

Abbe-Theorie

Einleitung

Will man mit einem optischen Instrument wie beispielsweise einem Mikroskop oder einem Fernrohr möglichst feine Details eines Objekts erkennen, dann ist nicht die Vergrößerung des Instruments die relevante Größe, sondern sein **optisches Auflösungsvermögen**. Denn ein stark vergrößertes aber schlecht aufgelöstes Bild zeigt möglicherweise weniger Details als ein geringer vergrößertes dafür aber gut aufgelöstes Bild.

In dieser Aufgabe sollen Sie untersuchen, welche Parameter das Auflösungsvermögen eines Mikroskops beeinflussen. Dabei ist der Begriff der **numerischen Apertur** von zentraler Bedeutung. Die Abbesche Abbildungstheorie ermöglicht nun ein anschauliches Verständnis des Auflösungsvermögens eines Mikroskops und der entsprechenden Bildentstehung, allerdings für den Spezialfall kohärent beleuchteter Objekte. Für das Verständnis der Abbe-Theorie ist es notwendig über die Begriffe **Bild- und Beugungsebene** Bescheid zu wissen.

1. Grundlagen

Arbeiten Sie den Grundlagenteil selbständig zuhause durch, bevor Sie die Übung durchführen und schlagen Sie die erwähnten Kapitel und Abschnitte im Lehrbuch Demtröder, Experimentalphysik 2, 4. Auflage nach; (fett gesetzte Verweise beziehen sich auf dieses Lehrbuch). Die beiden Vorbereitungsaufgaben zu den Strahlengängen sind zur Vorbereitung zuhause zu lösen.

Auflösungsvermögen und numerische Apertur

Das Auflösungsvermögen eines optischen Instruments ist der minimale Abstand Δx_{min} , den zwei punktförmige Objekte voneinander haben können, um mit dem Instrument als getrennt wahrgenommen werden zu können. Dies wird in **Kapitel 11.3** behandelt. Studieren Sie insbesondere den **Abschnitt 11.3.3** genau, da dort das Auflösungsvermögen des Mikroskops hergeleitet wird.

Das Ergebnis der Herleitung ist:

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

Wobei λ die Wellenlänge des verwendeten Lichts bezeichnet und NA die numerische Apertur des optischen Instruments.

Die numerische Apertur ist definiert als:

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

n bezeichnet die Brechzahl des optischen Mediums zwischen Objekt und erster Objektivlinse, (d.h. n ist näherungsweise 1 außer es wird beispielsweise ein sogenanntes Immersionsobjektiv verwendet, bei dem der Zwischenraum zwischen Objekt und Objektiv mit einer Flüssigkeit wie Wasser oder Öl gefüllt ist) und α bezeichnet den halben Öffnungswinkel des Lichtkegels, der von dem optischen Instrument erfasst wird. (Dies wird für den vorliegenden Aufbau weiter unten noch genauer erklärt.)

Mikroskop

Im einfachsten Fall besteht ein Mikroskop aus zwei Linsen, einer Objektiv- und einer Okularlinse. Die Objektivlinse erzeugt ein vergrößertes reelles Bild des Objekts, das mit der Okularlinse wie mit einer Lupe vergrößert betrachtet wird (siehe **Abschnitt 11.2.2**).

Beim vorliegenden Aufbau ist keine Okularlinse vorhanden, stattdessen wird das Zwischenbild von der Objektivlinse auf einen Kamera-Chip abgebildet und am Computer dargestellt. In der Vorbereitungsaufgabe 1 sollen Sie den Strahlengang dieser Abbildung konstruieren.

Vorbereitungsaufgabe 1: Auf der letzten Seite dieses Skriptums finden Sie unter a) eine Skizze: Die Linse L2 mit den zugehörigen Brennpunkten F sowie ein Testobjekt T, das aus drei vertikalen Linien besteht. L2 entspricht der Objektivlinse und die Abstände sind so gewählt, dass sie in Strahlrichtung maßstäblich zum optischen Aufbau sind. Verwenden Sie den kleinen roten Punkt am Testobjekt als Ausgangspunkt für die Konstruktion der drei ausgezeichneten Strahlen und finden Sie so die Position seines Bildes (Abschnitt 9.5.2, insbesondere Abb. 9.27).

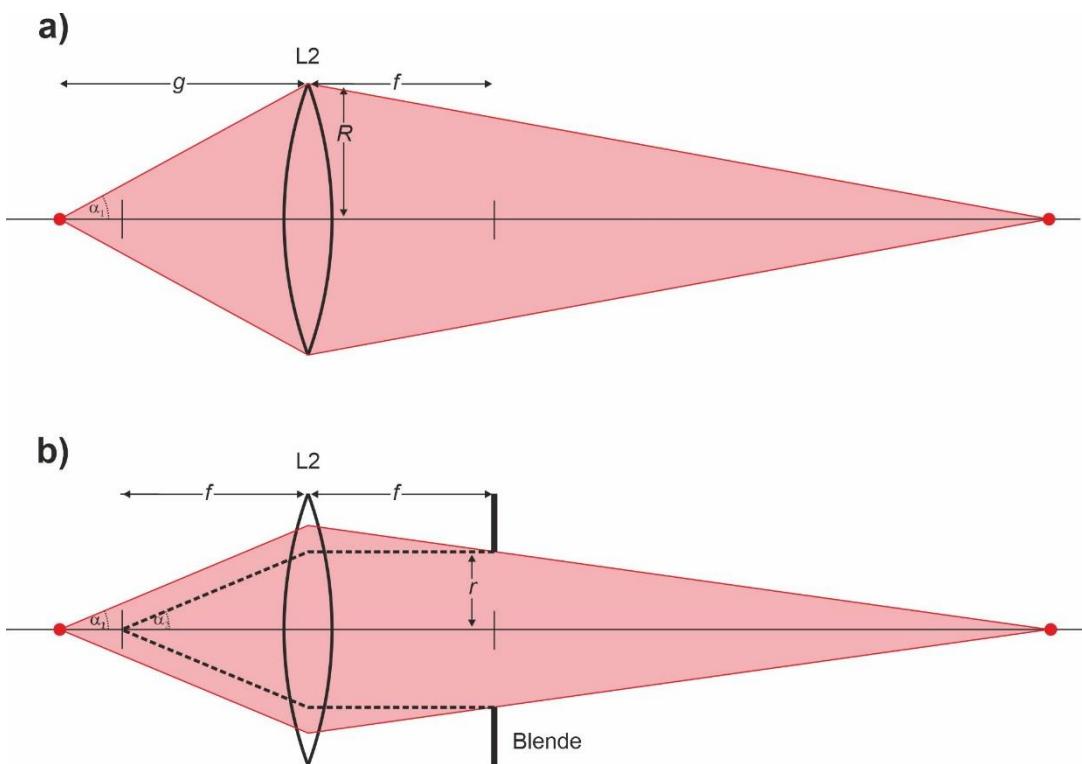


Abbildung 1: Schematische Darstellung zur Bestimmung der NA. a) Der halbe Öffnungswinkel α_1 wird von der Gegenstandsweite g und dem Linsenradius R bestimmt, b) der effektive Öffnungswinkel α_2 wird durch eine Lochblende in der hinteren Brennebene im Vergleich zu α_1 vermindert und ist durch Brennweite f und Blendenradius r gegeben.

Die numerische Apertur der Linse L2 bei dieser Abbildung lässt sich mithilfe von Abb. 1a ermitteln. Dargestellt sind ein roter Punkt auf der optischen Achse als Objekt im Abstand g vor der Linse und sein Bild rechts hinter der Linse, sowie das von der Linse erfasste Strahlenbündel als rosarote Fläche. α_1 bezeichnet den erwähnten halben Öffnungswinkel des Lichtkegels, der die numerische Apertur bestimmt. Da $n \approx 1$ und $\alpha_1 = \tan^{-1} R/g$ ist die numerische Apertur:

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

Die numerische Apertur wird in diesem Fall also von der Gegenstandsweite und dem Radius der Linse bestimmt.

Variation der numerischen Apertur

Um den Einfluss der numerischen Apertur auf das Auflösungsvermögen experimentell untersuchen zu können, ist es notwendig diese zu variieren. Eine Möglichkeit wäre, Linsen unterschiedlicher Durchmesser aber identischer Brennweite zu verwenden. Eine zweite Möglichkeit ist die Verwendung einer Lochblende in der hinteren Brennebene der Linse. Dieser Fall ist in Abb. 1b dargestellt. Die Blende (Radius r) beschneidet das Strahlbündel bildseitig. Wenn man nun rückverfolgt, welche Strahlen objektseitig zur Abbildung beitragen, so erkennt man, dass nun nicht mehr der ganze Linsendurchmesser genutzt wird, dass also die Blende die numerische Apertur vermindert. Mit den strichliert eingezeichneten Hilfslinien findet man den halben Öffnungswinkel des Lichtkegels als $\alpha_2 = \tan^{-1} r/f$. Und die numerische Apertur ergibt sich als:

$$NA = \sin \tan^{-1} \frac{r}{f} \quad (4)$$

Für $r \ll f$, eine Bedingung, die bei dem vorliegenden optischen Aufbau hinreichend erfüllt ist, kann man näherungsweise schreiben:

$$NA \approx \frac{r}{f} \quad (5)$$

Somit lässt sich also mit Blenden unterschiedlicher Durchmesser die numerische Apertur für die Abbildung variieren.

Im ersten Teil der experimentellen Aufgabe sollen Sie untersuchen, wie die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und die numerische Apertur das Auflösungsvermögen beeinflussen.

Abbesche Abbildungstheorie

Die Abbesche Abbildungstheorie ermöglicht ein Verständnis der Auflösungsformel durch Analyse der Beugungerscheinungen von kohärent beleuchteten Spalten. Dazu ist es notwendig das Wissen über Beugungsgitter aufzufrischen (**Abschnitt 10.5.3**) Im Experiment wird ein Gitter verwendet, bei dem die Spaltbreite dem halben Spaltabstand entspricht (**Abb. 10.44**). Bei einem derartigen Gitter fehlen die geradzahligen Beugungsordnungen. Um das zu verstehen, muss man sich nochmals die Beugung am Einzelpalt vergegenwärtigen (**Abschnitt 10.5.2**).

Die wesentlichen Punkte der Abbeschen Abbildungstheorie werden in **Abschnitt 11.3.4** erläutert. In dieser Theorie der Abbildung spielt die hintere Brennebene des Objektivs, die Beugungsebene, eine wichtige Rolle. Um dies genauer zu verstehen, werden nun einige Eigenschaften einer idealen Linse explizit wiederholt.

- Abbildung 2a: Alle Strahlen, die vor der Linse parallel zur optischen verlaufen, werden von der Linse in Richtung zum Brennpunkt gebrochen, (d.h. sie schneiden einander im Brennpunkt der Linse).

- Abbildung 2b: Alle Strahlen, die vor der Linse den Winkel φ zur optischen Achse haben und in der Zeichenebene liegen (der Einfachheit halber behandeln wir nur diesen Sonderfall), werden von der Linse in Richtung eines *gemeinsamen* Schnittpunkts gebrochen, der in der Brennebene liegt. (Die Brennebene ist normal zur optischen Achse und enthält den Brennpunkt.) Der Abstand dieses Schnittpunkts von der optischen Achse ist $f \tan \varphi$, (f bezeichnet die Brennweite der Linse).

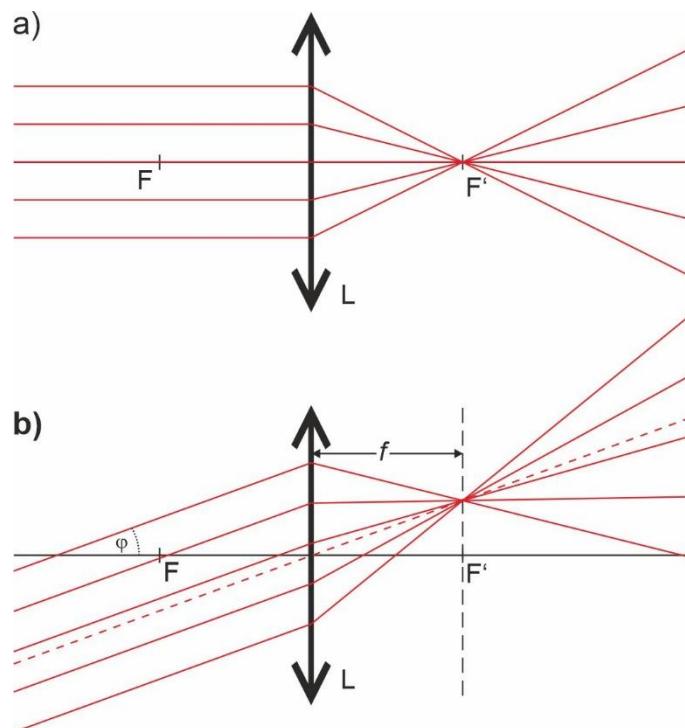


Abbildung 2: Skizze zu den grundlegenden Eigenschaften einer dünnen Linse, a) alle achsenparallelen Strahlen werden von der Linse in ihren Brennpunkt gebrochen, b) alle Strahlen, die parallel zueinander auf die Linse treffen, werden von der Linse in einen gemeinsamen Schnittpunkt in der Brennebene gebrochen.

Ein achsenparalleler Laserstrahl wird also vom Objektiv in den Schnittpunkt der optischen Achse mit der Brennebene fokussiert, (dieser entspricht der nullten Beugungsordnung). Bringt man nun einen Doppelspalt oder ein Beugungsgitter vor dem Objektiv in diesen Laserstrahl (der Abstand zum Objektiv ist unkritisch), dann entstehen Beugungsordnungen, die jeweils einen bestimmten Winkel zur optischen Achse haben; diese Beugungsordnungen werden in Punkte in der Brennebene fokussiert, deren Abstand zur 0ten Ordnung durch $f \tan \varphi$ gegeben ist. D.h. in dieser Ebene entsteht das Frauenhofersche Beugungsbild, daher auch der Name Beugungsebene. Dies ist in **Abbildung 11.19** dargestellt.

Die Brennebene kann im vorliegenden Versuchsaufbau mit einer Hilfslinse auf den Kamera-Chip abgebildet und dann am Computer analysiert werden. Mit unterschiedlichen Blenden, die sich ebenfalls in der Brennebene befinden, können nun gezielt Beugungsordnungen ausgeblendet und die Auswirkungen dieses Ausblendens auf das Bild des Testobjektes untersucht werden. In der Vorbereitungsaufgabe 2 sollen Sie den Strahlengang für die Abbildung der Beugungsebene auf den Kamera-Chip konstruieren.

Vorbereitungsaufgabe 2: Verwenden Sie die Skizze b) der Abbildung auf der letzten Seite dieses Skriptums. Ganz links auf der optischen Achse ist das Testobjekt (Gitter) als 3 vertikale Linien dargestellt. Die nullte und die beiden ersten Beugungsordnungen sind jeweils durch zwei parallele Strahlen repräsentiert. Konstruieren Sie zuerst die Brechung dieser 6 Strahlen an der Linse L2. (Diese erfolgt analog zu Abb. 2.) Zeichnen Sie die Strahlen weiter bis zur Linse L3 und konstruieren Sie die Brechung, die die Strahlen an dieser Linse erfahren. Die Schnittpunkte der beiden Strahlen jeder Ordnung sollten in einer Ebene liegen, in der sich auch der Kamera-Chip befindet. (**Hinweis:** In Abb. 2b können Sie sehen, wie man die Brechung eines beliebigen Strahls durch eine Linse konstruiert: Man zeichnet einen zum Strahl parallelen Hilfsstrahl, die durch den Mittelpunkt der Linse geht (strichliert dargestellt). Dieser Strahl wird von der Linse nicht gebrochen. Der gebrochene Strahl muss nun durch den Schnittpunkt des Hilfsstrahls mit der Brennebene verlaufen.)

2. Versuchsaufbau

Optischer Aufbau (siehe Abb. 3)

- Es stehen 3 Lichtquellen zur Verfügung:
 - Diodengepumpter Festkörper(DPSS)-Laser (Wellenlänge 531.9 nm) als kohärente Lichtquelle
 - blaue LED (Zentralwellenlänge 470 nm \pm 5 nm)
 - rote LED (Zentralwellenlänge 635 nm \pm 5 nm)
- Der Laser wird mit der Linse L1 auf das Testobjekt fokussiert.
- Die LEDs sind im Filterrad F montiert und können in den Strahlengang gedreht und mit dem Kippschalter der schwarzen Steuerungsbox eingeschaltet werden.
- Das Testobjekt T wird mit zwei Mikrometerschrauben in die Richtungen senkrecht zur optischen Achse bewegt, um unterschiedliche Bereiche des Objektes abzubilden. Mit der Schraube am Verschiebeschlitten wird das Objekt zur Fokussierung in Richtung der optischen Achse justiert.
- Die Abbildungslinse (L2) hat einen freien Durchmesser von 21,4 mm. Es handelt sich um ein achromatisches Linsenpaar, um Abbildungsfehler zu minimieren.
- In der hinteren Brennebene der Linse befindet sich das Filterrad B mit drei Lochblenden (Durchmesser 2 mm, 3 mm und 6 mm, Unsicherheit jeweils 0,1 mm) sowie einer Iris- und einer Drahtblende.
- Die Hilfslinse L3 kann vor die Kamera geschwenkt werden, um die Beugungsebene auf den Kamera-Chip abzubilden.

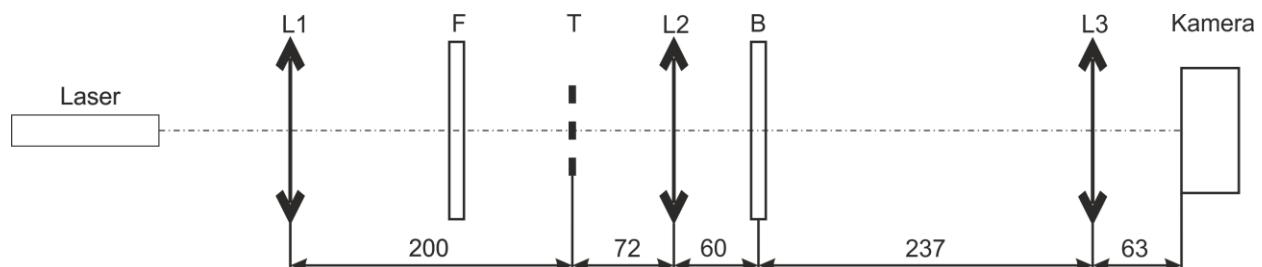


Abbildung 3: Optischer Aufbau des Experiments; L1: $f_1 = 200$ mm, F: Filterrad mit 2 LEDs, Graufilter und freiem Durchgang, T: Testobjekt; L2: $f_2 = 60$ mm; B: Filterrad mit 3 Lochblenden, einer Irisblende und einer Drahtblende, L3 (einklapprbar): $f_3 = 50$ mm.

Testobjekt

Das Testobjekt (Abb. 4) besteht aus horizontalen und vertikalen Balken, die zur Auflösungsbestimmung eines optischen Gerätes benutzt werden. Jedes „Element“ ist aus jeweils drei äquidistanten horizontalen und vertikalen Balken aufgebaut. Der Abstand zweier Balken voneinander (von Mitte zu Mitte gemessen) entspricht der doppelten Breite eines Balkens. Jeweils sechs dieser Elemente sind zu einer Gruppe zusammengefasst. Durch die Angabe in der Form „Gruppe Nr./Element Nr.“ wird jedes Element eindeutig bezeichnet. Die Tabelle 1 gibt die

räumliche Frequenz der Balken pro Millimeter für alle Elemente an. Der Abstand zweier Balken ergibt sich aus dem Kehrwert der räumlichen Frequenz.

Das größte Element, dessen horizontalen und vertikalen Linien nicht unterscheidbar sind, gibt das Auflösungsvermögen des verwendeten optischen Gerätes an.

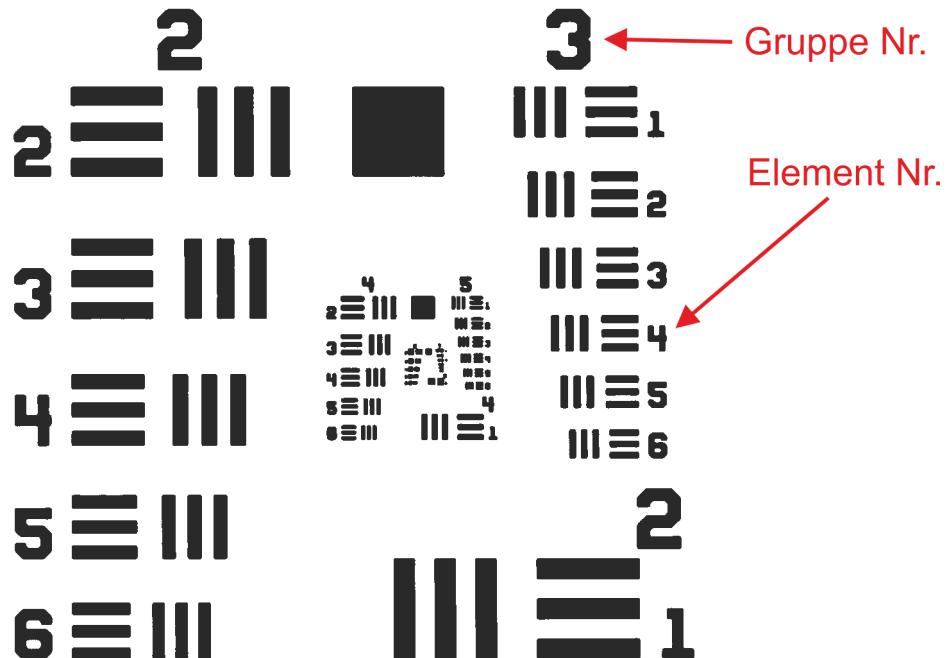


Abbildung 4: Darstellung des Testobjekts *1951 USAF Target*

Tabelle 1: Räumliche Frequenz der Balken in 1/mm für die unterschiedlichen Elemente des Testobjektes.

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

Hinweise zur Verwendung der Kamera

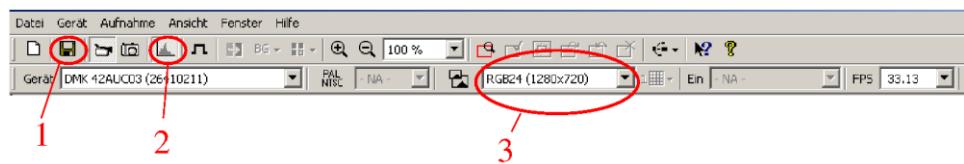
Die Kamera wird mit der Software “IC Capture” gesteuert.

- Wählen Sie als Bildformat „RGB1280x960“ (Auswahl „3“ in Abb. 5a)
- Die Belichtung kann über die Symbolleiste „Exposurebar“ (Tastenkürzel: Strg+5) gesteuert werden. Passen Sie manuell die Belichtungszeit („Exposure“) so an, dass das Bild gerade nicht sättigt. Das ist am besten im Histogramm (Abb. 5b) - aufzurufen mit dem Symbol „2“

in Abb. 5a - ersichtlich.

- Um ein Bild aufzunehmen, klicken Sie auf das Icon mit der Fotokamera und speichern Sie das Bild ab (Icon mit Diskette, Abb. 5a „1“). Klicken Sie auf die Filmkamera, um in den Live-Modus zurück zu kehren.
- Erweiterte Einstellungen zur Belichtung finden sie im Fenster „Properties“, das im Menu „Device“ aufgerufen werden kann. Die Verstärkung „Gain“ sollte minimal sein (34). Alle Parameter sollen manuell eingestellt werden.

(a)



(b)

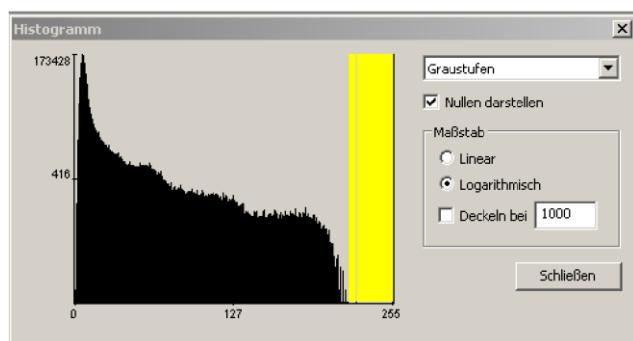


Abbildung 5: a) Menü von IC-Capture. b) Histogramm. Dargestellt ist die Anzahl der Pixel (Ordinate) über deren Intensität (Abszisse). Intensitätsbereiche die im Bild nicht auftreten sind gelb markiert. Die Belichtungsparameter sind dann richtig eingestellt, wenn der gelbe Bereich gerade etwas unterhalb von 255 beginnt.

3. Kontrollfragen

- Erklären Sie in wenigen Worten die Abbesche Theorie der Abbildung.
- Wie lautet die Abbildungsgleichung dünner Linsen?
- In welchem Abstand g muss sich ein Gegenstand G vor einer Sammellinse mit der Brennweite f befinden, damit sein Bild B gleich groß wie der Gegenstand ist? Verwenden Sie die Abbildungsgleichung dünner Linsen.
- Erklären Sie die Strahlengänge in a) und b) am Beiblatt des Skriptums.
- Skizzieren Sie den Intensitätsverlauf des Beugungsbilds eines *Gitters*, bei dem die *Spaltbreite* sehr *klein* gegen den Spaltabstand ist. (Das Beugungsbild ist auf einem Schirm in großem Abstand vom Gitter.)
- Skizzieren Sie den Intensitätsverlauf des Beugungsbilds eines *Gitters*, bei dem die *Spaltbreite* dem *halben Spaltabstand* entspricht. (Das Beugungsbild ist auf einem Schirm in großem Abstand vom Gitter.)
- Skizzieren sie den Intensitätsverlauf des Beugungsbildes einer *einfachen Spaltblende* auf einem Schirm in großem Abstand von der Blende.
- Wie ist das Auflösungsvermögen optischer Geräte definiert? Welche Faktoren bestimmen das Auflösungsvermögen eines Mikroskops?
- Weshalb erscheint das Beugungsbild des Gitters in der hinteren Brennebene der Linse als scharf?

Abbe-Theorie

4. Aufgabenstellung

0. Machen Sie sich mit dem experimentellen Aufbau vertraut.
 - a. Verwenden Sie eine LED als Lichtquelle.
 - b. Klappen Sie die Hilfslinse L3 aus dem Strahlengang.
 - c. Drehen Sie die verstellbare Irisblende mit dem Filterrad B in den Strahlengang und öffnen Sie diese mit dem kleinen Hebel.
 - d. Fokussieren Sie das Testobjekt mit der Schraube am Verschiebeschlitten.
 - e. Benutzen Sie die Mikrometerschrauben, um das Testobjekt zu verschieben und unterschiedliche Bereiche darzustellen.
 - f. Schließen und öffnen Sie die Irisblende und beobachten Sie, wie sich das auf die Abbildung auswirkt. Wie lassen sich die beobachteten Änderungen erklären? Können die schlecht aufgelösten („unscharf“ wirkenden) Abbildungen durch Nachfokussieren verbessert werden?
1. Quantitative Bestimmung des Auflösungsvermögens einer Linse in Abhängigkeit von ihrer numerischen Apertur für zwei unterschiedliche Wellenlängen der Beleuchtung.
 - a. Verwenden Sie die beiden LEDs als Lichtquellen.
 - b. Die NA kann mit den drei Lochblenden variiert werden (siehe *Variation der numerischen Apertur* im Grundlagenteil.)
 - c. Etwa in der Mitte des Bildes befindet sich ein heller Fleck, der durch Abbildungsfehler der LED-Linse entsteht. Achten Sie darauf, dass sich die zur Auflösungsbestimmung relevanten Strukturen außerhalb dieses Flecks befinden.
 - d. Es sollen sowohl die horizontalen als auch die vertikalen Balken jenes Test-Elements, das das Auflösungsvermögen bestimmt, nicht mehr unterscheidbar sein. Es gibt einen Ermessensspielraum bei der Entscheidung, ob die Balken noch unterscheidbar sind oder nicht. Berücksichtigen sie diesen in der Unsicherheit der Messung.
 - e. Stellen Sie in einem Diagramm die Auflösung gegen die NA dar und vergleichen Sie diese mit den theoretisch ermittelten Werten (siehe auch Abschnitt: *5. Hinweise zur Erstellung des Laborberichtes*).
2. Qualitative Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Auflösung des Bildes eines Spaltgitters (Testobjekt) und der Anzahl der transmittierten Beugungsordnungen (Abbe Theorie).
 - a. Zum Fokussieren des Objektes beleuchten Sie mit der roten LED. Suchen Sie die drei vertikalen Balken des Elements 3/4 des Testobjekts. Wechseln Sie dann auf Laser-Beleuchtung.
 - b. Nehmen Sie zuerst das Bild des Objektes und das zugehörige Beugungsbild auf.
 - c. Reduzieren Sie dann mit der Irisblende in der Beugungsebene die Anzahl der transmittierten Ordnungen und zwar so, dass maximal die 5., die 3., die 1. beziehungsweise nur die 0. Ordnung transmittiert werden. Nehmen Sie für die 4

Stellungen der Irisblende jeweils ein Bild des Objektes und das zugehörige Beugungsbild auf.

- d. Achten Sie auf die korrekte Belichtung der Bilder. Bei den Aufnahmen der Beugungsbilder lässt sich eine Sättigung im Bereich der 0. und 1. Ordnung nicht vermeiden. Wählen Sie die Belichtungszeit so, dass die höchste dargestellte Beugungsordnung noch erkennbar ist.
3. (Option) Freies Experimentieren. Untersuchen Sie unterschiedliche Elemente des Testobjekts unter Laserbeleuchtung und versuchen Sie physikalische Erklärungen für Ihre Beobachtungen zu finden. Quantitative Aussagen sind in der Regel wertvoller als qualitative Beobachtungen. Einige Vorschläge:
 - a. Wie sieht das Beugungsbild horizontaler Balken aus?
 - b. Wie ändert sich das Beugungsbild mit dem Abstand der Balken? (Quantitative Erklärung)
 - c. Im Beugungsbild sieht man auch Beugungerscheinungen in der Richtung normal zu den Hauptordnungen. Was könnte der Grund dafür sein?
 - d. (Fortgeschrittene) Blenden Sie die nullte Beugungsordnung mit der Drahtblende aus und achten Sie auf die Änderungen bei der Abbildung des Testobjekts. Recherchieren Sie zum Thema „Dunkelfeldmikroskopie“, um die Beobachtungen zu erklären.
 - e. (Fortgeschrittene) Stellen Sie eine Verbindung zu Fourieroptik her. Als Ausgangspunkt dient der letzte Absatz in **Abschnitt 11.3.4**. Der helle Bereich zwischen zwei Balken eines Testobjekts ergibt im Intensitätsquerschnitt eine Rechtecksfunktion. Fertigen sie mit ImageJ Intensitätsquerschnitte der Beugungsbilder, die sie in Aufgabe 2 aufgenommen haben, an und interpretieren Sie diese im Rahmen der Fourieroptik.
 - f. Lassen Sie sich von Ihrer Neugier leiten!

5. Hinweise zur Erstellung des Laborberichtes

1. Aufgabenstellung:
2. Voraussetzungen und Grundlagen: *Kurze Beschreibung der Abbeschen Abbildungstheorie; Definition und Formel für das Auflösungsvermögen eines Mikroskops; Beschreibung und Skizze des Intensitätsverlaufs des Beugungsbilds eines Gitters, bei dem die Spaltbreite dem halben Spaltabstand entspricht.*
3. Beschreibung der Versuchsanordnung: *Maßstabgetreue Skizze des gesamten Aufbaues; zusätzlich soll die Abbildung am Beiblatt des Skriptums mit den ergänzten Strahlengängen in den Laborbericht übernommen werden, (außerdem die Blende in der Beugungsebene einzeichnen).*
4. Geräteliste
5. Versuchsdurchführung und Messergebnisse:
 - Zu 1. Dokumentieren Sie alle 6 Bilder zur Auflösungsbestimmung; markieren Sie in den Bildern jenes Element, das die Auflösung bestimmt
 - Zu 2. Dokumentieren Sie die 5 Bildpaare (Bild des Objektes und Beugungsbild) für die unterschiedlichen Blendendurchmesser; achten Sie auf korrekte Bildunterschriften.
 - Zu 3. (Option) Dokumentieren Sie Ihre Experimente knapp, verständlich und nachvollziehbar.
6. Auswertung:
 - Zu 1. Zeigen Sie mithilfe einer Tabelle, wie sie für die unterschiedlichen Blendendurchmesser und Wellenlängen zu den jeweiligen Auflösungen und der zugehörigen Unsicherheit kommen. Stellen Sie in einem Grafen die Auflösung (vertikale Achse) gegen die NA (horizontale Achse) für beide Wellenlängen dar; Fehlerbalken nicht vergessen; zeichnen Sie das Auflösungsvermögen Δx_{\min} in Abhängigkeit von der NA nach Formel (1) ein.
 - Zu 2. Erklären Sie den Einfluss der Blendengröße in der Beugungsebene auf die Bilder des Objektes; stellen Sie eine Verbindung zur Abbeschen Abbildungstheorie her. Wie lassen sich die feinen Streifen, die in manchen Beugungsbildern auftreten, verstehen?
 - Zu 3. Dokumentieren Sie Ihre quantitativen Überlegungen.
7. Diskussion: Zu 1. Stimmen die experimentell ermittelten Werte für die Auflösung mit den theoretisch erwarteten Werten unter Berücksichtigung der Unsicherheiten überein? Diskutieren Sie den Einfluss der Unsicherheiten bei Blendendurchmesser, Wellenlänge und jener Unsicherheit, die sich durch das Auswählen des Elements des Testobjektes ergibt.
8. Zusammenfassung
9. Literatur

6. Literatur

- Demtröder, *Experimentalphysik 2, Kapitel 9,10 und 11.*

Skriptum

9/2023 Grundlegende Umarbeitung des Skriptums nach Vorschlägen der Fachdidaktik. Dank an Markus Obczovsky und Milan Nemling sowie an die Teilnehmer des Projektlabors!

22.9.2020 Kleine Änderungen im Text. Umgruppierung der Abschnitte. Neue Kontrollfragen.

16.9.2015 Neue Optionsaufgabe: Kontrastverfahren in der Mikroskopie. Zwei Punkte aus Vorbereitung entfernt. Kleine Änderungen im Text.

29.10.2014 Kleine Änderungen im Text.

8.10.2014 Hinweise zur Verwendung der Kamera vom Skriptum *Interferometer* übernommen. Kleinere Änderungen im Text.

20.7.2014 Erste Version nach ausführlichen Diskussionen mit A. Hohenau.

Aufbau

9/2020 Eine dritte Ausführung des Experiments wurde aufgebaut.

7/2014 Erweiterung des Aufbaus von A. Leitner und Duplizierung des Aufbaus mit kommerziellen Teilen.

Sondergefertigte Teile wurden unter der Leitung von K. Ansperger und U. Weilguny in der feinmechanischen Werkstätte des Institutes für Physik, Karl-Franzens Universität Graz konstruiert und hergestellt. Danke für die Unterstützung!

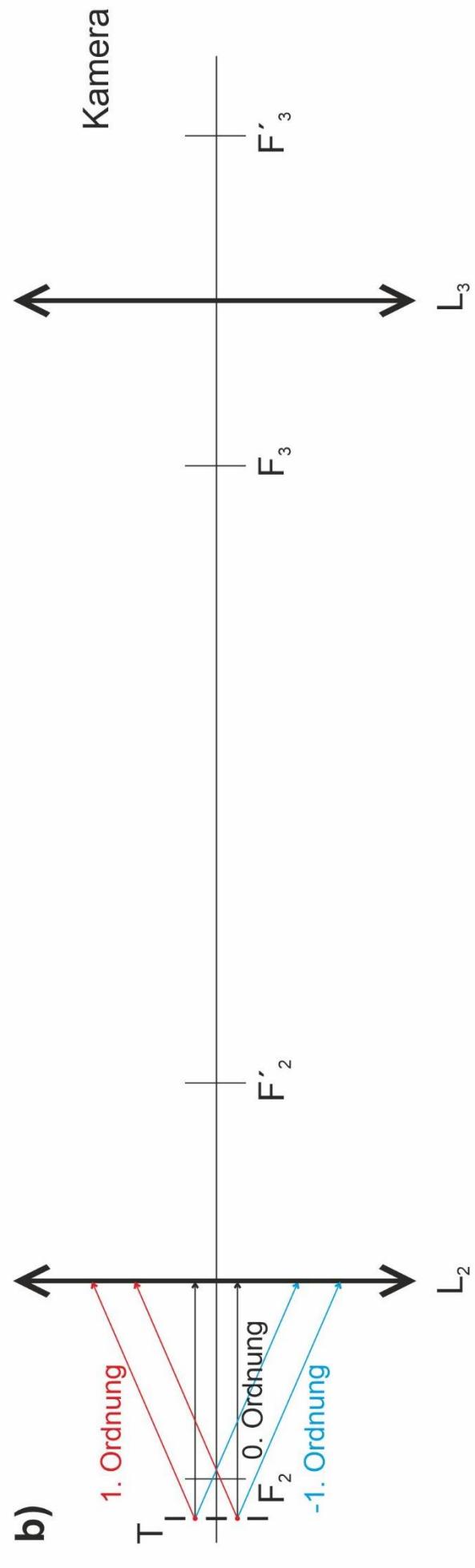
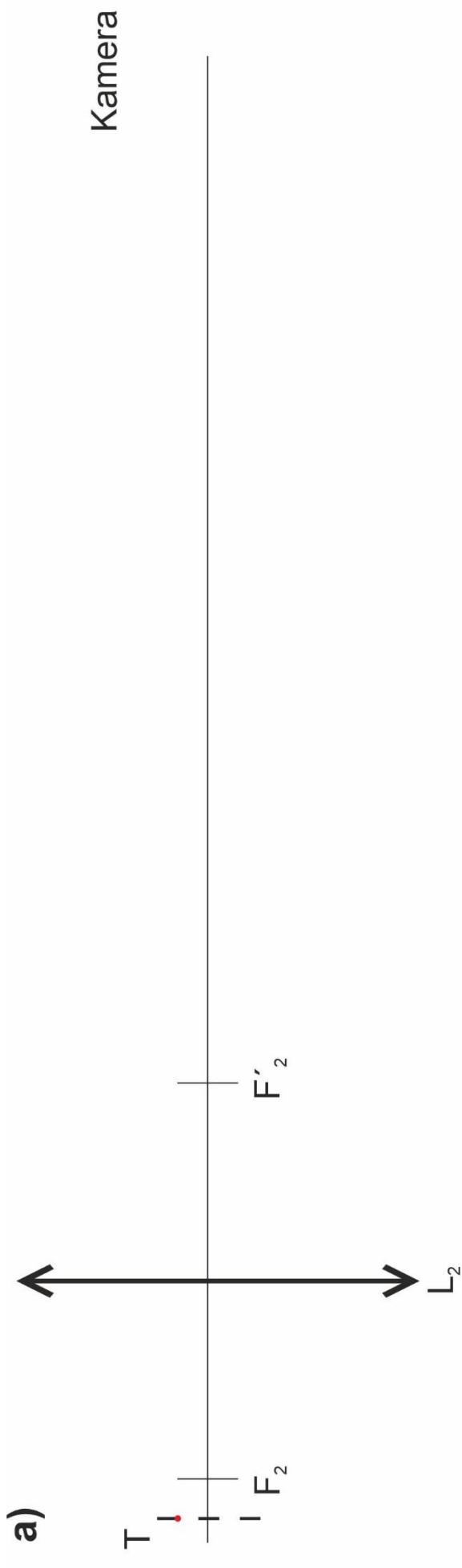


Abbildung : Darstellung der Strahlengänge (in horizontaler Richtung maßstäbliche zum experimentellen Aufbau), a) die Abbildungslinse L_2 ($f_2 = 60 \text{ mm}$) bildet das Testobjekt T (Beugungsgitter) auf die Kamera ab, b) mit der Hilfslinse L_3 ($f_3 = 50 \text{ mm}$) wird das Beugungsbild des Testobjektes auf die Kamera abgebildet.