

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK

Übungsnummer: PHYC03UF

Übungstitel: Abbe-Theorie

Betreuer: Nuster Robert

Gruppennummer: 1

Name: PHILIPP Maximilian

Name: STARK Matthias

Mat. Nr.: 11839611

Mat. Nr.: 12004907

Datum der Übung: 08 Oktober

WS 2021/2022

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen und Grundlagen	3
3	Versuchsanordnung	8
4	Geräteliste	10
5	Versuchsdurchführung & Messergebnisse	11
5.1	Zusammenhang zwischen der Auflösung und der Anzahl der Bergungsordnungen	11
5.2	Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der N.A.	14
5.3	Zusatz - Dunkelfeldmikroskopie	15
6	Auswertung	16
6.1	Zusammenhang zwischen der Auflösung und der Anzahl der Bergungsordnungen	16
6.2	Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der N.A.	17
7	Diskussion	19
7.1	Zusammenhang zwischen der Auflösung und der Anzahl der Bergungsordnungen	19
7.2	Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der N.A.	19
8	Zusammenfassung	19
9	Anhang	20

1 Aufgabenstellung

Zunächst soll der Zusammenhang zwischen der Auflösung des Bildes eines Spaltgitters und der Anzahl der transmittierten Beugungsordnungen untersucht werden.

Weiters soll auch das Auflösungsvermögen einer Linse in Abhängigkeit ihrer numerischen Apertur (N.A.) für zwei unterschiedliche Wellenlängen bestimmt werden. [3]

2 Voraussetzungen und Grundlagen

Wenn Überlagerungsprozesse von Wellen abgebildet werden, ist es oftmals relevant, was die Grenzen des Auflösungsvermögens dieser Prozesse sind. Diese Überlegungen finden Anwendungen bei Mikroskopie, Ultrasonographie und vielen weiteren Gebieten [1]. Dieses Experiment beschäftigt sich mit dem Auflösungsvermögen verschiedener Wellenlängen bei der Lichtmikroskopie.

Die Abbe'sche Abbildungstheorie liefert eine Erklärung für diese Frage. Abbe stellte fest, dass das Auflösungsvermögen d nur von dem Öffnungswinkel abhängig ist. Weiters sei das Auflösungsvermögen invers-proportional zum Sinus vom Halben Öffnungswinkel α also:

$$d \propto \frac{1}{\sin(\alpha)} \quad (1)$$

Zudem postulierte Abbe, dass, wenn das erste Nebenmaximum nicht mehr vom Objektiv aufgefangen werden kann, das Objekt nicht mehr aufgelöst werden kann.[2]

Die Abbe-Theorie beruht auf dem Prinzip, dass jedes Objekt Beugungseffekt hervorruft und die Information des Bildes auf die Beugungsmaxima aufgeteilt wird, dies wird für eine Gitterlinie in Abbildung 1 veranschaulicht.[2]

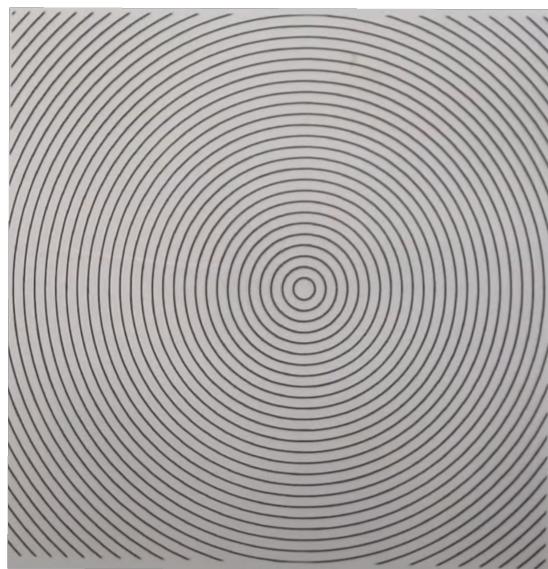


Abbildung 1: Veranschaulichung von Beugungseffekten bei einem einzelnen Gitterstrich [6]

Sind nun mehrere Objekte, die Beugungseffekte hervorrufen, vorhanden, überlagern sich dessen Wellen und erzeugen je nach Abstand der Objekte unterschiedliche überlagerte Wellenfunktionen.

Im Folgenden sind verschiedene überlagerte Wellen, bei verschiedenen Abständen der Objekte, dargestellt.

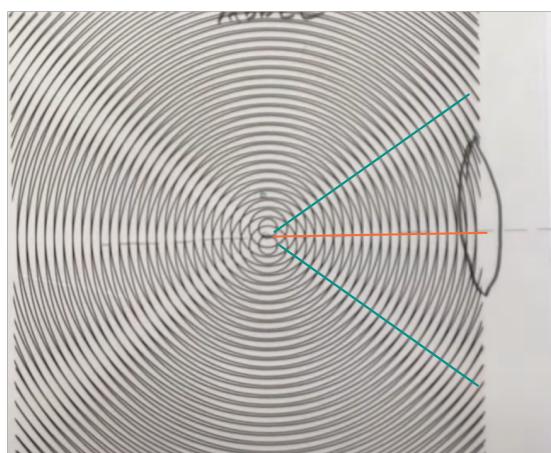


Abbildung 2: Abbildung der Linse bei der nur die nullte Beugungsordnung vom Objektiv erfasst wird [6]

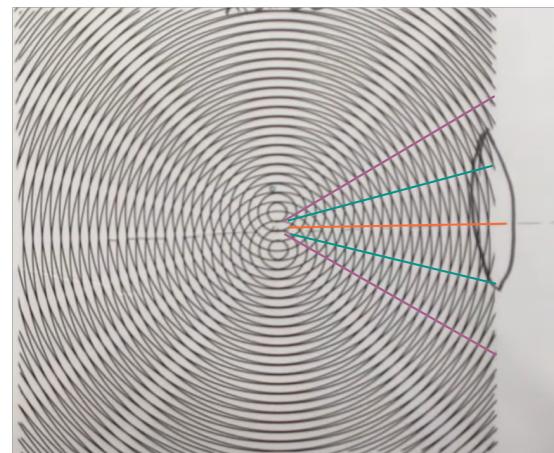


Abbildung 3: Abbildung der Linse bei der die nullte und erste Beugungsordnung vom Objektiv erfasst werden [6]

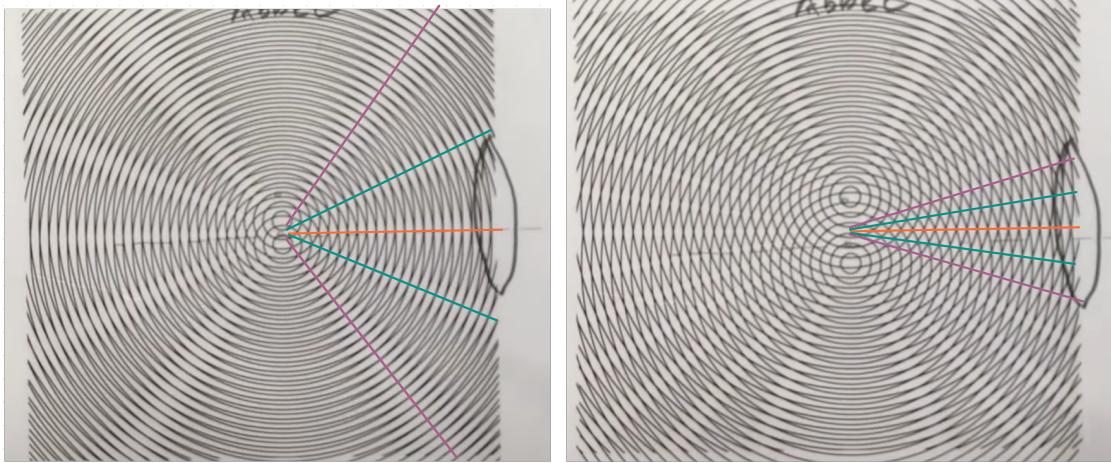


Abbildung 4: Abbildung der Linse beim Grenzfall, sodass die erste Beugungsordnung gerade nicht vom Objektiv erfasst wird [6]

Abbildung 5: Abbildung der Linse bei der die Beugungsordnungen bis zur dritten Ordnung vom Objektiv erfasst werden [6]

Bei einem Mikroskop ruft das Objekt, welches untersucht wird, Beugungseffekte, genau wie der Strich zuvor, hervor. Der Einfachheit halber wird die Funktionsweise eines Mikroskops anhand eines Gitters erklärt. Die Abbildung 4 stellt den Grenzfall der Auflösung dar, anhand dem das Auflösungsvermögen d errechnet werden kann.

$$d \sin(\alpha) = k \frac{\lambda}{n} \quad k \in \mathbb{N} \quad (2)$$

$$d = \frac{\lambda}{n \sin(\alpha)} \quad (3)$$

(4)

Weil bei der Mikroskopie auf Grund von Beugung das Rayleigh Kriterium [7] verwendet wird, gelangt man durch einsetzen von der Definition von dem Durchmesser der Numerischen Apertur $d = 2 \text{ N.A.}$ auf folgende Gleichung 5:

$$d \approx \theta = 1.22 \frac{\lambda}{2 \text{ N.A.}} \quad (5)$$

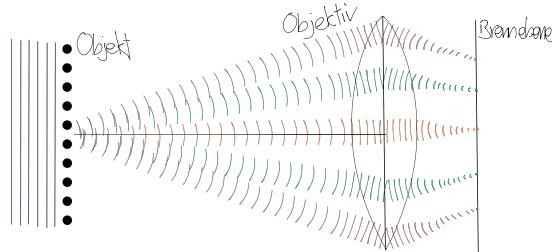


Abbildung 6: Skizze für die Anzahl der Ordnungen, die noch erfasst und auf den Brennpunkt abgebildet werden

Wie in Abbildung 7 und Abbildung 8 ersichtlich lässt sich die Numerische Apertur mittels der Winkelfunktionsnäherungen wie folgt bestimmen:

$$\text{N.A.} = \frac{r}{f} \quad (6)$$

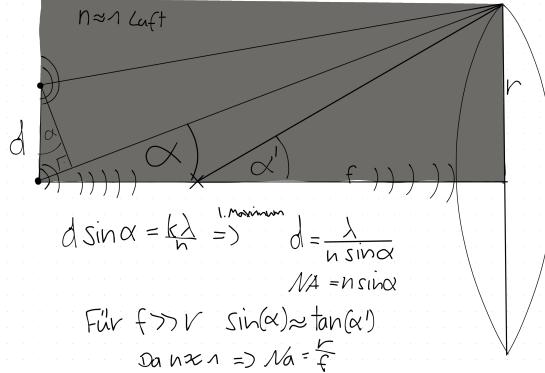


Abbildung 7: Abbildungsskizze

mit Blende in der Beugungsebene: $N.A. = n \sin \alpha_2$ mit $n \approx 1$ und $r \ll f$: $N.A. \approx r/f$

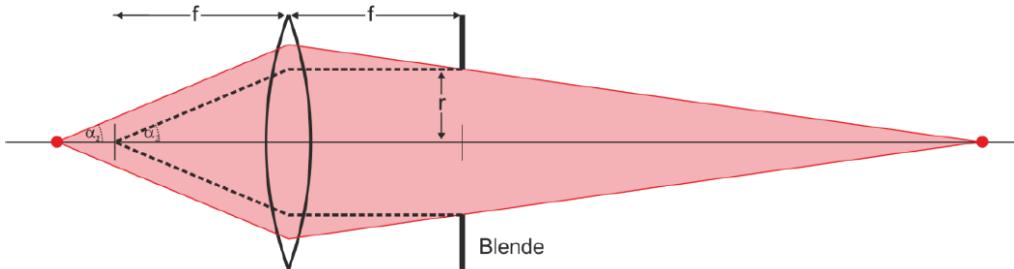


Abbildung 8: Skizze für die Näherung für die Berechnung der N.A. [3][2]

Um von der in der Tabelle gegebenen räumlichen Frequenz ξ auf den Abstand zwischen zwei Gitterstrichen zu kommen verwendet man folgende Gleichung 7:

$$d = \frac{1}{\xi} \quad (7)$$

Folgende Gleichung 8 für Intensitätsverteilung in Abhängigkeit von λ der Wellenlänge, b der Spaltbreite, g dem Spaltabstand, N der Anzahl an Spalten und dem Beugungswinkel ϕ wurde aus dem Demtröder entnommen [2]:

$$I(\phi) = I_0 \left(\frac{\sin(\pi \frac{b}{\lambda} \sin(\phi))}{\pi \frac{b}{\lambda} \sin(\phi)} \frac{\sin(N \pi \frac{g}{\lambda} \sin(\phi))}{\sin(\pi \frac{g}{\lambda} \sin(\phi))} \right)^2 \quad (8)$$

Wird die Spaltbreite b gleich dem halben Spaltabstand g gesetzt $b = \frac{g}{2}$ und Gleichung 8 über den Beugungswinkel ϕ aufgetragen und auf I_0 normiert erhält man folgende Abbildung 9:

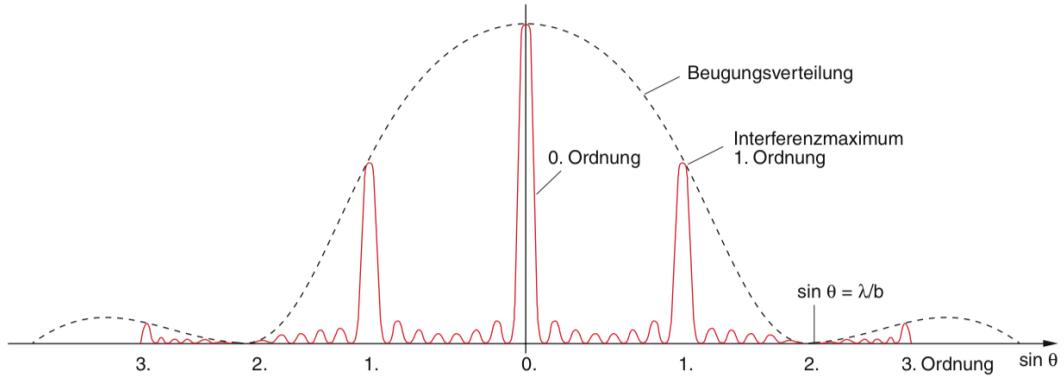


Abbildung 9: Intensitätsverlauf des Beugungsbilds mit Spaltbreite entspricht dem halben Spaltabstand [2]

Dabei wird ersichtlich, dass die Beugungsmaxima der geraden Ordnungen auf Grund von destruktiver Interferenz verschwinden.

Um zu sehen wie sich die Unsicherheit der Messungen bis in die Ergebnisse fortplanzt, ist Gleichung 9 verwendet worden. Die Grundlagen dieser Gleichung stammen von den Powerpointfolien von GUM.[8] Die Verallgemeinerung ist von Wikipedia entnommen worden [5]. Für die Auswertung ist die Programmiersprache Python im speziellen das Packet `scipy`, zur Hilfe genommen worden.

$$V_y = J(x) \cdot V_x \cdot J^T(x) \quad (9)$$

Wobei V_y und V_x die Kovarianzmatrizen von den Vektoren \mathbf{y} und \mathbf{x} sind. \mathbf{x} ist der Vektor der Eingangsvariablen und \mathbf{y} ist der Vektor der Ausgangsvariablen. J ist die Jakobimatrix der vektorwertigen Funktion $\mathbf{y} = \vec{F}(\mathbf{x})$. So lassen sich die Komponenten der Matrix relativ einfach anschreiben $J_{ij}(x) = \frac{\partial y_i}{\partial x_j}(x)$. Damit man die Unsicherheit der einzelnen Variablen y_i bekommt, muss nur die Quadratwurzel des i-ten Diagonalelementes der \mathbf{y} -Kovarianzmatrix genommen werden $u_i = \sqrt{\text{diag}(V_y)_i}$. Da in diesem Experiment meistens nur skalare Funktionen untersucht werden, vereinfacht sich die Gleichung 9 dramatisch und die Unsicherheit der Variable y lässt sich einfach so berechnen:

$$u_y = \sqrt{\text{grady}^T \cdot V_x \cdot \text{grady}} \quad (10)$$

3 Versuchsanordnung

Der schematische Aufbau des Versuchs ist in folgender Skizze ersichtlich:

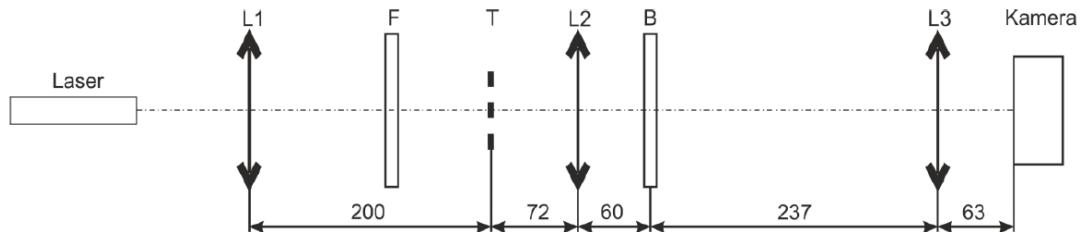


Abbildung 10: Skizze der Versuchsanordnung

Der Laserstrahl trifft, durch die Linse L1 gebündelt, auf das Testobjekt T, welches später noch genauer beschrieben wird. Am Filterrad F kann ausgewählt werden, ob der Laser durch die Apparatur scheint, oder einer der beiden LEDs verwendet wird. Bei der Abbildungslinse L2 handelt es sich um ein achromatisches Linsenpaar, um den Abbildungsfehler zu minimieren. Am Filterrad B kann mithilfe verschiedener Lochblenden die numerische Apertur (N.A.) variiert werden. Die letzte Linse L3 ist klappbar angeordnet, wodurch an der Kamera wahlweise entweder das Beugungsbild oder das Bild des Objekts aufgenommen werden kann.

Die Linse L3 ist dabei genau so angeordnet, dass der Auflösungsfehler der Kamera vernachlässigbar klein ist.

Die genaue Versuchsanordnung ist in Abbildung 11 ersichtlich.

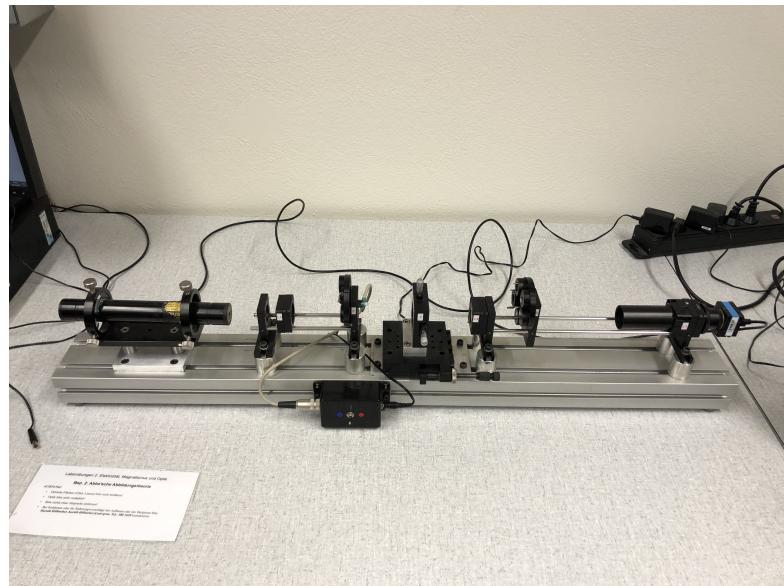


Abbildung 11: Versuchsanordnung

Das verwendete Testobjekt ist in Abbildung 12 ersichtlich.

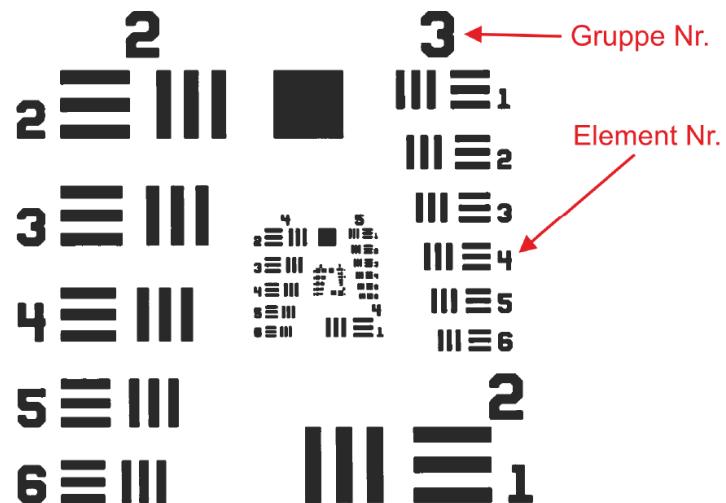


Abbildung 12: verwendetes Testobjekt [3]

Es handelt sich dabei um eine Anordnung aus horizontalen und vertikalen Balken, bei denen jeweils ihr Abstand und die Breite der Striche gleich gross sind. Mit der genauen Zuordnung der entsprechenden Gruppen und Element Nummer kann anhand folgender Tabelle in Abbildung 13 die Auflösung eines optischen Geräts bestimmt werden. Dabei wird für die Räumliche Frequenz der entsprechende Wert aus der Tabelle verwendet, der der entsprechenden Gruppen und Elementnummer entspricht.

Element Nr.	Gruppe 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

Abbildung 13: Tabelle mit den Räumlichen Frequenzen für die entsprechende Gruppen und Elementnummer [3]

4 Geräteliste

Für die Messungen wurden folgende Geräte verwendet:

Tabelle 1: Verwendete Geräte
 Δ ... Unsicherheit der Geräte

Gerät	Typ	Hersteller	Δ
Linse 1	$f = 200 \text{ mm}$		
Linse 2	$f = 60 \text{ mm}$		
Linse 3	$f = 50 \text{ mm}$		
Helium-Neon Laser	632.8 nm	Edmund Industrial Optics	
blaue LED	470 nm		5 nm
rote LED	635 nm		5 nm
Kamera	DMK 42AUC03	Imagingsource	
Testobjekt	1951 USAF Target		
Auswertungsprogramm	IC Capture	The Imaging Source, LLC	
Blende			
Gestell			

5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse

5.1 Zusammenhang zwischen der Auflösung und der Anzahl der Bergungsordnungen

Zunächst werden die Linse L3 aus der Apparatur entfernt und am Testobjekt T die vertikalen Balken der dritten Gruppe und des vierten Elements, mithilfe von 2 Mikrometerschrauben, zentriert ausgerichtet. Durch vorsichtiges Verschieben, mithilfe eines Schraubmechanismus, wird nun das Bild, der zuvor erwähnten 3 Balken, am Computer scharfgestellt. Hierfür wird das Licht der roten oder blauen LED Lampen verwendet. Ist dies geschehen, wird das Filterrad F wieder auf die Position gebracht, um das Laserlicht durch den Aufbau zu lassen.

Nun wird mithilfe der Computersoftware "IC Capture" die "Exposure" geändert, was der Belichtungszeit entspricht. Dabei ist zu beachten, dass am rechten Rand der angezeigten Grafik, die in Abbildung 14 sichtbar ist, ein gelber Balken angezeigt wird. Dies bestätigt, dass die Belichtungsparameter richtig eingestellt sind.

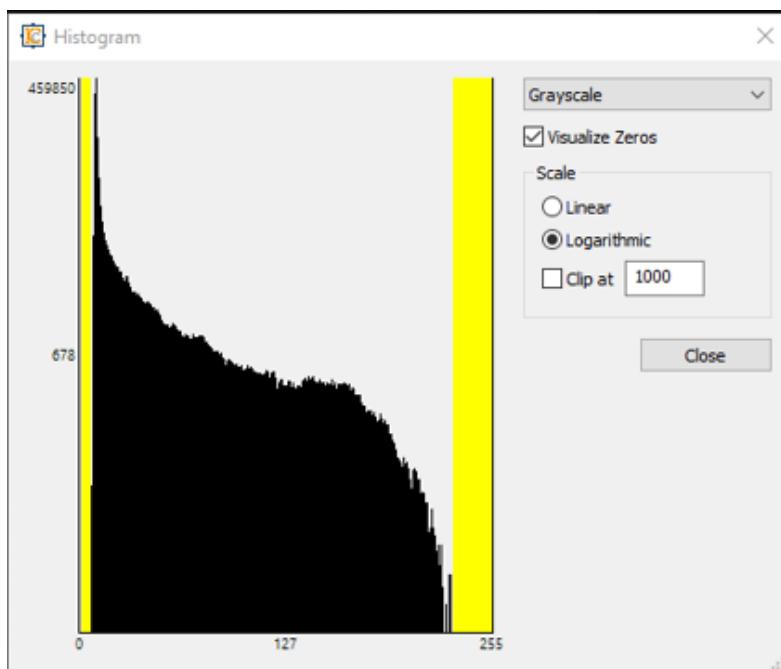
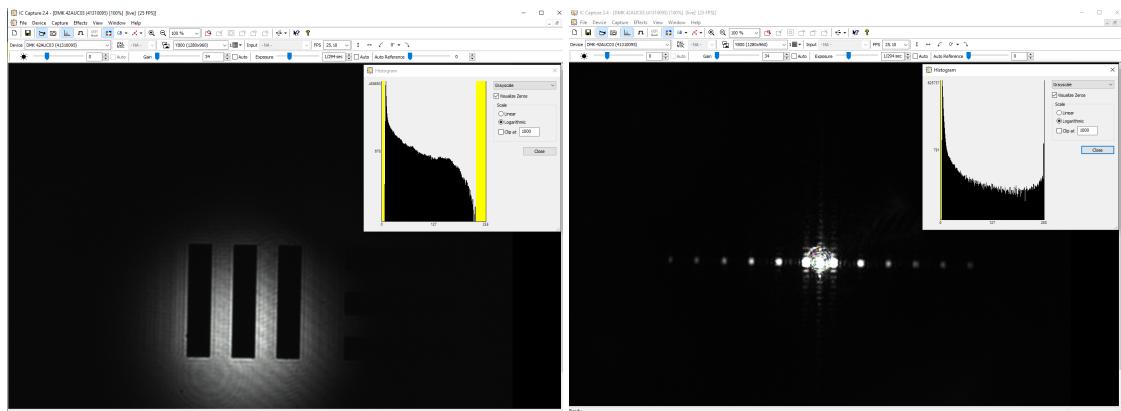


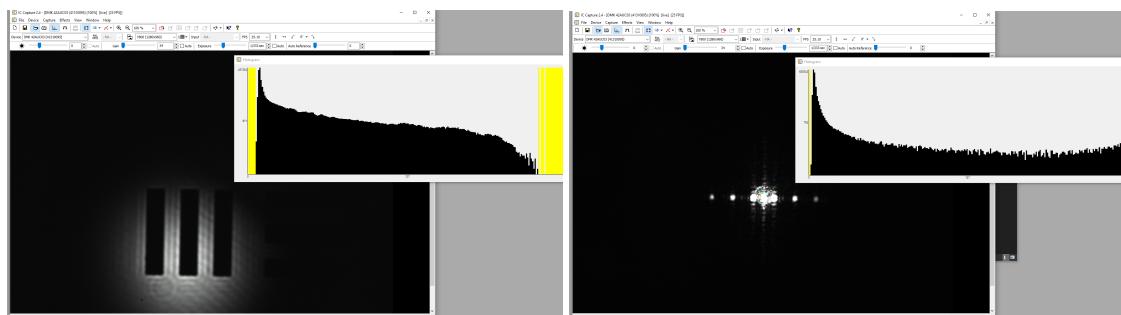
Abbildung 14: Grafik mit gelben Balken am Rand

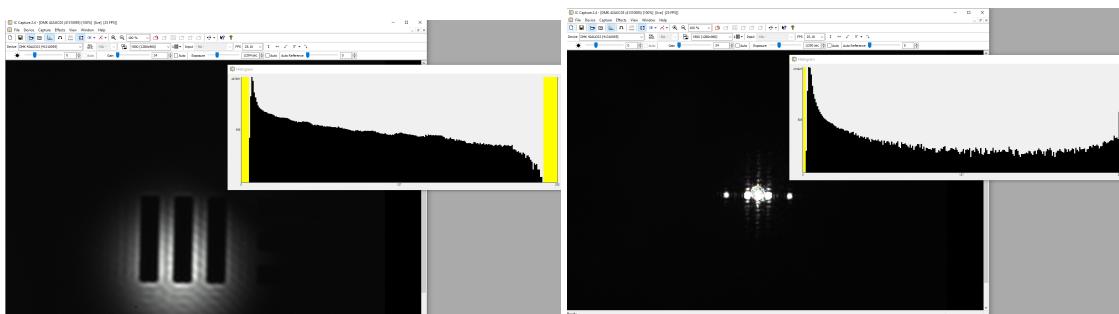
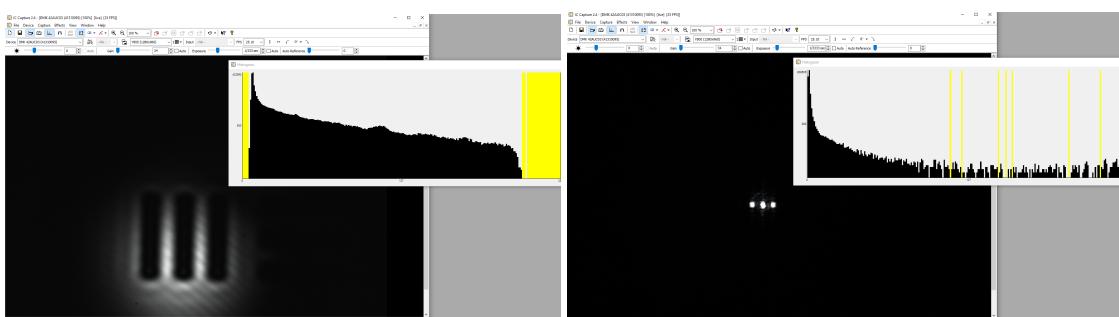
Wenn die Helligkeit richtig eingestellt ist, ist nun in der Software folgendes Bild aus Abbildung 15 sichtbar. Wird nun die Linse L3 wieder in die Apparatur gegeben, wird das entsprechende Beugungsmuster, welches in Abbildung 16 ersichtlich ist, sichtbar.

**Abbildung 15:** Bild vom Objekt**Abbildung 16:** Beugungsbild vom Objekt

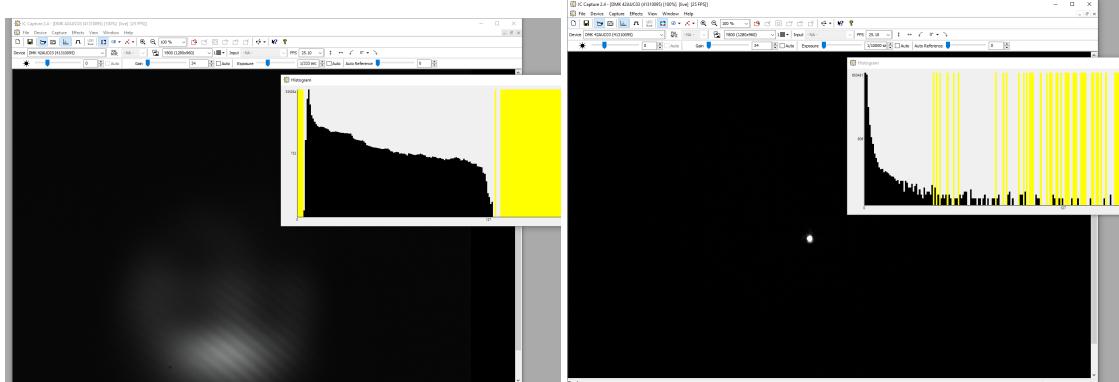
Nun wird die Blende B bei eingeschobener Linse L3 immer weiter verkleinert, sodass der Reihe nach immer weniger Bergungsmaxima sichtbar werden. Beginnend beim Beugungsbild von 5 Ordnungen werden nun der Reihe nach jeweils das Bild der Beugung und das sichtbare Bild fotografiert, was in folgenden Abbildung 17 bis Abbildung 22 sichtbar ist. Die Belichtungszeit muss dabei immer neu angepasst werden, weshalb auch immer die entsprechenden Einstellungen bei den Abbildungen zu sehen sind.

Weiters ist zu beachten, dass die geraden Beugungsordnungen nicht sichtbar sind, da diese aufgrund von destruktiver Interferenz verschwinden.

**Abbildung 17:** Bild vom Objekt bei 5 Beugungsordnungen**Abbildung 18:** Beugungsbild vom Objekt bei 5 Beugungsordnungen

**Abbildung 19:** Bild vom Objekt bei 3 Beugungsordnungen**Abbildung 20:** Beugungsbild vom Objekt bei 3 Beugungsordnungen**Abbildung 21:** Bild vom Objekt bei 1 Beugungsordnung**Abbildung 22:** Beugungsbild vom Objekt bei 1 Beugungsordnung

SchlieSSlich wird die Blende noch so sehr verkleinert, dass nur noch die nullte Beugungsordnung sichtbar ist, wie in Abbildung 23 und Abbildung 24 sichtbar.

**Abbildung 23:** Bild vom Objekt bei 0 Beugungsordnungen**Abbildung 24:** Beugungsbild vom Objekt bei 0 Beugungsordnungen

5.2 Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der N.A.

Im zweiten Teil des Experiments werden nun die LED Lampen als Lichtquellen verwendet.

Durch die Mikrometerschrauben, welche an T angebracht sind, kann das Testobjekt bewegt und durch den Schraubmechanismus, wie bereits zuvor beschrieben, das aufgezeichnete Bild scharfgestellt werden. Nun muss festgestellt werden, welche 3 Balken gerade noch als getrennt festgestellt werden können, und deren Gruppen und Elementnummer notiert werden, um die entsprechende räumliche Frequenz, anhand der Tabelle in Abbildung 13 festzustellen.

Die Blende B wird im Laufe des Versuchs immer weiter verkleinert. Zunächst beträgt der Blendendurchmesser 6 mm.

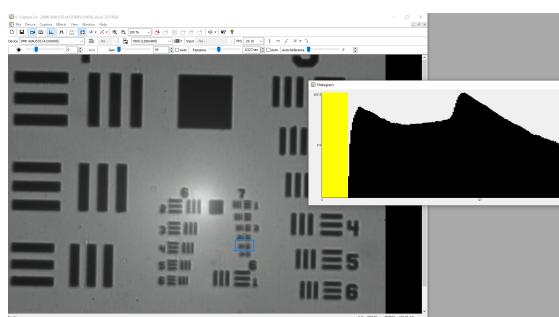


Abbildung 25: Testobjekt bei blauer LED mit Blendendurchmesser von 6 mm

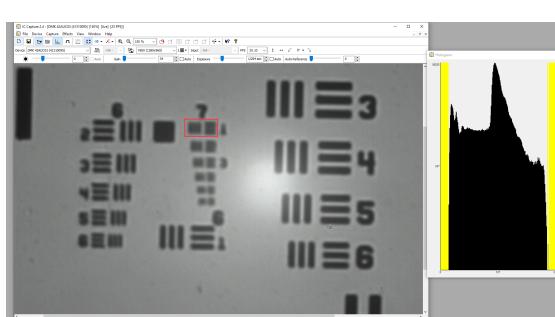


Abbildung 26: Testobjekt bei roter LED mit Blendendurchmesser von 6 mm

Nun wird der Blendendurchmesser auf 3 mm reduziert.

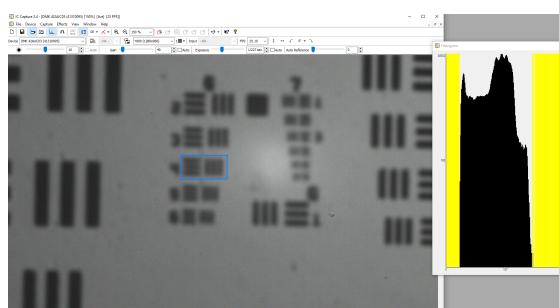


Abbildung 27: Testobjekt bei blauer LED mit Blendendurchmesser von 3 mm

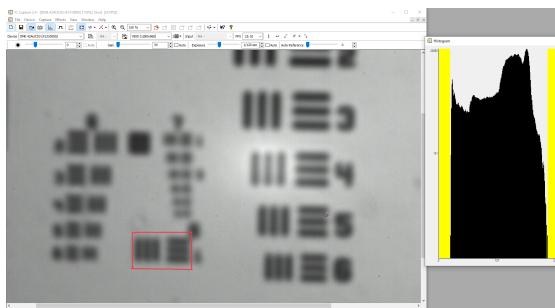


Abbildung 28: Testobjekt bei roter LED mit Blendendurchmesser von 3 mm

SchlieSSlich wird der gesamte Versuch auch noch mit einem Blendendurchmesser von 2 mm wiederholt.

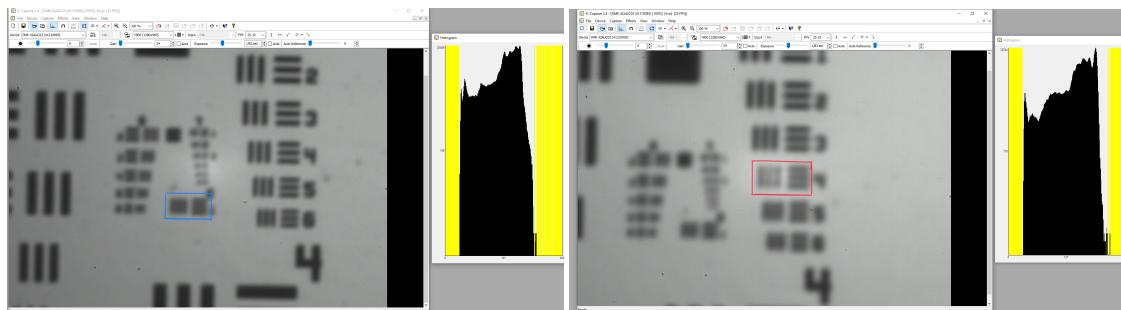


Abbildung 29: Testobjekt bei blauer LED mit Blendendurchmesser von 2 mm

Abbildung 30: Testobjekt bei roter LED mit Blendendurchmesser von 2 mm

Zunächst werden für die gerade noch unterscheidbaren Balken die entsprechenden räumlichen Frequenzen anhand der Tabelle in Abbildung 13 bestimmt. Zur besseren Übersicht wurden die entsprechenden Balken in den Abbildungen der Testobjekte schon markiert. Die erhaltenen Werte sind in folgender Tabelle aufgelistet. Als Unsicherheit wurde dabei die gröSSere Differenz zum benachbarten Wert angenommen.

Tabelle 2: erhaltene Werte für die räumliche Frequenz

||| ... Striche
 ξ ... räumliche Frequenz
 r ... Blendenradius
 λ ... Wellenlänge

$\xi / \frac{\text{ }}{\text{mm}}$	r / mm	λ / nm
200 ± 30	$3,00 \pm 0,05$	470 ± 5
91 ± 12	$1,50 \pm 0,05$	470 ± 5
60 ± 8	$1,00 \pm 0,05$	470 ± 5
128 ± 16	$3,00 \pm 0,05$	635 ± 5
64 ± 8	$1,50 \pm 0,05$	635 ± 5
45 ± 6	$1,00 \pm 0,05$	635 ± 5

5.3 Zusatz - Dunkelfeldmikroskopie

Dunkelfeldmikroskopie ist eine Variante der Lichtmikroskopie, bei der ein dunkler Hintergrund mit hellen Konturen entsteht. Diese Art der Mikroskopie, ist besonders bei lebenden, sich bewegenden, Präparaten vorteilhaft, weil so auch bei geringen Kontrast und ohne Einfärbungen Strukturen sichtbar werden.

Um das Phänomen der Dunkelfeldmikroskopie zu erreichen, muss dafür gesorgt werden, dass kein direktes Licht in das Objektiv gelangt und nur das abgelenkte Licht verwendet wird. [4]

Um nun Dunkelfeldmikroskopie betreiben zu können, muss das direkte Licht ausgeblendet werden. Dies wird mithilfe eines Drahts erreicht, der so in den Lichtweg gedreht wird, dass die nullte Beugungsordnung verschwindet, wie in Abbildung 31 sichtbar.

Durch entfernen der Linse L3 wird wiederum das Bild sichtbar, das in Abbildung 32 abgebildet ist.

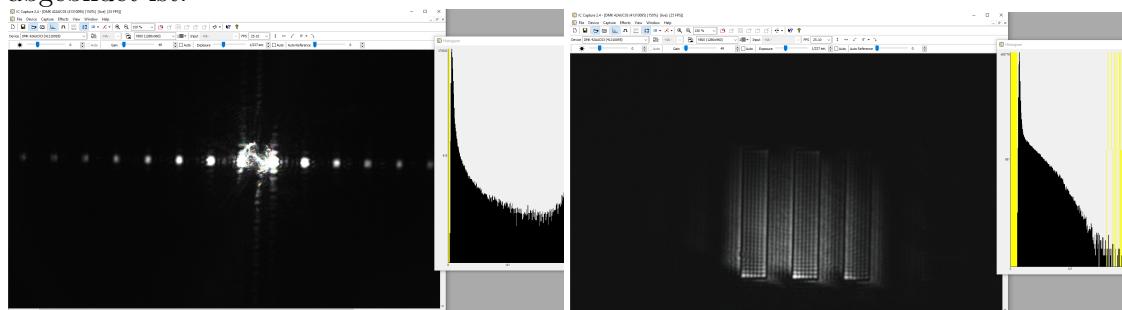


Abbildung 31: Beugungsbild mit ausgeblendeter nullter Ordnung **Abbildung 32:** Bild des Objekts bei ausgeblendeter nullter Ordnung

Wie es die Theorie voraussagt, werden nur die Konturen sichtbar, während sich der Rest des Objekts nicht vom Hintergrund unterscheiden lässt.

6 Auswertung

6.1 Zusammenhang zwischen der Auflösung und der Anzahl der Beugungsordnungen

Wie anhand der Abbe-Theorie vorausgesagt, erkennt man bei direkten Vergleich der Abbildung 17 bis Abbildung 21, dass die Auflösung des Bildes immer schlechter wird. Die Betrachtung von Abbildung 23 zeigt auch, dass nur anhand der Beugungsbilder 0-ter Ordnung, keine räumliche Auflösung möglich ist.

6.2 Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der N.A.

Unter der Verwendung der Werte aus Tabelle 2 und der Gleichung 6 erhält man folgende Werte für die N.A.

Tabelle 3: Erhaltene Werte für die nummerische Apertur
 $N.A.$... erhaltener Wert für die nummerische Apertur
 $\Delta N.A.$... erhaltene Unsicherheit der nummerische Apertur

N.A.	$\Delta N.A.$
0.0500	0.0008
0.0250	0.0008
0.0167	0.0008

Aus den Werten der Tabelle 2 und der Gleichung 7 erhält man schlieSSlich folgende Werte für das Auflösungsvermögen d .

Tabelle 4: Erhaltene Werte für das Auflösungsvermögen
 d ... Auflösungsvermögen in mm
 Δd ... Unsicherheit des Auflösungsvermögens in mm

d / mm	Δd / mm
0.0078	0.0010
0.0156	0.0019
0.022	0.003

Die Daten aus den so erzeugten Tabelle 3 und Tabelle 4 werden nun geplottet und eine theoretsche Fitkurve auf den Graphen angewendet, was folgende Abbildung 33 erzeugt.

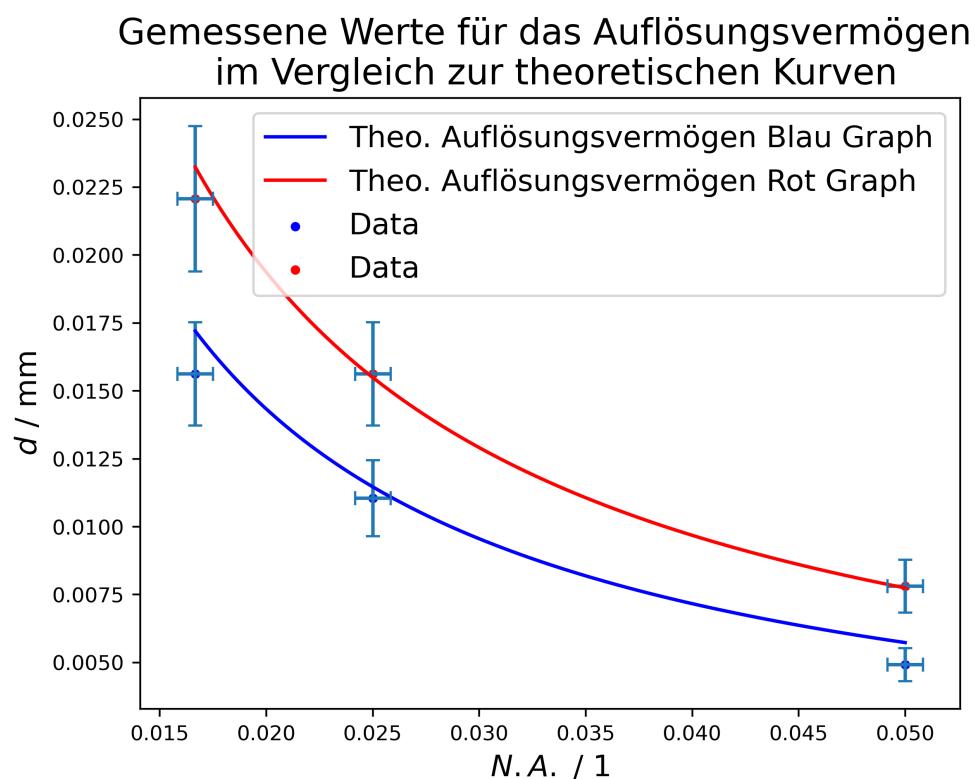


Abbildung 33: Gemessene Werte für das Auflösungsvermögen im Vergleich zu den theoretischen Kurven für blaues und rotes Licht

7 Diskussion

7.1 Zusammenhang zwischen der Auflösung und der Anzahl der Bergungsordnungen

Wie bereit erwähnt decken sich die erhaltenen Ergebnisse, mit jenen, die aufgrund der Abbe-Theorie vorausgesagt wurden. Allerdings lässt sich dieses Ergebnis nicht Quantifizieren, da keine einheitliche Metrik für die Verschwommenheit vorhanden ist.

7.2 Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der N.A.

Wie in Abbildung 33 ersichtlich, ist der theoretische Verlauf von der N.A. zum Auflösungsvermögen im Fehlerintervall der gemessenen Werte enthalten. Es ist allerdings zu beachten, dass die Unsicherheiten, mit \pm einem Element aus der Tabelle, großzügig gewählt worden sind, da die Wahrnehmung der getrennten Balken sehr subjektiv ist und daher bei unterschiedlichen Experimentatoren leicht zu anderen Ergebnissen führen kann.

8 Zusammenfassung

Die erhaltenen Ergebnisse decken sich mit der vorhergesagten Theorie. Allerdings ist dabei anzumerken, dass die meisten Messungen auf subjektiven Wahrnehmungen beruhen und daher keine absoluten Aussagen getroffen werden können.

9 Anhang

Hier im Anhang befindet sich nochmals der Strahlengang, der als Vorbereitung zu zeichnen war.

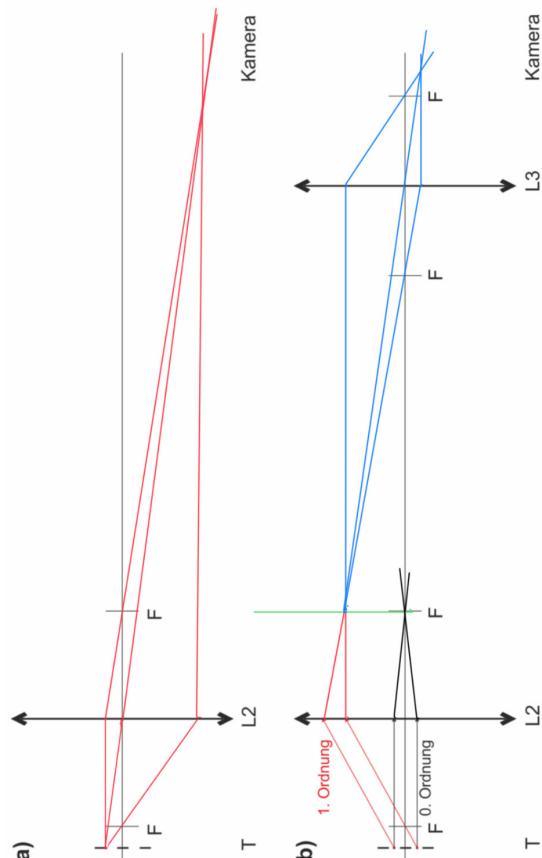


Abbildung 34: gezeichneter Strahlengang

Literatur

- [1] *Auflösung (Mikroskopie)*. de. Page Version ID: 205537714. Nov. 2020. URL: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Aufl%C3%B6sung_\(Mikroskopie\)&oldid=205537714](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Aufl%C3%B6sung_(Mikroskopie)&oldid=205537714) (besucht am 13.10.2021).
- [2] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2*. Springer-Verlag GmbH, 23. März 2018. ISBN: 978-3-662-55789-1. URL: https://www.ebook.de/de/product/31029958/wolfgang_demtroeder_experimentalphysik_2.html.
- [3] Harald Ditlbacher. *Abbe Theorie*. de. Universitätsplatz 5/I, 8010 Graz, Karl-Franzens Universität Graz, 8. Okt. 2021.
- [4] *Dunkelfeldmikroskopie*. de. Page Version ID: 214871776. Aug. 2021. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Dunkelfeldmikroskopie&oldid=214871776> (besucht am 13.10.2021).
- [5] *Fehlerfortpflanzung*. de. Page Version ID: 205827844. Nov. 2020. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Fehlerfortpflanzung&oldid=205827844> (besucht am 08.05.2021).
- [6] Stephan Mueller. (6) ** Abbe Optik Abbildungstheorie besser - YouTube. en. URL: <https://www.youtube.com/> (besucht am 13.10.2021).
- [7] *Rayleigh-Kriterium*. de. Page Version ID: 211452011. Apr. 2021. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Rayleigh-Kriterium&oldid=211452011> (besucht am 13.10.2021).
- [8] Braunschweig Wolfgang Kessel. *Die ISO/BIPM-GUM Sicht: Schätzwert & Messunsicherheit*. 2004.

Abbildungsverzeichnis

1	Veranschaulichung von Beugungseffekten bei einem einzelnen Gitterstrich [6]	4
2	Abbildung der Linse bei der nur die nullte Beugungsordnung vom Objektiv erfasst wird [6]	4
3	Abbildung der Linse bei der die nullte und erste Beugungsordnung vom Objektiv erfasst werden [6]	4
4	Abbildung der Linse beim Grenzfall, sodass die erste Beugungsordnung gerade nicht vom Objektiv erfasst wird [6]	5
5	Abbildung der Linse bei der die Beugungsordnungen bis zur dritten Ordnung vom Objektiv erfasst werden [6]	5
6	Skizze für die Anzahl der Ordnungen, die noch erfasst und auf den Brennpunkt abgebildet werden	5
7	Abbildungsskizze	6

8	Skizze für die Näherung für die Berechnung der N.A. [3][2]	6
9	Intensitätsverlauf des Beugungsbilds mit Spaltbreite entspricht dem halben Spaltabstand [2]	7
10	Skizze der Versuchsanordnung	8
11	Versuchsanordnung	9
12	verwendetes Testobjekt [3]	9
13	Tabelle mit den Räumlichen Frequenzen für die entsprechende Gruppen und Elementnummer [3]	10
14	Grafik mit gelben Balken am Rand	11
15	Bild vom Objekt	12
16	Beugungsbild vom Objekt	12
17	Bild vom Objekt bei 5 Beugungsordnungen	12
18	Beugungsbild vom Objekt bei 5 Beugungsordnungen	12
19	Bild vom Objekt bei 3 Beugungsordnungen	13
20	Beugungsbild vom Objekt bei 3 Beugungsordnungen	13
21	Bild vom Objekt bei 1 Beugungsordnung	13
22	Beugungsbild vom Objekt bei 1 Beugungsordnung	13
23	Bild vom Objekt bei 0 Beugungsordnungen	13
24	Beugungsbild vom Objekt bei 0 Beugungsordnungen	13
25	Testobjekt bei blauer LED mit Blendendurchmesser von 6 mm	14
26	Testobjekt bei roter LED mit Blendendurchmesser von 6 mm	14
27	Testobjekt bei blauer LED mit Blendendurchmesser von 3 mm	14
28	Testobjekt bei roter LED mit Blendendurchmesser von 3 mm	14
29	Testobjekt bei blauer LED mit Blendendurchmesser von 2 mm	15
30	Testobjekt bei roter LED mit Blendendurchmesser von 2 mm	15
31	Beugungsbild mit ausgeblendeter nullter Ordnung	16
32	Bild des Objekts bei ausgeblendeter nullter Ordnung	16
33	Gemessene Werte für das Auflösungsvermögen im Vergleich zu den theoretischen Kurven für blaues und rotes Licht	18
34	gezeichneter Strahlengang	20

Tabellenverzeichnis

1	Verwendete Geräte	
	Δ ... Unsicherheit der Geräte	10
2	erhaltene Werte für die räumliche Frequenz $ $... Striche ξ ... räumliche Frequenz r ... Blendenradius λ ... Wellenlänge	15
3	Erhaltene Werte für die nummerische Apertur $N.A.$... erhaltener Wert für die nummerische Apertur $\Delta N.A.$... erhaltene Unsicherheit der nummerische Apertur	17
4	Erhaltene Werte für das Auflösungsvermögen d ... Auflösungsvermögen in mm Δd ... Unsicherheit des Auflösungsvermögens in mm	17