

UNIVERSITÄT REGENSBURG

ANFÄNGERPRAKTIKUM B

Versuch: Optisches Filtern (of)

Fabian Tanzer

09. Februar 2021

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Fragen zur Vorbereitung	2
2.1 Abbildungsgleichung	2
2.2 Konstruktion des Bildes des Gegenstands G	2
2.3 Laserstrahllaufweitung	2
2.4 Primäres und sekundäres Bild	3
2.5 Primäres und sekundäres Bild beim Liniengitter	4
2.6 Abstand benachbarter Punkte in der hinteren Brennebene	6
2.7 Auswirkungen von Eingriffen am primären Bild am Endbild beobachten	7
2.8 Charakter der Bilder	8
2.9 Justieren einer „optischen Bank“	8
3 Durchführung	10
3.1 Bis Linse 3 mit Kreuzgitter	10
3.2 Umlenkspiegel und Linse 4	10
3.3 Vollständiger Aufbau mit Linse 5	10
3.4 Doppelspalt statt Kreuzgitter, Irisblende	11
3.5 Liniengitter und Mikroskop-Objektträger	11
3.6 Kreuzgitter und Spaltblende	11
3.7 Drehen der Spaltblende	12
3.8 Irisblende	13
4 Fazit	13

1 Einleitung

Bei diesem Versuch sollen die Grundzüge der Abbeschen Abbildungstheorie¹ vertieft werden. Vor allem soll gelernt werden, wie durch gezielte Eingriffe in den optischen Aufbau das Bild eines Gegenstandes beobachtet und dementsprechend manipuliert bzw. gefiltert werden kann. Dies ist vor allem für den Bau von optischen Instrumenten wichtig.

2 Fragen zur Vorbereitung

2.1 Abbildungsgleichung

Die Abbildungsgleichung, oder auch Linsengleichung genannt, lautet bei einer optischen Abbildung mittels einer Linse:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

wobei folgende Größen verwendet werden:

b: Bildweite

g: Gegenstandsweite

f: Brennweite

2.2 Konstruktion des Bildes des Gegenstands G

Die folgende Abbildung zeigt, wie das Bild des Gegenstandes G konstruiert wird.

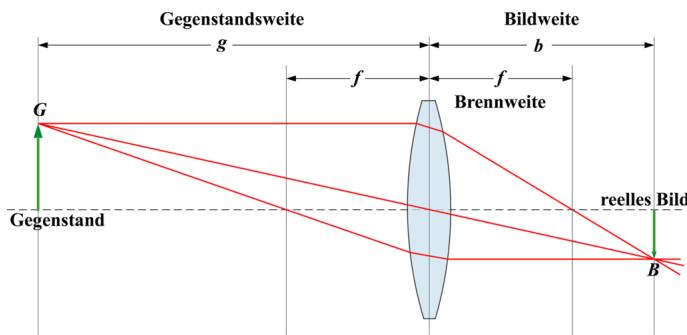


Abb. 1: Variation der Spannungswerte für das Glühlämpchen [2]

Betrachtet man diese Abbildung so bemerkt man, dass mit zunehmender Brennweite f auch die Bildweite b bzw. Gegenstandsweite g größer wird. Das stimmt auch mit (1) überein.

2.3 Laserstrahlauflaufweitung

In diesem Versuch soll ein Laserstrahl mit einem engen Ausgangsstrahlbündel zu einem breiteren Parallelstrahl aufgeweitet werden. Dazu sollen zwei Linsen L_1 und L_2 verwendet werden. L_1 habe $f_1 = 5$ mm. Die Aufweitung soll 10-fach sein. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten:

- Umgekehrte **Kepler-Anordnung**: Diese Anordnung besteht aus zwei Sammellinsen. „Der Nachteil hierbei ist jedoch, dass im Brennpunkt eine extrem hohe Leistungsdichte herrschen kann, die zur Funkenentladung der aufgeheizten Luft führen kann“[4].

¹Ernst Karl Abbe (1840-1905) war ein deutscher Physiker, der die Grundlagen der modernen Optik schuf

- Um insbesondere beim Einsatz von Hochleistungslasern diesen unerwünschten Effekt zu vermeiden, verwendet man Systeme in umgekehrter **Galilei-Anordnung**, die aus der Kombination einer Sammel- und einer Zerstreuungslinse bestehen. Diese Anordnung besitzt jedoch keinen reellen Brennpunkt. Der Vorteil dieser Anordnung ist die kürzere Baulänge.

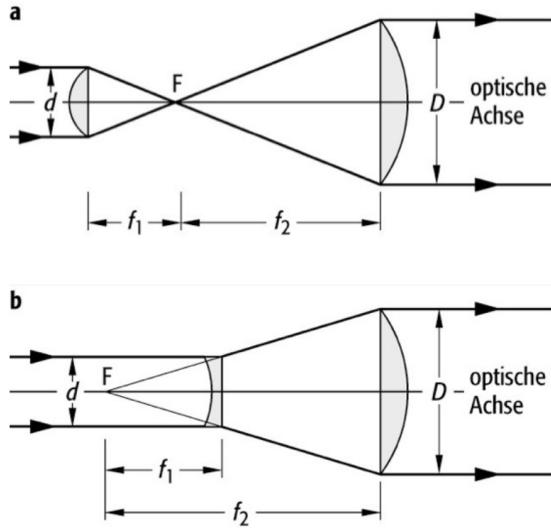


Abb. 2: Laserstrahlauflaufweitung durch a) ein Linsensystem in umgekehrter Kepler-Anordnung, b) ein Linsensystem in umgekehrter Galilei-Anordnung [4]

Für beide Systeme gilt die Formel:

$$D = d \frac{f_2}{|f_1|} \quad (2)$$

wobei:

d: optischer Strahldurchmesser

D: gewünschter Strahldurchmesser

Aufgrund der vorgegebenen Brennweite der ersten Linse verwendet man für unseren Versuch das Linsensystem in umgekehrter Kepler-Anordnung. Da eine 10-fache Aufweitung gewünscht ist, ergibt sich für die Brennweite f_2 der zweiten Sammellinse:

$$\frac{D}{d} = \frac{f_2}{|f_1|} \stackrel{!}{=} 10 \Leftrightarrow f_2 = 10f_1 = 50 \text{ mm} \quad (3)$$

Der Linsendurchmesser der vorderen Linse muss mindestens so groß sein wie der optische Strahldurchmesser d, der Linsendurchmesser der hinteren Linse zehn mal so groß. Da am Rand der Linsen Brechungsfehler auftreten, ist es empfehlenswert größere Linsendurchmesser zu verwenden.

2.4 Primäres und sekundäres Bild

Treffen Lichtstrahlen auf Kanten, so werden sie gebrochen. Anschließend interferieren die Wellen miteinander. Bringt man nun ein Objekt (zum Beispiel Linsen) wie in Abb. 3 in den Strahlengang, so entsteht in der Brennebene der ersten Linse ein Interferenzmuster, das in der Abbeschen Abbildungstheorie auch **primäres Bild** genannt wird.

Die Vereinigung dieses Interferenzmusters mit den Strahlen, die in gerader Linie vom Objekt ausgehen und durch das optische System abgebildet werden, bezeichnet man als **sekundäres Bild**.

Dieses ist ein vergrößertes/verkleinertes Abbild des Objektes in der Bildebene (zum Beispiel dem Schirm).

Die Vereinigung der geradlinig verlaufenden Strahlen mit dem Interferenzmuster ergibt schließlich das strukturierte Abbild des Objektes.

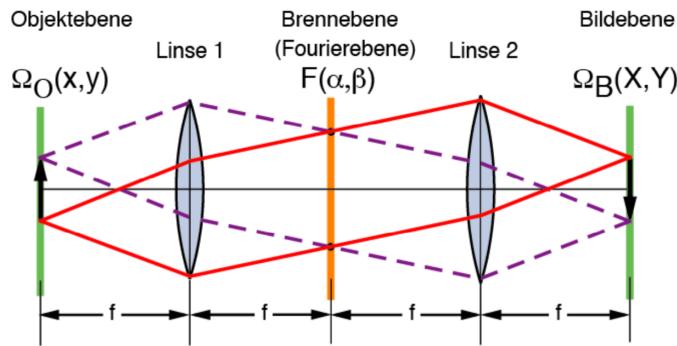


Abb. 3: Beugung an Linse [3]

Der Abbildungsvorgang läuft im Idealfall in 2 Schritten ab:

$$\Omega_0(x, y) \xrightarrow{\text{Fouriertransformation}} F_{ideal}(\alpha, \beta) \xrightarrow{\text{Rücktransformation}} \Omega_{B,ideal}(X, Y) \quad (4)$$

2.5 Primäres und sekundäres Bild beim Liniengitter

Konstruktion der Strahlen 0. Ordnung:

Diese Strahlen sind in Abb. 4 als schwarze Striche dargestellt. Die auf die bikonvexe Linse ein-treffenden Parallelstrahlen werden so abgelenkt, dass sie sich im Brennpunkt der Linse schneiden. Somit werden Strahlen, die durch den Mittelpunkt der Linse laufen, nicht abgelenkt.

Konstruktion der Strahlen ± 1 . Ordnung:

Die Strahlen 1. Ordnung sind in Abb. 4 als rote Linien und die Strahlen -1. Ordnung als blaue Linien dargestellt. Diese Strahlen werden an der bikonvexen Linse so gebrochen, dass sie sich in der Brennebene schneiden und in der Bildebene mit ihrem zugehörigen Strahl 0. Ordnung treffen.

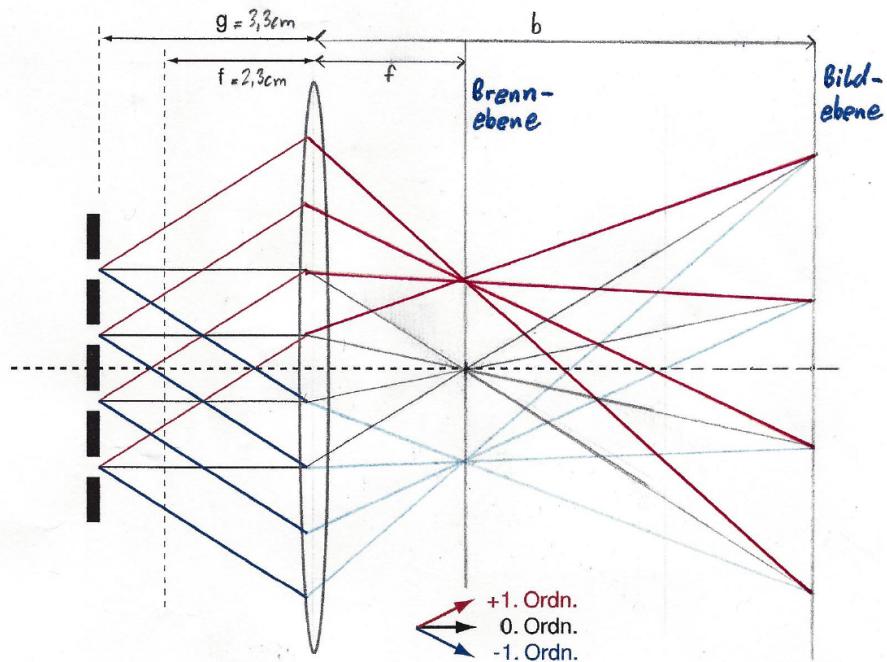


Abb. 4: Konstruktion von primärem und sekundärem Bild eines Liniengitters, das mit einer bikonvexen Linse abgebildet wird [1]

Die Bildweite b wurde folgendermaßen berechnet:

$$b = \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{g} \right)^{-1} \quad (5)$$

$$= \left(\frac{1}{2,3 \text{ cm}} - \frac{1}{3,3 \text{ cm}} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$= 7,59 \text{ cm} \quad (7)$$

Die folgende Abbildung zeigt das primäre Zwischenbild durch die Linse und den Intensitätsverlauf in der Objektivbrennebene:

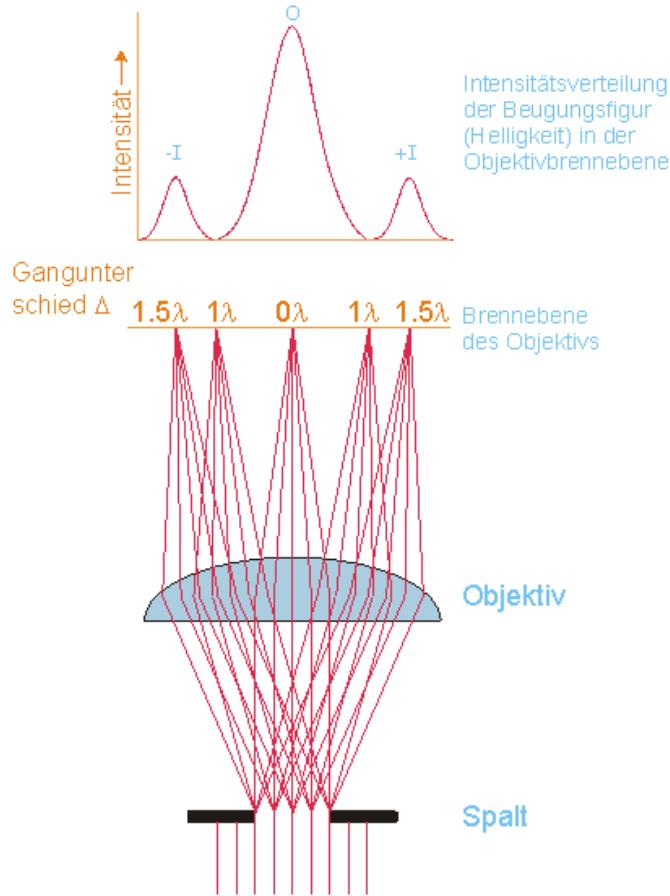


Abb. 5: Darstellung der Beugungsfigur (nach Abbe „primäres Zwischenbild“) genannt [5]

Der Intensitätsverlauf ist analog zu dem eines Doppelspalts.

2.6 Abstand benachbarter Punkte in der hinteren Brennebene

Die Lage der Beugungsmaxima eines Gitters ist gegeben durch:

$$\sin(\psi_{m,max}) = \frac{\lambda}{d} m \quad (8)$$

Aus trigonometrischen Beziehungen folgt:

$$\tan(\psi_{m,max}) = \frac{\Delta x}{f} m \quad (9)$$

Mithilfe der Kleinwinkelnäherung

$$\sin(\psi_{m,max}) = \tan(\psi_{m,max}) \quad (10)$$

folgt:

$$\frac{\lambda}{d} m \approx \frac{\Delta x}{f} m \quad (11)$$

$$\Leftrightarrow \Delta x \approx \frac{\lambda f}{d} \quad (12)$$

wobei folgende Größen verwendet werden:

- λ : Wellenlänge
- m : Beugungsordnung
- $\psi_{m,max}$: Beugungswinkel des m -ten Beugungsmaximum
- λ : Wellenlänge des beleuchtenden Lichtes
- d : Abstand der Gitterlinien
- Δx : Abstand benachbarter Punkte in der hinteren Brennebene
- f : Brennweite der Linse

Diese Punkte stellen Interferenzmaxima in der Brennebene, also im primären Bild, dar.

2.7 Auswirkungen von Eingriffen am primären Bild am Endbild beobachten

Um die Auswirkungen von Eingriffen am primären Bild auf das Endbild beobachten zu können, ist es hilfreich, das Endbild (sekundäres Bild) mit dem primären Bild zu vergleichen. Dies geschieht am bequemsten, wenn beide Bilder vergrößert nebeneinander auf dem Beobachtungsschirm dargestellt werden. Die Problemstellung besteht darin, zwei Bilder, die sich an unterschiedlichen Positionen im Strahlengang befinden, in einer Beobachtungsebene (Schirm) abzubilden. Dies erreicht man mit folgendem Aufbau:

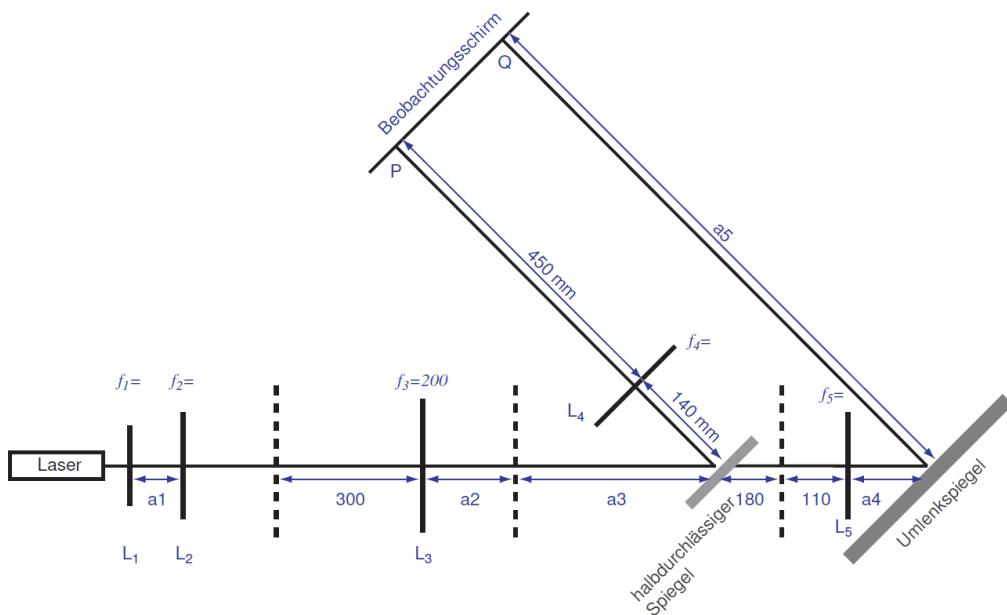


Abb. 6: Schematische Darstellung des für die Durchführung notwendigen Aufbaus. Alle Maße in mm. [1]

Nun werden noch die fehlenden Maße berechnet: Folgende Maße können wir aus Vorbereitungsaufgabe 3 übernehmen:

$$f_1 = 5 \text{ mm}, f_2 = 50 \text{ mm} \quad (13)$$

Für den Abstand der Linsen L_1 und L_2 gilt:

$$a_1 = f_1 + f_2 = 55 \text{ mm} \quad (14)$$

Der Abstand a_2 entspricht der Brennweite der Linse L_3 :

$$a_2 = f_3 = \boxed{200 \text{ mm}} \quad (15)$$

Für den Abstand a_3 gilt:

$$a_3 = g_4 - 140 \text{ mm} \quad (16)$$

$$= \left(\frac{1}{f_4} - \frac{1}{b_4} \right)^{-1} - 140 \text{ mm} \quad (17)$$

(18)

Da wir nur bestimmte Linsen zur Verfügung habe, ist es hier am besten die Linse mit der Brennweite $f_4 = 200 \text{ mm}$ zu verwenden. So erhalten wir für den Abstand a_3 ein ganzzahliges Ergebnis:

$$a_3 = \left(\frac{1}{200 \text{ mm}} - \frac{1}{450 \text{ mm}} \right)^{-1} - 140 \text{ mm} \quad (19)$$

$$= \boxed{220 \text{ mm}} \quad (20)$$

Für die fünfte Linse wählen wir die Brennweite $f_5 = 100 \text{ mm}$. Somit erhalten wir für die Summe der Abstände a_4 und a_5 :

$$a_4 + a_5 = b_5 \quad (21)$$

$$= \left(\frac{1}{f_5} - \frac{1}{g_5} \right)^{-1} \quad (22)$$

$$= \left(\frac{1}{100 \text{ mm}} - \frac{1}{110 \text{ mm}} \right)^{-1} \quad (23)$$

$$= \boxed{1100 \text{ mm}} \quad (24)$$

2.8 Charakter der Bilder

Im Punkt P in Abb. 6 wird das primäre Bild dargestellt.

Im Punkt Q in Abb. 6 befindet sich das sekundäre Bild, also das vergrößerte reelle Abbild des Objekts, also hier das Gitter.

2.9 Justieren einer „optischen Bank“

Bei dieser Aufgabe soll man sich überlegen, wie man eine „optische Bank“ justieren soll. Anhand folgender Abbildung wird die Bedeutung einer optimalen Ausrichtung der optischen Komponenten auf der optischen Achse verdeutlicht:

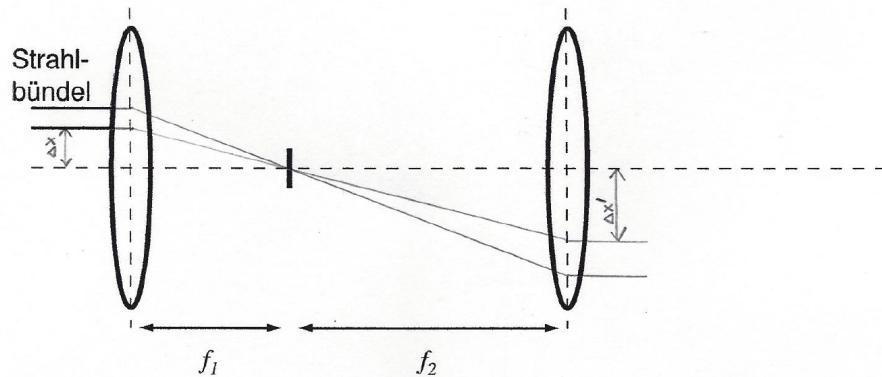


Abb. 7: Durchgang eines zur optischen Achse parallel versetzten Strahlbündels durch ein einfaches Linsensystem [1]

Das Strahlbündel wird durch die Linsen aufgeweitet, gespiegelt und parallel versetzt. Es lässt sich zeigen, dass der Abstand Δx des einfallenden Strahls gegenüber der optischen Achse auch um den Vergrößerungsfaktor des optischen Systems verändert wird. Der Abstand nach dem Durchlaufen der beiden Linsen hat dann den Betrag $\Delta x > \Delta x'$.

Werden die Linsen so angeordnet, dass $\Delta x'$ sehr groß wird, so kann dies dazu führen, dass das Laserbündel an einigen optischen Komponenten, wie Linsen, Gittern oder sogar am Schirm, vorbeiläuft und somit kein Bild mehr zu sehen ist. Dies sollte selbstverständlich vermieden werden. Am besten achtet man darauf, dass der Laserstrahl auf der optischen Achse jeder Linse verläuft, da Abweichungen von jeder Linse verstärkt werden.

3 Durchführung

In diesem Versuch wird gezeigt, wie gezielte Eingriffe in das primäre Bild, also in das Beugungsbild, einerseits zu einer Verbesserung der Bildqualität beitragen können, andererseits aber auch dazu führen können, dass zusätzliche, vermeintliche Informationen in das Endbild hinein manipuliert werden. Beim Umgang mit dem Laser ist vor allem darauf zu achten, dass nie direkt in den Laserstrahl geschaut wird. Um dies zu vermeiden, sollte vor jedem Umbau der Laserstrahl mit einem Blatt Papier abgedeckt werden. So können auch Streuungen an den optischen Geräten vermieden werden. Es ist schwierig, gute, anschauliche Fotos zu machen, da man entweder zu weit vom Beobachtungsschirm entfernt ist oder aber die Hand im Laserstrahl hat. Deswegen wurden teilweise Skizzen angefertigt.

3.1 Bis Linse 3 mit Kreuzgitter

Am Anfang wird die Anordnung gemäß Abb. 6 und den dazugehörigen Berechnungen aufgebaut. Dann wird an der dafür vorgesehenen Position im Strahlengang als Objekt ein Kreuzgitter eingefügt. Das Ziel ist es nun, mit einem Blatt Papier das primäre und sekundäre Bild zu finden. Das primäre Bild wird 26,1 cm hinter der Linse 3 gefunden. Das erste scharfe sekundäre Bild wird dagegen erst bei 63,1 cm gefunden.

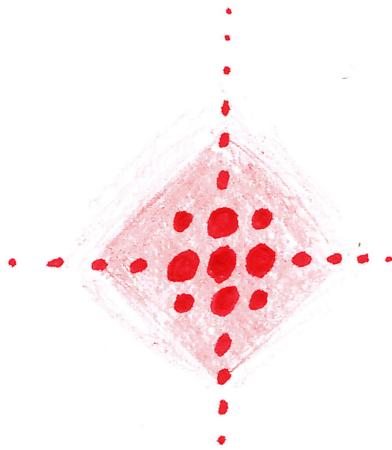


Abb. 8: Skizze des Primärbildes

3.2 Umlenkspiegel und Linse 4

Nun wird am Ende der optischen Bank der Umlenkspiegel platziert. Der umgelenkte Strahl wird mit Hilfe des Leuchtschirms sichtbar gemacht. Die Linse 4 wird möglichst nahe zur Linse 3 eingefügt. Es sind auf dem Beobachtungsschirm große Gitterabstände zu sehen. Dann wird L_4 von L_3 weg bewegt in Richtung Umlenkspiegel. Befindet sich L_4 ca. 55 cm von L_3 entfernt, so können auf dem Beobachtungsschirm kleine, scharfe Gitterabstände beobachtet werden.

3.3 Vollständiger Aufbau mit Linse 5

Es wird noch Linse 5 eingebaut und damit der Aufbau vervollständigt. Man geht dabei am geschicktesten vor, indem man die Linsen mit großer Brennweite zuerst einbaut, da diese das Licht am stärksten brechen. Auf dem Beobachtungsschirm ergeben sich dann folgende Intensitätsverläufe:

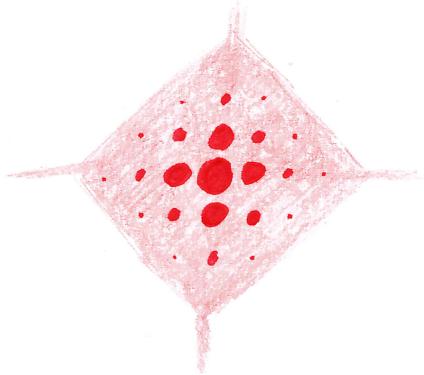


Abb. 9: Skizze des Primärbildes des Kreuzgitters

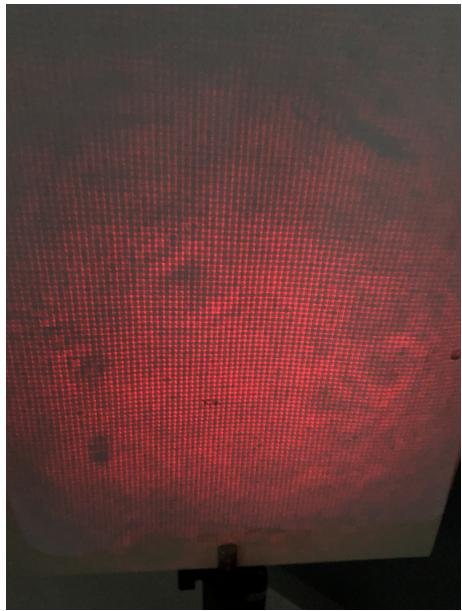


Abb. 10: Sekundärbild des Kreuzgitters

3.4 Doppelspalt statt Kreuzgitter, Irisblende

Nun wird das Kreuzgitter entfernt und ein Doppelspalt als Beugungsobjekt verwendet. Es wird in der Fokalebene von L_3 eine Irisblende eingefügt und nacheinander höhere Beugungsordnungen (Raumfrequenzen) ausgeblendet bis nur noch die nullte Ordnung die Blende passieren kann. Verkleinert man die Ordnungen immer weiter, so wird das Bild auf dem Beobachtungsschirm unschärfer und kleiner. Schließlich ist nur noch ein kleiner, unscharfer Punkt zu sehen. Es lässt sich also vermuten, dass die scharfen Abbildungen durch die hohen Ordnungen entstehen. Will man also bei optischen Geräten ein gutes Auflösungsvermögen haben, so ist darauf zu achten, dass hohe Ordnungen dargestellt werden.

3.5 Liniengitter und Mikroskop-Objektträger

Es wird Aufgabe 4) mit einem Liniengitter als Objekt wiederholt. Dann werden mithilfe der Mikroskop-Objektträger alle ungeraden Beugungsordnungen ausgeblendet. Geeignete Blenden lassen sich durch schwarze Striche auf den Objektträgern herstellen. Im primären Bild wird der Abstand der Punkte größer. Dies war zu erwarten, da alle ungerade Beugungsordnungen ausgeblendet werden. Im sekundären Bild lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Wird im Primärbild jede zweite Beugungsordnung ausgeblendet, so sollte sich die Liniendichte im Sekundärbild theoretisch verdoppeln. Dies ist jedoch bei Gittern mit kleinem Gitterabstand nur sehr schwer zu beobachten.

3.6 Kreuzgitter und Spaltblende

Bei diesem Versuchsteil wird wieder das Kreuzgitter als Beugungsobjekt verwendet. Mit einer Spaltblende werden alle horizontalen Beugungsordnungen ausgeblendet. Es lässt sich beobachten, dass im primären Bild nur senkrechte Punkte bleiben, wohingegen beim sekundären Bild keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden können, außer, dass weniger dargestellt werden. Theoretisch sollte das Sekundärbild zu dem eines Liniengitters werden. Dies konnte auch im nächsten Versuchsabschnitt festgestellt werden.

3.7 Drehen der Spaltblende

Nun wird die Spaltblende um die nullte Beugungsordnung herum gedreht und die Intensitätsverteilungen der sekundären Bilder aufgenommen.

Hält man die Spaltblende senkrecht, so werden die horizontalen Interferenzpunkte eliminiert, und es bleiben nur die senkrechten über. Das sekundäre Bild entspricht also dem eines senkrechten Liniengitters:



Abb. 11: Spaltblende senkrecht eingestellt

Hält man die Spaltblende waagrecht, so werden die senkrechten Interferenzpunkte eliminiert, und es bleiben nur die waagrechten über. Das sekundäre Bild entspricht also dem eines waagrechten Liniengitters:



Abb. 12: Spaltblende waagrecht eingestellt

Hält man die Spaltblende um beliebige Winkel schräg, so werden die höheren Ordnungen nicht vollständig eliminiert. Die „Streifen“ werden dem Winkel der Spaltblende entsprechend gedreht:

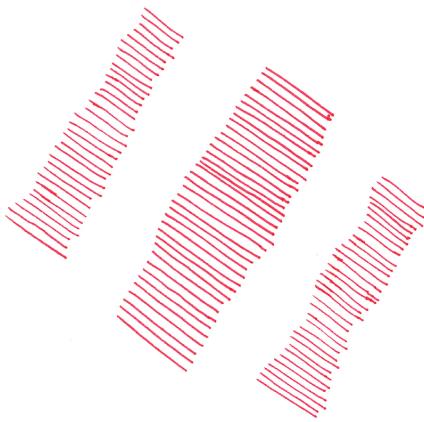


Abb. 13: Spaltblende um 45° gedreht

Das primäre Bild bleibt bei allen Winkeln ein kleiner Punkt. Es war schwer, die Spaltblende den exakten Winkeln entsprechend einzustellen.

3.8 Irisblende

Hier wird eine Irisblende benutzt. Diese wird so eingestellt, dass das Kreuzgitter gerade noch vollständig rekonstruiert werden kann. Die ist der Fall, als noch ungefähr 2 Beugungsordnungen auf dem Beobachtungsschirm zu sehen sind. Stellt man die Irisblende dahingegen so ein, dass nur noch die nullte Beugungsordnung zu sehen ist, so ist auf dem sekundären Bild nur noch ein Punkt zu beobachten. Daraus lässt sich folgern, dass mindestens die erste Beugungsordnung die Blende passieren können sollte. Problematisch war, dass die Irisblende nicht ganz zu schließen war.

4 Fazit

Leider hatten wir bei der Vorbereitungsaufgabe 7 ein Maß falsch berechnet, wodurch der Versuch am Anfang nicht geklappt hat. Als dieser Fehler jedoch behoben war, klappte er. Unsere Ergebnisse stimmen mit der Abbeschen Abbildungstheorie und den Vorbereitungsaufgaben überein. Außerdem wurde mir erst durch diesen Versuch richtig klar, was primäres und sekundäres Bild bedeutet. Zudem konnte ich einige Inhalte der Experimentalphysik 3 nun in die Praxis umsetzen. Ich kann diesen Versuch also empfehlen.

Literaturverzeichnis

- [1] Marten Scheuck Dr. Stephan Giglberger, Prof. Dr. Joe Zweck. *Versuch „of“: Optisches Filtern.* 7. Auflage 2019. Universität Regensburg.
- [2] <https://de.wikipedia.org/wiki/Linsengleichung>.
- [3] <https://www.physik.uni-muenchen.de/lehre>.
- [4] <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/aufweitung/974>.
- [5] <http://www.mikroskopie.de/kurse/wellenop.htm>.