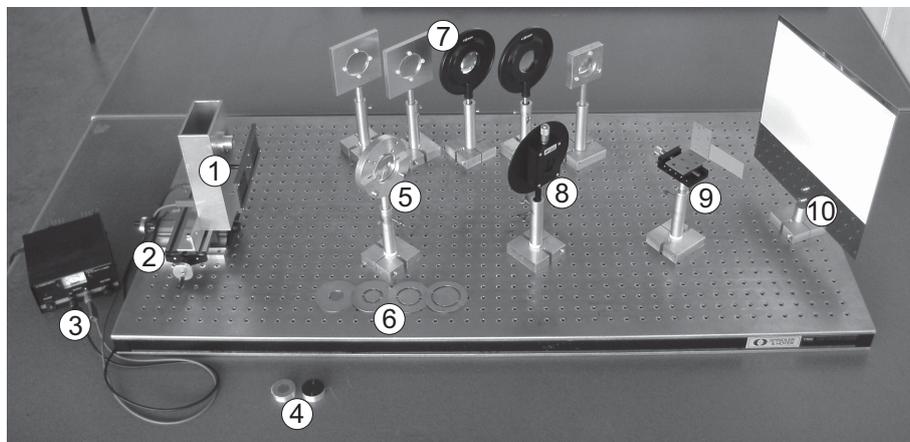


## 2 Optische Abbildung

In diesem Versuch werden Sie einige grundlegende Experimente und Untersuchungen zur optischen Abbildung durchführen. Dabei werden Sie auch sehen, dass in der Realität die optischen Komponenten zu Abbildungsfehlern führen und dass durch Beugungseffekte die Abbildung an prinzipielle Grenzen stößt. Am Beispiel der Schlierenoptik können Sie abschließend exemplarisch eine etwas speziellere optische Technik kennen lernen.



- |                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| ① LED-Lampe mit Farbfilter | ⑥ Blenden             |
| ② Kreuztisch               | ⑦ Diverse Linsen      |
| ③ Lampen-Netzgerät         | ⑧ Einstellbarer Spalt |
| ④ Abbildungsgegenstände    | ⑨ Schlieren-Kante     |
| ⑤ Linse mit Blendenhalter  | ⑩ Beobachtungsschirm  |

### 2.1 Einleitung

Optische Abbildungen gibt es nicht erst seitdem der Mensch das Schleifen von Linsen entwickelt hat, sondern auch die Natur verwendet dieses Phänomen. So wird im Auge von Tieren und auch des Menschen mit Hilfe einer Linse ein Abbild der Umgebung auf der lichtempfindlichen Netzhaut erzeugt. In der technischen Optik spielt die Abbildung eine zentrale Rolle, nicht nur bei weithin bekannten Geräten wie Fotoapparat, Mikroskop, Teleskop oder Videoprojektor, sondern auch in vielen anderen Geräten der industriellen Produktion und Analyse. Die Entwicklung von optischen Geräten und Methoden kann heutzutage ohne Übertreibung als eigene Ingenieurwissenschaft bezeichnet werden. Naturgemäß kann der vorliegende Versuch nur einige grundlegende aber trotzdem auch interessante Aspekte dazu beleuchten.

## 2.2 Grundlagen

### 2.2.1 Geometrische Optik

Bei sichtbarem Licht handelt es sich um elektromagnetische Wellen aus einem bestimmten Wellenlängenbereich. Dementsprechend können alle Phänomene der Optik (inklusive der optischen Abbildung) vollständig mit der Theorie der elektromagnetischen Wellen und ihrer Wechselwirkung mit Materie beschrieben werden. In vielen Fällen, insbesondere auch für das Verständnis der Funktionsweise von optischen Geräten wie z.B. des Mikroskops, ist diese vollständige Beschreibung jedoch nicht notwendig. Man kann sich hier auf die sogenannte "Geometrische Optik" beschränken. Diese Beschreibung ist (meistens) dann möglich, wenn die Abmessung eines optischen Strahlengangs und auch die Abmessung des abzubildenden Objekts sehr groß relativ zur Wellenlänge des Lichts ist. Bei der geometrischen Optik arbeitet man mit Lichtstrahlen, die keine laterale Ausdehnung aufweisen, und folgende Eigenschaften besitzen:

1. Ein Lichtstrahl breitet sich geradlinig im einheitlichen Medium aus.
2. Verschiedene Lichtstrahlen / Strahlenbündel sind unabhängig voneinander.
3. Der Strahlengang ist umkehrbar.
4. Es gelten das Brechungs- und das Reflexionsgesetz.

Das Brechungs- und das Reflexionsgesetz sind in Abbildung 2.1 veranschaulicht. In seiner

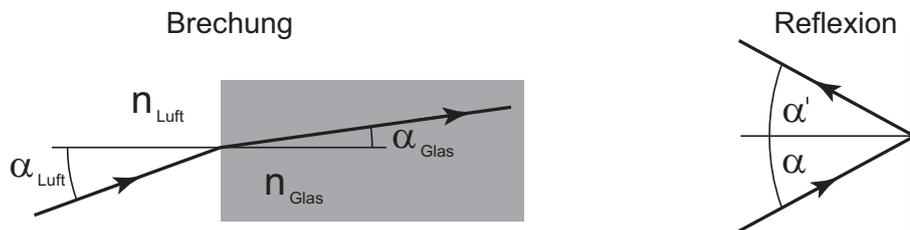


Abbildung 2.1: Brechung und Reflexion.

formelmäßigen Formulierung lautet das (Snelliussche) Brechungsgesetz für den Übergang von Luft in Glas (bzw. umgekehrt):

$$\frac{\sin \alpha_{\text{Luft}}}{\sin \alpha_{\text{Glas}}} = \frac{n_{\text{Glas}}}{n_{\text{Luft}}} = n_{\text{Glas}} \quad (2.1)$$

Die Winkel werden dabei jeweils zur Oberflächennormalen gemessen, für den Brechungsindex von Luft gilt in sehr guter Näherung  $n_{\text{Luft}} = 1$ . Das Reflexionsgesetz ist noch einfacher, es besagt, dass Einfallswinkel und Ausfallswinkel gleich sind, also  $\alpha = \alpha'$ .

### 2.2.2 Optische Linsen

Das Reflexions- und das Brechungsgesetz erlauben es nun, Lichtstrahlen bzw. ganze Strahlbündel für bestimmte Zwecke gezielt zu manipulieren. Konkret geschieht dies mit geeignet geformten Spiegeloberflächen, also mit Spiegel-Linsen, bzw. mit geeignet geformten transparenten (Glas)Körpern, also mit Brechungs-Linsen. Je nach Krümmung ihrer Oberfläche (konvex bzw. konkav) haben Linsen entweder eine sammelnde oder streuende Wirkung auf Licht. In diesem Versuch wollen wir uns allerdings auf Experimente mit

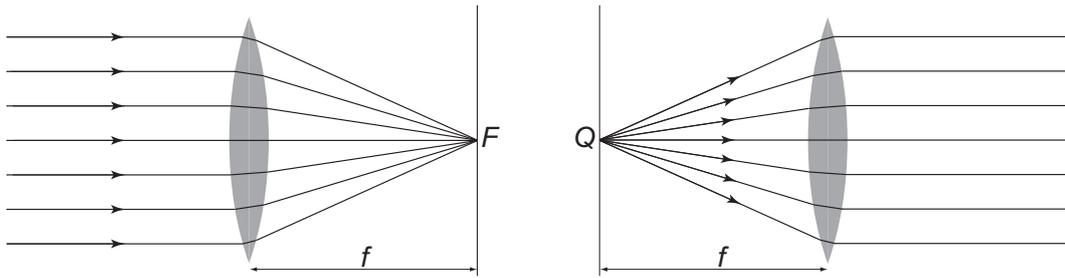


Abbildung 2.2: Wirkung einer idealen Sammellinse. Links: Parallel einfallendes Licht wird auf einen Punkt  $F$  in der Brennebene fokussiert. Rechts: Das divergente Licht einer Punktquelle  $Q$  in der Brennebene wird in ein exakt paralleles Lichtbündel transformiert.

Brechungs-Sammellinsen beschränken (obwohl alle anderen Linsentypen natürlich genauso wichtig sind). Die wichtigste Kenngröße einer Linse ist (neben des Durchmessers der Linse) ihre Brennweite  $f$ . In Abbildung 2.2 ist ersichtlich, welche Wirkung eine ideale Sammellinse auf Licht ausübt. Zum einen (linkes Teilbild) wird paralleles Licht exakt auf einen Punkt fokussiert. Dieser Punkt befindet sich in der Brennebene, also im Abstand der Brennweite  $f$  hinter der Linse. Die Linse wirkt so als Brennglas, man kann z.B. Sonnenlicht auf einen Punkt fokussieren. Andererseits (rechtes Teilbild) wird das Licht einer Punktquelle in exakt paralleles Licht transformiert, sofern sich die Punktquelle im Abstand der Brennweite  $f$  zur Linse befindet. Diese beiden Linsenwirkungen gehen durch Umkehrung des Strahlengangs ineinander über und erfüllen somit die oben formulierte 3. Eigenschaft der geometrischen Optik.

Ebenfalls ist in Abbildung 2.2 physikalisch korrekt dargestellt, dass die Lichtstrahlen sowohl an der Eintritts- wie auch an der Austrittsfläche der Linse gemäß des Brechungsgesetzes gebrochen werden. Innerhalb und außerhalb der Linse bewegen sich die Lichtstrahlen jeweils geradlinig. In der Realität sind Linsen natürlich räumliche, in der Regel rotationssymmetrische Gebilde. Die Symmetrieachse wird optische Achse genannt. Daher stellt Abbildung 2.2 und alle nachfolgenden Abbildungen eine Schnittabbildung entlang der optischen Achse dar.

Nicht alle Linsen haben die klassische, symmetrische Form wie z.B. die linsenförmige, bikonvexe Linse, sondern es gibt auch andere Bauformen. Häufig werden auch plankonvexe oder plankonkave Linsen verwendet, bei welchen eine Seite nicht gekrümmt sondern eben ist.

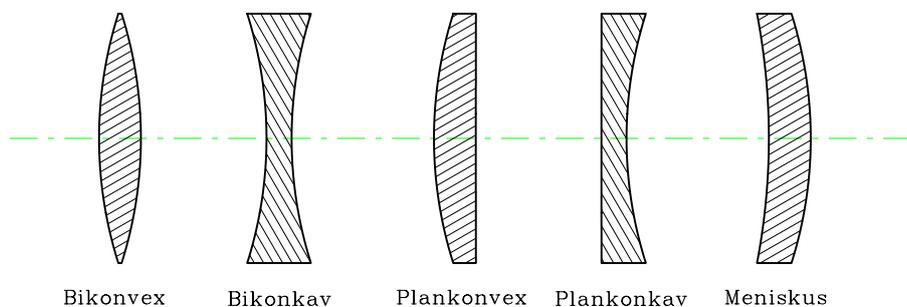


Abbildung 2.3: Gebräuchliche Linsenformen

### 2.2.3 Optische Abbildung

Im Prinzip reichen die in Abbildung 2.2 gezeigten Wirkungsweisen einer Sammellinse bereits aus, um sich klar zu machen, wie eine optische Punkt-zu-Punkt-Abbildung zu Stande kommt. Wir betrachten dazu die Abbildung der Spitze eines Gegenstandes  $G$  auf die Spitze des zugehörigen Bildes  $B$  in der Skizze 2.4. Dort sind drei Lichtstrahlen

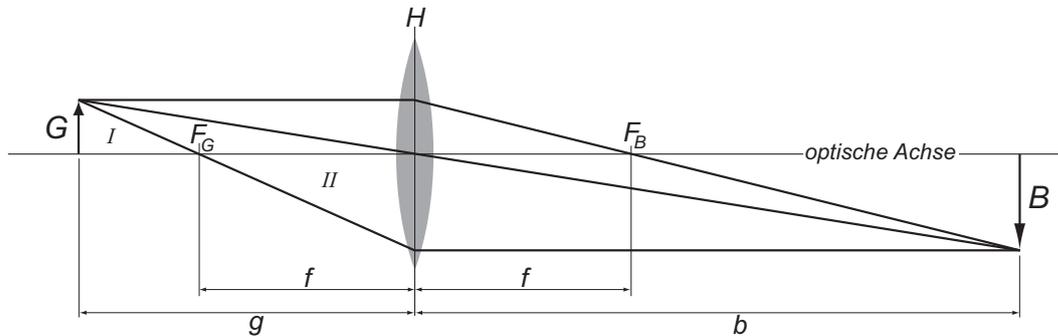


Abbildung 2.4: optische Abbildung mit einer Linse

ingezeichnet:

1. Der oberste der drei Strahlen läuft zunächst parallel zur optischen Achse und geht dann durch den bildseitigen Brennpunkt  $F_B$ . Diesen Strahl findet man auch in Abbildung 2.2 links wieder, wenn man den Strahl entsprechend verlängert.
2. Der unterste der drei Strahlen läuft zuerst durch den gegenstandsseitigen Brennpunkt  $F_G$  und dann parallel zur optischen Achse. Diesen Strahl erkennt man ebenfalls in Abbildung 2.2 rechts wieder (nach entsprechender Verlängerung).
3. Der mittlere Strahl ist der Mittelpunktstrahl, der ohne Ablenkung durch den Linsenmittelpunkt geht.

Alle diese drei von  $G$  ausgehenden Strahlen schneiden sich in einem Punkt, dem Bildpunkt bei  $B$ . Zur Konstruktion des Bildpunktes genügen natürlich zwei der drei eingezeichneten Strahlen. Sehr wichtig ist es jedoch sich klar zu machen, dass alle von  $G$  ausgehenden Strahlen, die die Linse treffen, zur optischen Abbildung beitragen, und nicht nur die drei exemplarisch eingezeichneten Strahlen! In der Regel sendet ein Gegenstandspunkt ja in alle Raumrichtungen Licht aus und nicht nur in speziell ausgezeichnete.

Darüberhinaus wurde in Abbildung 2.4 die übliche Vereinfachung durchgeführt, dass die ablenkende Wirkung der Linse auf eine Ebene in der Linsenmitte reduziert wird. Diese Ebene ist mit  $H$  bezeichnet und wird Hauptebene genannt.

### 2.2.4 Abbildungsmaßstab und Abbildungsgleichung

Wir wollen nun die optische Abbildung quantitativ untersuchen. Aus Abbildung 2.4 erkennt man bereits, dass sich die Größe von Gegenstand und Bild im Allgemeinen unterscheiden. Dies wird durch den Abbildungsmaßstab  $M$  zum Ausdruck gebracht. Wenn man sich den Mittelpunktstrahl zwischen Gegenstand und Bild betrachtet erkennt man

sofort, dass der Maßstab nur vom Verhältnis der Abstände zur Linse<sup>1</sup> abhängt:

$$M = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad (2.2)$$

Bei der Abbildung an einer Linse sind Bild und Gegenstand zueinander punktgespiegelt, das Bild steht auf dem Kopf.

Außerdem müssen die Größen  $f$ ,  $g$  und  $b$  eine bestimmte Relation zueinander erfüllen, damit eine scharfe Punkt-zu-Punkt-Abbildung vorliegt. Wir betrachten dazu die beiden mit  $I$  bzw.  $II$  markierten, ähnlichen Dreiecke in Abbildung 2.4. Der Strahlensatz liefert dazu:

$$\frac{f}{g-f} = \frac{B}{G} \quad (2.3)$$

Mit Gleichung 2.2 folgt daraus durch einfaches Umformen die wichtige Abbildungsgleichung:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (2.4)$$

Damit es zu einer Punkt-zu-Punkt-Abbildung wie in Abbildung 2.4 kommen kann, muss übrigens sowohl der Gegenstand wie auch das Bild mehr als die Brennweite von der Linse entfernt sein, es muss also gelten  $g > f$  und  $b > f$ . Einen Spezialfall stellt die Bedingung  $g = b = 2f$  dar, der Gegenstand wird dann mit einem Maßstab von 1 abgebildet. Zugleich ist dann auch der Gesamtastand  $g + b$  zwischen Gegenstand und Bild minimal.

### 2.2.5 Abbildungsfehler

Bei den bisherigen Betrachtungen sind wir von idealen Verhältnissen ausgegangen. So wird bei einer idealen optischen Abbildung ein Punkt in der Gegenstandsebene auf einen Punkt in der Bildebene abgebildet, und zwar z.B. unabhängig davon, ob sich der Gegenstandspunkt nah oder weit weg von der optischen Achse befindet, ob wir Strahlen durch die Linsenmitte oder den Linsenrand betrachten, oder ob wir weißes oder einfarbiges Licht für die Abbildung verwenden. In der Realität ist dies jedoch nicht zu erreichen, es kommt zu mehr oder weniger großen Abweichungen davon.

Der größte Abbildungsfehler ist natürlich derjenige, dass man die Abbildung nicht scharf stellt, also dass die Abbildungsgleichung 2.4 nicht erfüllt ist. Aber auch wenn wir von diesem vermeidbaren Fehler absehen, kommt es zu Abweichungen, sogenannten Aberrationen, die in der praktischen Realisierung der Linse zu suchen sind, also in ihrer Form und dem Material, aus dem die Linse besteht. Hierzu sollen im Folgenden einige einfache Aspekte (exemplarisch) näher betrachtet werden.

**Sphärische Aberration** Bis jetzt haben wir uns noch keinerlei Gedanken darüber gemacht, wie die Linsenoberflächen geformt sein müssen, um eine Abbildung damit zu erzielen. Die nach wie vor gebräuchlichsten Linsen sind sphärische Linsen, d.h. die Oberfläche ist Teil einer Kugeloberfläche mit einem bestimmten Radius. Dieser Radius bestimmt (neben dem Brechungsindex des Linsenmaterials) auch direkt die Brennweite der Linse. Aufgrund der einfacheren Herstellbarkeit wurden früher ausschließlich sphärische Linsen verwendet. Demgegenüber sind heutzutage bereits in vielen optischen Geräten asphärische Linsen (kurz genannt Asphären) mit speziell geformten Oberflächen verbaut<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>In vielen Lehrbüchern wird bei der Berechnung von abbildenden Systemen eine Vorzeichenkonvention eingeführt, sodass bestimmte Abstände positiv, andere negativ gezählt werden. Wir wollen auf diese Konvention, die für komplexere Berechnungen nützlich ist, an dieser Stelle verzichten.

<sup>2</sup>Z.B. lassen sich Linsen aus Kunststoff relativ leicht in spezielle, asphärische Formen bringen.

Bei der Verwendung einer sphärischen Linse tritt die in Abbildung 2.5 dargestellte, sphärische Aberration auf. Man erkennt deutlich, wie das Verhalten vom idealen Verhalten in

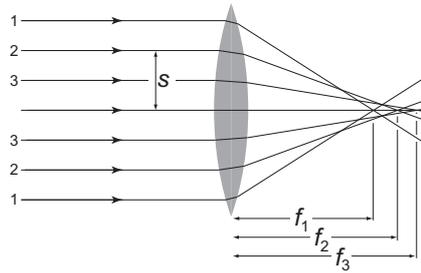


Abbildung 2.5: sphärische Aberration.

Abbildung 2.2 (links) abweicht. Die Brennweite hängt davon ab, in welchem Abstand  $s$  zur optischen Achse der Lichtstrahl die Linse durchquert, die Brennweite ist keine Konstante mehr sondern eine Funktion  $f(s)$ . Wie in Abbildung 2.5 ersichtlich wirkt dabei auf die achsenfernen Strahlen eine kürzere Brennweite als auf die achsennahen Strahlen. Dieses nichtideale Verhalten hat natürlich auch seine Auswirkungen auf die optische Abbildung (Skizze 2.4). Hier führt es dazu, dass (je nach radialer Ausleuchtung der Linse) aus einem Gegenstandspunkt ein verbreiteter, unscharfer Bildpunkt wird. Man findet dann beim Scharfstellen kein (beliebig) scharfes Abbild mehr, sondern nur noch einen besten Kompromiss.

**Chromatische Aberration** Neben der sphärischen Aberration, die in einer nichtidealen Form der Linsenoberfläche zu suchen ist, gibt es einen weiteren, charakteristischen Abbildungsfehler, der auf das Linsenmaterial zurückzuführen ist. Wie bereits diskutiert beruht die Wirkung einer Brechungslinse darauf, dass das Licht sowohl beim Linsen-Eintritt wie auch beim Linsen-Austritt an der Linsenoberfläche gemäß des Brechungsgesetzes (Gleichung 2.1) abgelenkt wird. Der Brechungsindex des Linsenmaterials  $n_{\text{Glas}}$  (Glas, aber oft auch transparenter Kunststoff) ist nun aber keine Konstante, sondern hängt bei genauer Betrachtung von der Wellenlänge  $\lambda$ , d.h. von der Farbe des Lichts, ab. Diese Abhängigkeit  $n_{\text{Glas}}(\lambda)$  wird als Dispersion bezeichnet. In einem Prismenspektrographen wird diese Eigenschaft dazu verwendet, Licht spektral in seine Wellenlängenkomponenten aufzuspalten (weißes Licht wird in die Regenbogenfarben zerlegt). Bei der Abbildung an einer Linse wirkt sich dies jedoch störend aus, die Brennweite wird wellenlängenabhängig, so wie in Abbildung 2.6 dargestellt. Bei einer Abbildung mit weißem Licht entsteht für die

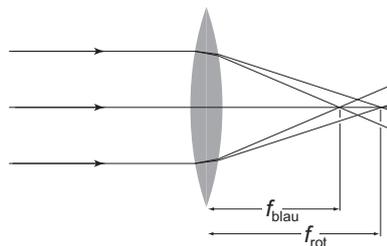


Abbildung 2.6: chromatische Aberration.

unterschiedlichen Farben kein gemeinsames Abbild mehr<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Hier sind Spiegeloptiken im Vorteil. Da beim Reflexionsgesetz der Brechungsindex keine Rolle spielt, sind Abbildungen mit Spiegellinsen frei von chromatischer Aberration.

### 2.2.6 Begrenzung der Abbildung durch Beugung

Die oben diskutierten Abbildungsfehler können zwar in der Realität für eine Abbildung durchaus limitierend wirken (wenn man sie nicht hinreichend korrigieren kann), allerdings stellen diese Abbildungsfehler keine prinzipielle physikalische Grenze dar. Es gibt jedoch einen Effekt, der die Abbildung prinzipiell limitiert. Dieser Effekt ist die Lichtbeugung und kann nur unter Berücksichtigung des Wellencharakters des Lichts verstanden werden, also nicht mehr im Rahmen der geometrischen Optik.

Wir betrachten zunächst die Beugung einer ebenen (Licht-)Welle an einem Einzelspalt in Abbildung 2.7.

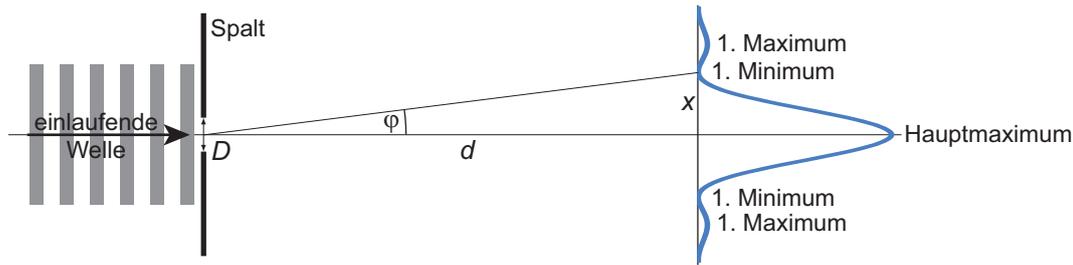


Abbildung 2.7: Beugung am Spalt.

Dabei bezeichnet  $D$  die Spaltbreite,  $d$  den Abstand zwischen Spalt und Beobachtungsschirm,  $\varphi$  den betrachteten Beugungswinkel und  $x$  die zugehörige Koordinate auf dem Schirm (vom Hauptmaximum aus gemessen). Für große Abstände vom Spalt (sogenanntes Fernfeld, also für  $d \gg D$ ) und unter der Näherung kleiner Beugungswinkel  $\varphi$  (also  $\sin \varphi \approx \tan \varphi$ ) gilt für die Intensitätsverteilung am Schirm (für die Wellenlänge  $\lambda$ )<sup>4</sup>:

$$I(x) \propto \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi D x}{\lambda d}\right)}{\frac{\pi D x}{\lambda d}} \right)^2 \quad (2.5)$$

Insbesondere kann man (mit Hilfe der Gangunterschiede) sehr einfach zeigen, dass für das 1. Minimum dann gilt:

$$\sin \varphi_{1.\text{Minimum}} = \pm \frac{\lambda}{D} \quad \text{bzw.} \quad x_{1.\text{Minimum}} = \pm \frac{\lambda d}{D} \quad (2.6)$$

Wir gehen nun zur optischen Abbildung zurück und betrachten eine Abbildung von zwei punktförmigen Objekten  $G_1$  und  $G_2$ . Die Beugung führt nun dazu, dass in der Bildebene keine punktförmigen Abbilder  $B_1$  und  $B_2$  entstehen, sondern Beugungsverteilungen mit jeweils einem Hauptmaximum an dem Ort, an welchem sich das ideale, punktförmige Bild befinden würde.

Man kann sich nun leicht vorstellen, dass man je nach Abstand der beiden Bildpunkte  $B_1$  und  $B_2$  und der Breite der Hauptmaxima die beiden Bilder noch getrennt wahrnehmen kann (so wie es auch in Abb. 2.8 gezeichnet ist), oder aber dass die beiden Bilder verschmelzen (wenn sich die Hauptmaxima deutlich überlappen). Als Kriterium dafür, dass man zwei Bildpunkte gerade noch getrennt auflösen<sup>5</sup> kann, bietet sich folgendes an: Liegen die Bildpunkte mindestens  $x_{1.\text{Minimum}}$  auseinander, so können die Bildpunkte noch aufgelöst werden. (Wenn also das Hauptmaximum des einen Punktes im 1. Minimum des anderen Punktes liegt, so sind die Punkte gerade noch auflösbar.)

<sup>4</sup>siehe z.B. [http://de.wikipedia.org/wiki/Optischer\\_Spalt](http://de.wikipedia.org/wiki/Optischer_Spalt)

<sup>5</sup>Was man im konkreten Fall genau unter Auflösung versteht ist letztlich eine Sache der Festlegung.

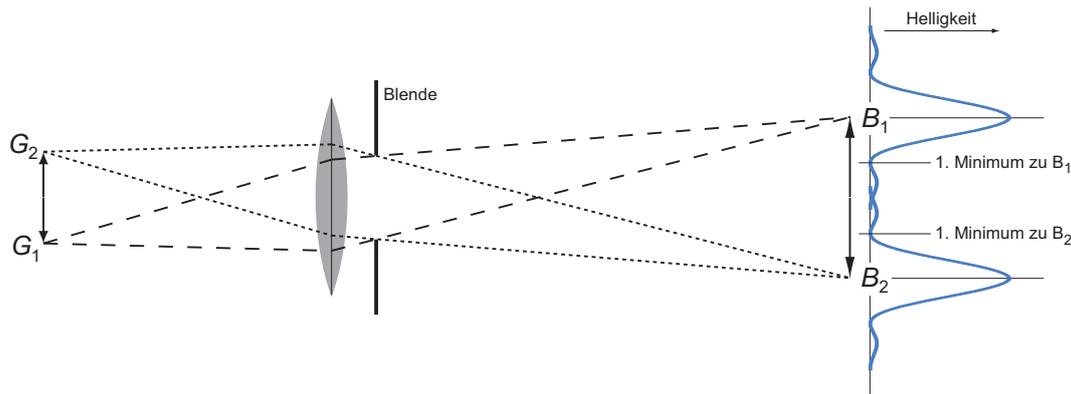


Abbildung 2.8: Abbildung mit Beugung.

Bei optischen Instrumenten in der Praxis hat man es normalerweise nicht mit spaltförmigen Blenden, sondern mit kreisförmigen Blenden zu tun (der begrenzte Durchmesser einer Linse stellt übrigens auch eine Blende dar). Dadurch entstehen dann Beugungsscheibchen umgeben von Beugungsringen (die Beugung tritt also in jeder Richtung entlang des Beobachtungsschirms auf). Bei der genauen Berechnung der Beugungsverbreiterung ergeben sich dann auch etwas andere Vorfaktoren.

## 2.3 Aufgaben

### Sicherheitshinweis

Die LED-Leuchte strahlt in einen begrenzten Winkelbereich ein relativ helles Licht ab. Vermeiden Sie es daher, insbesondere aus kurzer Entfernung, direkt in den Lichtkegel zu blicken! Drehen Sie die Helligkeit immer nur soweit hoch, wie es für die jeweilige Aufgabe notwendig ist.

### 2.3.1 Optische Abbildung mit einer Linse

#### Linsgleichung und Abbildungsmaßstab

In dieser ersten Aufgabe sollen einige grundlegende Messungen an einer optische Abbildung durchgeführt werden. Verwenden Sie als Abbildungs-Gegenstand zunächst das TUM-Logo, setzen Sie dieses dazu direkt auf die LED-Beleuchtung. Stellen Sie den Schirm in einer Entfernung von ca. 60 cm zum Gegenstand auf und schrauben Sie ihn am Tisch fest. Als Linse soll die bikonvexe Linse mit 100 mm Brennweite in der speziellen Halterung, zunächst ohne eingelegte Blende, verwendet werden.

- Schalten Sie nun die LED-Lampe ein, es soll sich dabei kein Farbfilter vor der Lampe befinden.
- Verschieben Sie die abbildende Linse in größeren Schritten zwischen Gegenstand und Schirm hin und her. Wie viele Positionen gibt es, an denen Sie ein scharfes Bild beobachten?
- Stellen Sie die Linse nun zunächst an diejenige Stelle, die eine scharfe Abbildung ergibt und sich vom Gegenstand weiter weg befindet. Messen Sie die Gegenstandsweite  $g$  und die Bildweite  $b$ . Setzen Sie die Werte in die Abbildungsgleichung 2.4

ein. Können Sie (mit der gegebenen Brennweite  $f$ ) bestätigen, dass die Gleichung erfüllt ist? Berechnen Sie den Abbildungsmaßstab  $M = b/g$ .

- Verschieben Sie die Linse nun an diejenige Stelle, die eine scharfe Abbildung ergibt und sich näher am Gegenstand befindet. Messen Sie wieder  $g$  und  $b$  und setzen Sie die Werte wieder in die Abbildungsgleichung ein. Können Sie auch hier die Gültigkeit bestätigen? Welcher Abbildungsmaßstab ergibt sich nun?
- Für die momentan aufgebaute Abbildung soll nun der Abbildungsmaßstab experimentell bestimmt werden. Verschieben Sie dazu mit dem Kreuztisch LED-Lampe + Gegenstand transversal zur optischen Achse um genau 5 mm. Wie weit hat sich das Abbild auf dem Schirm verschoben? Das Verhältnis der Verschiebung am Schirm zur Verschiebung am Gegenstand ergibt den Abbildungsmaßstab. Stimmt dieser mit dem vorhin berechneten Wert überein?
- Verschieben Sie den Gegenstand nochmals. Wie ist die Richtung dazu auf dem Schirm orientiert? Können Sie bestätigen, dass das Bild gespiegelt ist?
- Drehen Sie nun den Gegenstand um die optische Achse. Dreht sich das Bild in die gleiche Richtung oder nicht?

### 2.3.2 Linsenfehler

In diesem Aufgabenteil wollen wir uns die Qualität der Abbildung etwas genauer betrachten und die auftretenden Abbildungsfehler untersuchen. Dabei werden wir uns auf die sphärische und chromatische Aberration beschränken.

#### Sphärische Aberration

- Wir verwenden nun einfach die Anordnung, die aus dem letzten Experiment noch aufgebaut ist (also vergrößernde Abbildung mit der Linse mit  $f = 100$  mm). Allerdings ersetzen wir den bisherigen Abbildungsgegenstand durch das feinmaschige Edeldahlgitter. Versuchen Sie nun das Bild möglichst gut scharf zu stellen. Verschieben Sie dazu aber nicht mehr die Linse, sondern verwenden Sie den Kreuztisch, um den Abbildungsgegenstand in kleinen Schritten in Richtung der optischen Achse zu verschieben. Können Sie eine Position finden, an dem das Bild ideal scharf erscheint?
- Schrauben Sie nun zunächst den Linsenfuß am Tisch fest und legen Sie dann die Blende Nr. 1 (mit der kreisförmigen Öffnung, mittlerer Öffnungsradius  $s = 6$  mm) in den Blendenhalter direkt vor bzw. nach der Linse ein. Das Bild erscheint nun deutlich dunkler, da nur noch ein Viertel des Lichtes die Linse passieren kann. Stellen Sie die Abbildung erneut scharf. Können Sie bestätigen, dass das Bild schärfer als ohne Blende ist? (Insbesondere sollte der diffuse, kontrastreduzierende Hintergrund verschwunden sein.)  
Anmerkung: Sie haben soeben die einfachste aber zugleich auch effektive Methode kennengelernt, Abbildungsfehler zu reduzieren. Allerdings erkaufte man sich dies durch eine drastische Reduktion der Bildhelligkeit.<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Eine gute und zugleich lichtstarke Abbildung zu erhalten ist die Kunst bei der Entwicklung von optischen Systemen. In der Regel ist dies nur durch eine Kombination mehrerer Einzellinsen zu erreichen.

- Nun wollen wir die sphärische Aberration etwas genauer betrachten. Drehen Sie zunächst den roten oder blauen Farbfilter (nach Ihrer Wahl) vor den Gegenstand, um die chromatische Aberration (weitgehend) auszuschalten. Bei fester Bildweite  $b$  soll nun quantitativ untersucht werden, wie sich die Gegenstandsweite  $g$  mit dem Abstand  $s$  der Linsenausleuchtung ändert (siehe Abbildung 2.5). Dabei interessieren nicht die absoluten Längen  $g$ , sondern nur die Änderungen  $\Delta g$ . Als Nullpunkt  $\Delta g = 0$  verwenden wir die Position (scharfes Abbild mit Farbfilter!) mit der Blende Nr. 1. (Drehen Sie den Skalenring an der Kurbel am Kreuztisch auf Null.)
- Ersetzen Sie nun die Blende durch die Blende Nr. 2 (mit der ringförmigen Öffnung, mittlerer Öffnungsradius  $s=14,5$  mm) und stellen Sie die Abbildung mit dem Kreuztisch wieder scharf. Lesen Sie die Änderung  $\Delta g$  ab.
- Wiederholen Sie die obige Aufgabe mit den Blenden Nr. 3 (mittlerer Öffnungsradius  $s=18,9$  mm) und Nr. 4 (mittlerer Öffnungsradius  $s=22,4$  mm).
- Tragen Sie in einem Diagramm (linear-linear) die Werte  $\Delta g$  über den zugehörigen Werten für den mittleren Öffnungsradius  $s$  auf. Welchen Kurvenverlauf vermuten Sie aufgrund Ihrer Daten und was bedeutet dies qualitativ?

### Chromatische Aberration

- Legen Sie nun nochmals die Blende Nr. 2 ein. Drehen Sie das rote Farbglas in den Strahlengang und stellen Sie die Abbildung scharf. Wechseln Sie nun zum blauen Farbglas und stellen Sie wieder scharf. Wie groß ist der Unterschied  $\Delta g$  der Gegenstandsweite? Berechnen Sie die relative Änderung  $\Delta g/g$ .
- Bei welcher Farbe hat die Linse die kleinere Brennweite?

### 2.3.3 Beugungsbegrenzung der Abbildung

Mit dem bestehenden Aufbau werden wir im Folgenden untersuchen, wie durch Beugung eine optische Abbildung limitiert wird.

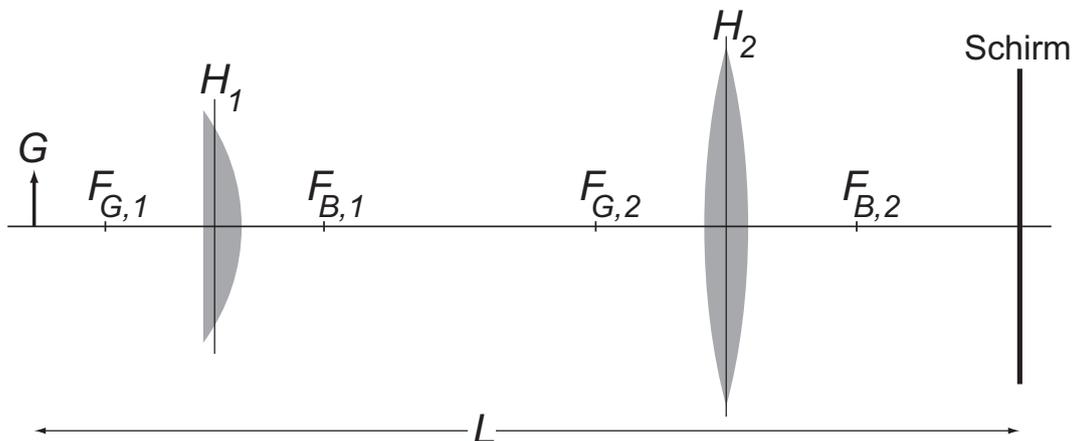
- Entfernen Sie die ringförmige Blende und stellen Sie die Abbildung scharf, verwenden Sie dazu wieder weißes Licht. Drehen Sie falls notwendig das Edelmetallgitter so, dass die Gitterstege waagrecht und senkrecht verlaufen. Stellen Sie nun den einstellbaren Spalt direkt hinter die Linse, der Spalt soll zunächst mindestens 2 mm geöffnet sein. Drehen Sie die Lichtstärke auf maximal.  
**Achtung:** Gehen Sie bitte vorsichtig mit dem Spalt um. Drehen Sie insbesondere beim Schließen des Spalts nicht über den Nullpunkt hinaus!
- Schließen Sie nun kontinuierlich den Spalt. Ab einer bestimmten Spaltbreite sollten Sie eine signifikante Änderung des Abbilds beobachten können (abgesehen davon, dass die Helligkeit des Bildes sehr stark zurück geht). Was beobachten Sie?
- Lesen Sie die Spaltbreite ab, bei der diese Änderung in etwa eintritt. Berechnen Sie damit und mit Gleichung 2.6 den Wert für den Betrag von  $x_{1,\text{Minimum}}$ , den man aufgrund der Beugung erwarten kann. Da es hier nur um eine Abschätzung geht können Sie einfach  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$  (grünes Licht) einsetzen.
- Wenn Sie die Abmessungen des Bildes auf dem Schirm genauer betrachten, können Sie die Beobachtung beim Schließen des Spalts mit dem eben berechneten Wert plausibel erklären?

- Drehen Sie das Gegenstands-Gitter um die optische Achse. Ist das beobachtete Verhalten plausibel?

Hinweis zur Bedeutung dieses Versuchs: Durch das Schließen des Spalts haben wir hier Beugungseffekte sozusagen künstlich provoziert, was man natürlich in der Praxis bei irgend einem optischen Gerät nicht machen wird. Trotzdem ist es genau der beobachtete Beugungseffekt, der auch im besten Mikroskop oder Teleskop die Auflösung begrenzt.

### 2.3.4 Zweistufige Abbildung

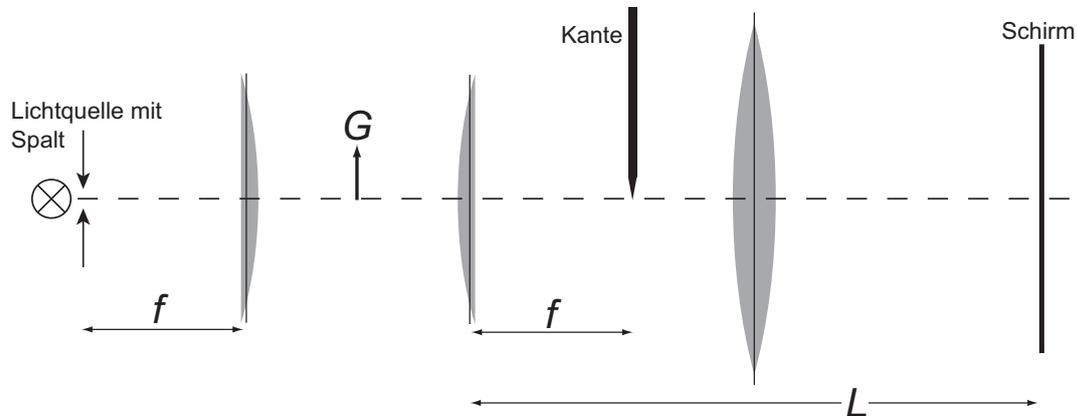
Bis jetzt wurde unser Gegenstand mit Hilfe einer Linse auf den Schirm abgebildet. Es ist jedoch auch möglich, das entstehende Bild als Ausgangsobjekt für eine weitere Abbildung zu verwenden (Abbildung mit Zwischenbild). Dies soll im Folgenden untersucht werden. Bauen Sie nachfolgend gezeigte Anordnung auf, der Gesamtabstand zwischen Gegenstand und Schirm soll  $L = 80$  cm betragen. Wir verwenden dazu die beiden kurzbrennweitigen Linsen (1. Linse: plankonvex,  $f = 3,5$  cm, 2. Linse: bikonvex,  $f = 5$  cm). Achten Sie bei der plankonvexen Linse auf die Orientierung.



- Justieren Sie die erste Linse so, dass sich das Zwischenbild genau in der Mitte zwischen Gegenstand und Schirm befindet. Diese erste Abbildungsstufe soll dabei eine Vergrößerung erzielen. (Hinweis: Die in der Skizze dargestellten Abstandsverhältnisse können im Experiment ganz anders sein.)
- Justieren Sie die zweite Linse nun so, dass sich auf dem Schirm ein scharfes, nochmals vergrößertes Bild ergibt. (Hier können Sie einen weiteren Abbildungsfehler sehen, die sogenannte kissenförmige Verzeichnung.)
- Verschieben Sie den Gegenstand mit dem Kreuztisch um 1 mm senkrecht zur optischen Achse. Wie weit verschiebt sich das Bild auf dem Schirm? Bestimmen Sie daraus den Abbildungsmaßstab. Welche Orientierung hat das Bild relativ zum Gegenstand?
- Konstruieren Sie direkt in die obige Skizze (mit Hilfe der Brennpunkte und der Hauptebenen) die gesamte Abbildung bis zum Schirm. (Wenn Sie es richtig gemacht haben, landen Sie auch direkt auf dem eingezeichneten Schirm.)

### 2.3.5 Schlierenoptik

Zum Abschluss soll nun noch eine etwas speziellere, aber interessante optische Anordnung aufgebaut werden.



- Dazu benötigen wir eine spaltförmige Lichtquelle. Dies erreichen wir, indem das Gegenstands-Gitter durch den Spaltaufsatz (Spaltbreite ca. 0,5 mm) ersetzt wird. Der Spalt soll dabei senkrecht zur Tischebene orientiert sein.
- Stellen Sie nun die beiden plankonvexen Linsen mit  $f = 200$  mm in der gezeigten Weise auf. Der Abstand zwischen den beiden Linsen ist unkritisch, wählen Sie z.B. irgend einen Wert zwischen 10 cm und 15 cm. Wenn Sie nun den Schirm in die Brennebene der zweiten Linse stellen (also Abstand  $f$ ), sollten Sie sehen können, dass dort der Lichtspalt scharf abgebildet wird.
- Schieben Sie nun den Schirm soweit weg, dass der Abstand zur zweiten Linse ungefähr  $L = 50$  cm beträgt. Stellen Sie in die Mitte zwischen die beiden Linsen einen beliebigen Gegenstand  $G$  (z.B. ein Lineal). Bilden Sie mit einer dritten Linse (bikonvex,  $f = 150$  mm) den Gegenstand scharf auf den Schirm ab.
- Nun kommt der entscheidende Schritt: Stellen Sie die Kante (Schlierenkante) an die Stelle, an welcher der Spalt scharf abgebildet wird. Schieben Sie nun die Kante soweit in den Strahlengang, dass nur noch sehr wenig Licht am Schirm ankommt. Dabei sollte von links nach rechts ein Farbverlauf sichtbar sein.
- Untersuchen Sie nun folgende Objekte als Gegenstand  $G$ : Feuerzeugflamme (von unten), Feuerzeuggas (von oben), Heißluftfön (kurz nach dem Abschalten), Luftaustritt der Druckluftpistole  
Können Sie die "Schlieren" beobachten?