}{mm}$	Unsicherheitselement / $\frac{1}{mm}$		Unsicherheit $\Delta f_R / \frac{1}{mm}$
1	2	50.8	45.3	57.0	5.85
2	3	80.6	71.8	90.5	9.35
3	6	128.0	114.0	144.0	15.00

Weiters wird dann mittels Formel 8 das Auflösungsvermögen und mittels Formel 5 die numerische Apertur berechnet.

Tab. 8: Berechnete numerische Apertur

Nr.	Blende / mm	NA / 1
1	2	0.0167 ± 0.0003
2	3	0.0250 ± 0.0005
3	6	0.0500 ± 0.0008

Tab. 9: Berechnetes Auflösungsvermögen rotes Licht

Nr.	Blende / mm	$d_{exp} / \mu m$
1	2	0.022 ± 0.003
2	3	0.0156 ± 0.0019
3	6	0.0098 ± 0.0012

Tab. 10: Berechnetes Auflösungsvermögen blaues Licht

Nr.	Blende / mm	$d_{exp} / \mu m$
1	2	0.020 ± 0.003
2	3	0.0124 ± 0.0019
3	6	0.0078 ± 0.0012

Nachdem diese Werte festgehalten sind, kann nun mittels Formel 6, eingebunden in qti-Plot, der theoretische Verlauf des Auflösungsvermögens dargestellt und mit den experimentell resultierten Werten verglichen. Als Unsicherheit für die Wellenlänge λ wurden für rotes und blaues Licht $\pm 10 \mu\text{m}$ eingesetzt.

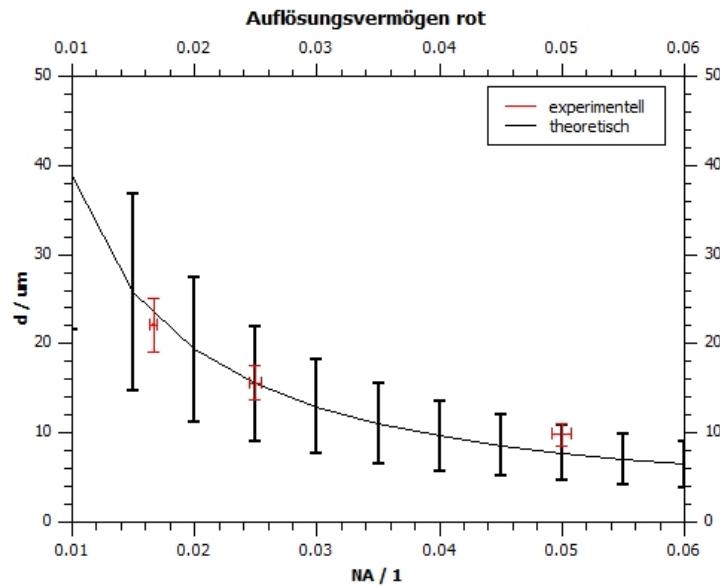


Abb. 17: Theoretisches und experimentelles Auflösungsvermögen auf NA rotes Licht

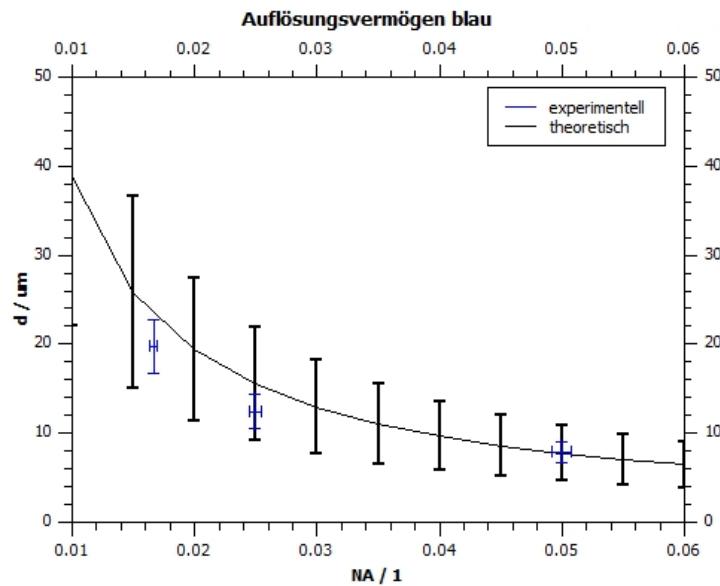


Abb. 18: Theoretisches und experimentelles Auflösungsvermögen auf NA blaues Licht

6.2 Zusammenhang Auflösung Spaltgitterbildes und Anzahl Beugungsordnungen

Der Zusammenhang zwischen Auflösungsvermögen und der Anzahl der Beugungsordnungen lässt sich in Abbildungen 10 - 14 eindeutig erkennen. Eine genügende Verkleinerung

des Blendendurchmessers bewirkt eine reduzierung der Beugungsordnung, was mit Hilfe der Hilfslinse L3 in den eben genannten Abbildungen visualisiert werden konnte.

6.3 Freies experimentieren

Beim freien experimentieren sollte nun eine Verbindung zur Fourieroptik gezeigt werden. Dafür wurden die Bilder 10 bis 12 mittels Software ImageJ näher unter die Lupe genommen. Die Intensität der hellen Bereiche zwischen zwei Balken eines Elementes wurden geplotted, was in den folgenden Abbildungen zu sehen ist.

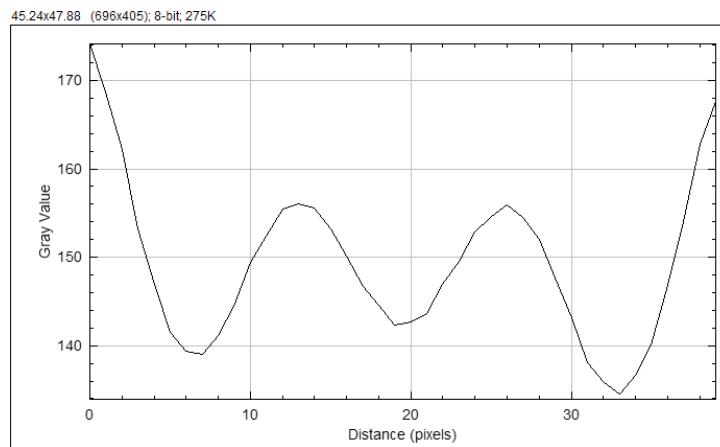


Abb. 19: Intensitätsplot des 7. Ordnungsbildes

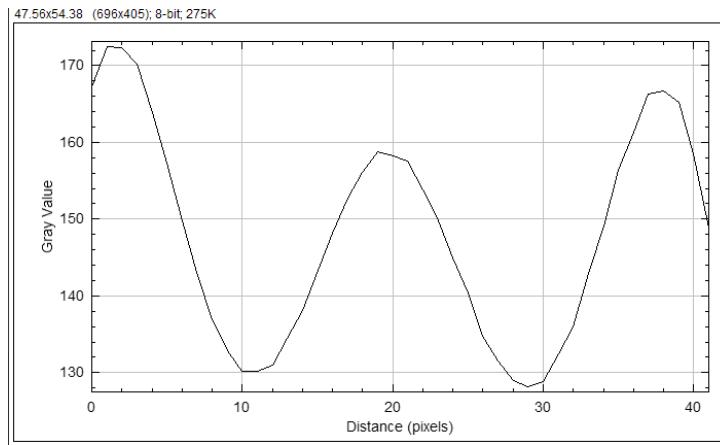


Abb. 20: Intensitätsplot des 5. Ordnungsbildes

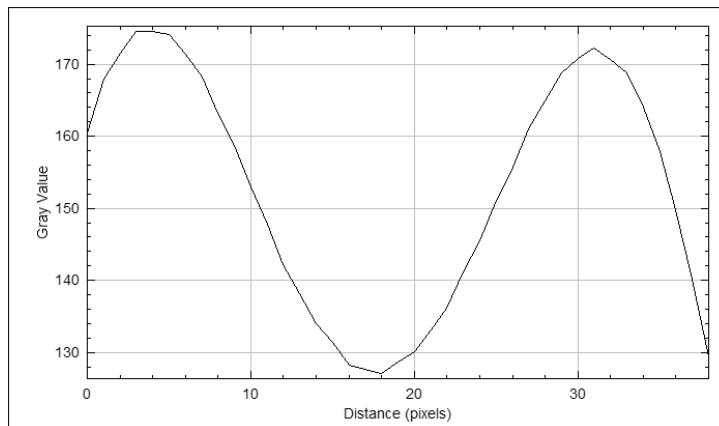


Abb. 21: Intensitätsplot des 3. Ordnungsbildes

Mittels Fouriertransformation der Beugungsverteilung ist das Bild eines Objektes gegeben. Sobald räumliche Strukturen in der Beugungsverteilung fehlen, gibt es dort keine Fouriergrößen im Bild (Verwaschene Konturen). Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Strukturen durch die Blende abgeschnitten werden. Schließt man also die Blende, sollte der Bereich zwischen zwei Blöcken eines Elementes immer verwaschener werden, was sich gut in den Abbildungen 10 - 14 erkennen lässt. Auch die Intensitätsplots weisen in diesen Bereichen weniger Schwankungen auf. [1]

7 Diskussion

7.1 Vertrautmachen mit dem Versuch

Da durch das schließen der Blende die numerische Apertur laut Formel 5 größer wird, wird das Auflösungsvermögen laut Formel 1 kleiner. Somit werden Elemente, die vorher noch gut erkennbar waren, plötzlich unscharf.

7.2 Quantitative Bestimmung des Auflösungsvermögens

Die experimentell ermittelten Werte überlagern sich laut Abbildungen 17 und 18 mit dem theoretischen Verlauf des Auflösungsvermögens, was für eine richtige Versuchsdurchführung und Auswertung spricht.

7.3 Zusammenhang Auflösung Spaltgitterbildes und Anzahl Beugungsordnungen

Die Beugungsordnung verändert sich wie zu erwarten mit dem Linsenöffnungsmaß, was in den ermittelten Abbildungen 10 - 14 deutlich zu sehen ist.

7.4 Freies Experimentieren

Betrachtet man das Ordnungsbild der vertikalen Balken, so lässt sich erkennen, dass die Ordnungen nun um 90° gedreht sind und nun eine horizontale Linie bilden.

Mit einer Abstandserhöhung der Balken der Elemente verändern sich die Zahl und Positionen der Intensitätsmaxima.

In den Abbildungen 10 - 14 lassen sich außerdem Beugungerscheinungen normal zu den Maxima erkennen. Ein Grund dafür könnten Interferenzen verschieden gebeugter Lichtwellen sein, die so gebeugt werden, dass sie ein horizontales Erscheinungsbild erzeugen. Wird die nullte Ordnung abgedeckt, so verschwindet das Testelementbild und es lassen sich keine schönen Balken mehr erkennen. Außerdem ist nicht zu übersehen, dass die Farben nun invertiert, also schwarz wird zu weiß und umgekehrt, sind. Dies lässt sich auf das Prinzip der Dunkelfeldmikroskopie zurückführen, bei der die Lichtstrahlen, die normalerweise durch eine Probe gehen, blockiert werden und nur schräg einfallende Strahlen den Sensor erreichen. [3]

8 Zusammenfassung

8.1 Quantitative Bestimmung des Auflösungsvermögens

Tab. 11: Berechnete numerische Apertur

Nr.	Blende / mm	NA / 1	$\Delta NA / 1$
1	2	0.0167	0.0003
2	3	0.0250	0.0005
3	6	0.0500	0.0008

Tab. 12: Berechnetes Auflösungsvermögen rotes Licht

Nr.	Blende / mm	$d_{exp} / \mu m$	$\Delta d_{exp} / \mu m$
1	2	0.022	0.003
2	3	0.0156	0.0019
3	6	0.0098	0.0012

Tab. 13: Berechnetes Auflösungsvermögen blaues Licht

Nr.	Blende / mm	$d_{exp} / \mu m$	$\Delta d_{exp} / \mu m$
1	2	0.020	0.003
2	3	0.0124	0.0019
3	6	0.0078	0.0012

8.2 Zusammenhang Auflösung Spaltgitterbildes und Anzahl Beugungsordnungen

Der Zusammenhang zwischen Auflösungsvermögen und der Anzahl der Beugungsordnungen lässt sich in Abbildungen 10 - 14 eindeutig erkennen.

9 Anhang

In diesem Abteil werden die Unsicherheitsrechnungen zur eventuellen Fehlersuche abgebildet. Für Unsicherheiten von Größeren Tabellen wird jeweils die Rechnung des ersten Wertes als Beispiel für die restlichen Größen gezeigt.

Unsicherheiten

1.) ΔN_A $\Delta f_1 = 1 \text{ nm}$

$$\Delta N_A = \frac{\partial N_A}{\partial f_1} \cdot \Delta f_1 = \left(\frac{\partial N_A}{\partial f_1} \right) \cdot \Delta f_1$$

$$\Delta N_A(2) = 0,000275 = 0,0003$$

$$\Delta N_A(3) = 0,000477 = 0,0005$$

$$\Delta N_A(6) = 0,000833 = 0,0008$$

2.) Δd_{exp}

$$\Delta d_{exp} = \left| \frac{\partial d}{\partial f_1} \right| \cdot \Delta f_1$$

tab:
 $d(2) = 0,002558 = 0,003$
 $d(3) = 0,001807 = 0,0019$
 $d(6) = 0,001129 = 0,0012$

klm:
 $d(2) = 0,002267 = 0,003$
 $d(5) = 0,001439 = 0,0015$
 $d(6) = 0,000916 = 0,0009$

3.) $\Delta d_{th} = 0,61 \cdot \left[\left| \frac{\partial d}{\partial f_1} \right| \cdot \Delta f_1 + \left| \frac{\partial d}{\partial N_A} \right| \cdot \Delta N_A \right] \rightarrow \text{eingeklammert in qk-Plot}$

Abb. 22: Unsicherheitsrechnungen

Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik*. 6. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 978-3-642-29944-5. DOI: [10.1007/978-3-642-29944-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29944-5).
- [2] leifi physik. *Vielfachspalt und Gitter*. (besucht am 01.12.2023). URL: <https://www.leifiphysik.de/optik/beugung-und-interferenz/grundwissen/vielfachspalt-und-gitter>.

- [3] olympus life science. *Was ist Dunkelfeldmikroskopie?* (besucht am 01.12.2023). URL: <https://www.olympus-lifescience.com/de/discovery/what-is-darkfield-microscopy/#:~:text=W%C3%A4rend%20eine%20lichtundurchl%C3%A4ssige%20Blende%20im,vor%20einem%20dunklen%20Hintergrund%20erzeugt..>
- [4] TU Graz TeachCenter. *"Laborübungen 2: Elektrizität, Magnetismus, Optik". Kurs: PHYD30UF.* (besucht am 01.12.2023). URL: <https://tc.tugraz.at/main/course/view.php?id=796>.