

Dünne Linsen

Stichworte zur Vorbereitung:

Grundwissen: Brennweite, konkave/konvexe Linsen, Laplace'sche Methode, Bessel-Verfahren, Linsenschleiferformel/Abbildungsgleichung, Snellius'sches Brechungsgesetz,
Weiterführend: Abbildungsfehler, Teleskop, Kondensor

1 Grundlagen

Eine „ideale“ optische Abbildung besteht darin, dass ein Teil der von einem Gegenstandspunkt P (Objektpunkt) ausgehenden Lichtwellenzüge (oft als Lichtwellen bezeichnet) durch ein optisches System (Linsen, Spiegel, Objektive) erfasst und in einem Bildpunkt P' wieder vereinigt wird (siehe Abb. 1). Das Bild ist dann mit dem Gegenstand konform (winkeltreu). Sind die Abmessungen von Gegenstands- bzw. Bildgröße, Linsen- bzw. Spiegelgröße groß gegenüber der Lichtwellenlänge, so ergibt sich eine Vereinfachung der optischen Abbildung insofern, als die Wellennatur des Lichtes nicht berücksichtigt werden muss. Man gelangt zur sogenannten geometrischen Optik, der das Prinzip von Fermat vorangestellt werden soll:

Jeder Lichtstrahl ausgehend von einem Objektpunkt wählt seinen Weg zu einem anderen Punkt (Bildpunkt) derart, dass die dafür erforderliche Zeit ein Minimum wird.

Mit diesem Prinzip lassen sich die Gesetze der Brechung, der Reflexion und der optischen Abbildung herleiten. Weiters bekommt der Brechungsindex n als „Verzögerungsfaktor der Lichtgeschwindigkeit in dem betreffenden Medium“ eine anschauliche Bedeutung (siehe Demtröder Band 2 Kapitel 8.1).

Unter bestimmten Voraussetzungen kann eine Sammellinse einen Gegenstandspunkt in einen Bildpunkt abbilden. Dazu werden die Gegenstandsweite g , die Bildweite b und die Brennweite f benötigt. Der Zusammenhang zwischen g , b und f ist durch die Laplace'sche- und die Newton'sche Abbildungsgleichung gegeben (siehe Demtröder Band 2, Kap. 9).

2 Versuchsaufbau

2.1 Laplace'sche Methode

Durch Messen von g und b bei „scharfer“ Abbildung kann die Brennweite f dünner Sammellinsen aus der Laplace'schen Abbildungsgleichung bestimmt werden:

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

Die Scharfstellung erfolgt bei Beleuchtung des Objektes mit weißem Licht und der Verwendung von unkorrigierten Linsen. Beim Ablesen der Weite auf der Messlatte ist auf mögliche Diskrepanzen der Reitermarken mit den entsprechenden Ebenen zu achten.

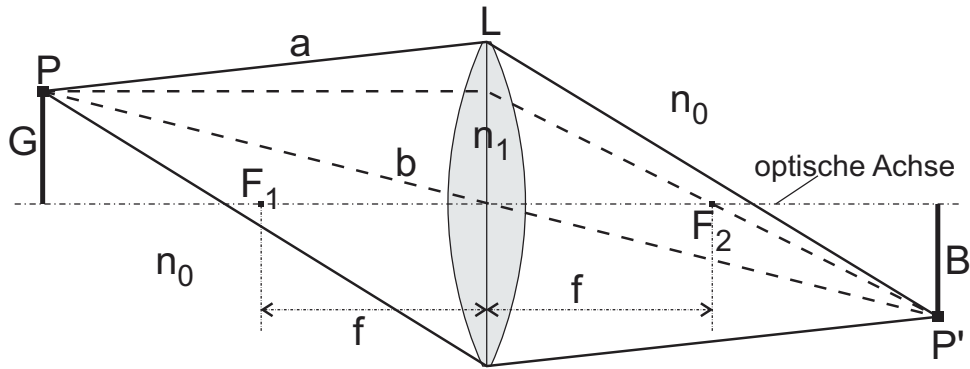


Abbildung 1: Gesamtbündeldarstellung der reellen Abbildung eines Objektpunktes auf den Bildpunkt bei einer Sammellinse. G Gegenstand, B Bild, L Linse, P Objektpunkt, f Brennweite, P' Bildpunkt, F_1 , F_2 Brennpunkte, $n_0 = 1$ Brechungsindex Vakuum, n_1 Brechungsindex Linienmedium, a , b Lichtwege, $c_0 \approx 3 \times 10^8$ m/s Vakuumlichtgeschwindigkeit, n Brechungsindex, Brechungskoeffizient oder Brechzahl, $c = c_0/n$ Lichtgeschwindigkeit im Medium mit der Brechzahl n , $n_1 = c_0/c_1$ Brechzahl Medium 1 mit Lichtgeschwindigkeit c_1 .

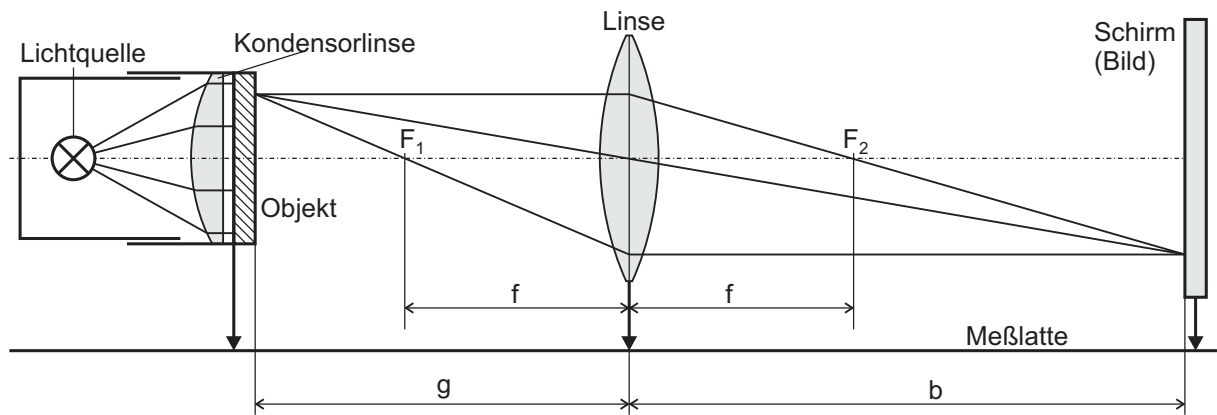


Abbildung 2: Schema des Aufbaues. Bildkonstruktion für einen Objektpunkt nach der geometrischen Optik. g Gegenstandsweite, b Bildweite, f Brennweite.

2.2 Bessel'sches Verfahren

Hier wird der Grundsatz von der Umkehrbarkeit der Lichtwege ausgenutzt. Es gelingt unter der Voraussetzung $g + b > 4f$ für zwei Gegenstands- bzw. Bildweiten je eine reelle Abbildung zu erhalten (Abb. 3). Die Brennweite steht mit der dazu notwendigen Verschiebung e und dem Gesamtabstand $g + b = a$ in folgendem Zusammenhang:

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{a^2 - e^2}{a} \right) \quad (2)$$

2.3 Zerstreuungslinse

Mit einer Zerstreuungslinse allein gelingt keine reelle Abbildung. Gegenstand und Bild liegen auf derselben Seite. Die Messung der Brennweite erfolgt in diesem Fall durch Kombination mit einer Sammellinse geeigneter Brennweite nach zwei Methoden:

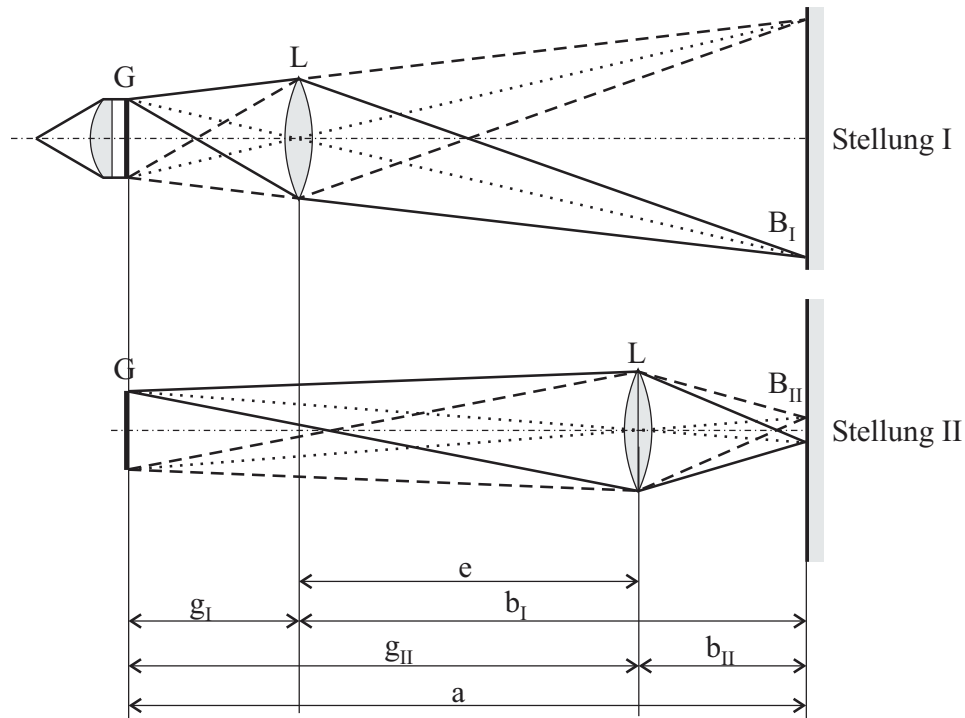


Abbildung 3: Die Bessel'sche Anordnung zur Messung der Brennweite. G Gegenstand, L Linse, e Verschiebung, a Gesamtabstand, g_I, g_{II} Gegenstandsweiten, b_I, b_{II} Bildweiten.

2.3.1 Methode 1

Veränderung des Bildabstandes einer reellen Abbildung durch eine Zerstreuungslinse (Abb. 4). Eine Sammellinse L_1 erzeugt von G im Abstand b' ein reelles Bild B' , das als „Gegenstand“ für die Abbildung mit der nachträglich eingebrachten Zerstreuungslinse L_2 dient. Man erhält ganz analog aus der Abbildungsgleichung:

$$\frac{1}{f_s} = \frac{1}{g'} + \frac{1}{b} \quad (3)$$

also eine negativ zu zählende Brennweite f_2 .

2.3.2 Methode 2

Verändert man den Abstand der Zerstreuungslinse L_2 von B' derart, dass $g' = -f_2$ wird (Abb. 5), so rückt das Bild B ins Unendliche, was mit einem auf „Unendlich“ justierten Fernrohr festgestellt werden kann, und eine direkte Brennweitenbestimmung leicht ermöglicht. Die Justierung des Fernrohres auf „Unendlich“ erfolgt durch Anvisieren eines sehr weit entfernten Gegenstandes hohen Kontrastes. Dies ergibt in sehr guter Näherung Unendlichstellung.

3 Fragen

1. Leiten Sie das Snellius'sche Brechungsgesetz auf Grund des Fermat'schen Prinzips ab.
2. Ableitung der Brennweitengleichung für das Bessel'sche Verfahren aus der

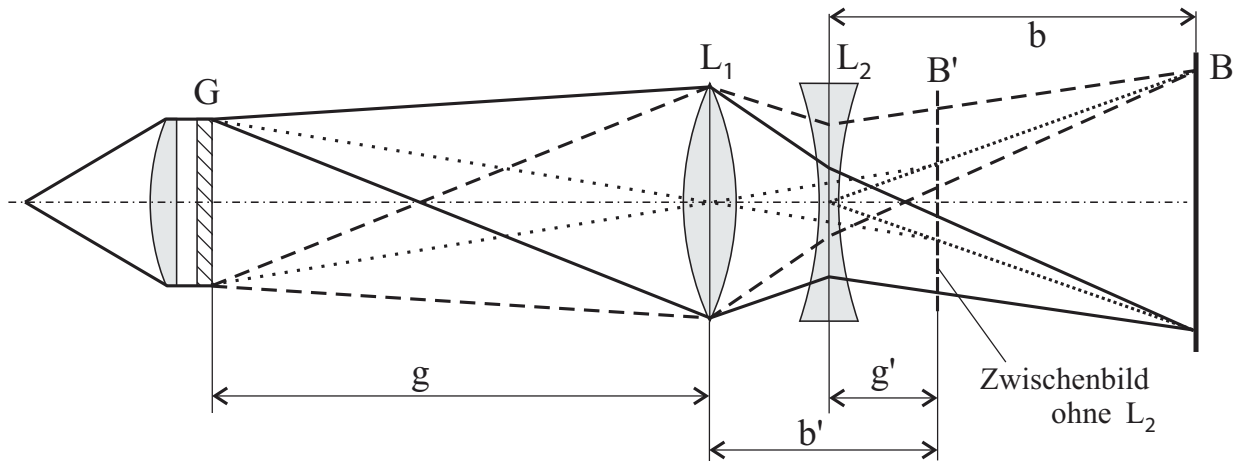


Abbildung 4: Kombination einer Sammellinse mit einer Zerstreuungslinse. G Gegenstand, L_1 Sammellinse, L_2 Zerstreuungslinse, B' Bild mit L_1 ohne L_2 , B Bild mit L_1 und L_2 , g, g' Gegenstandsweite, b, b' Bildweite.

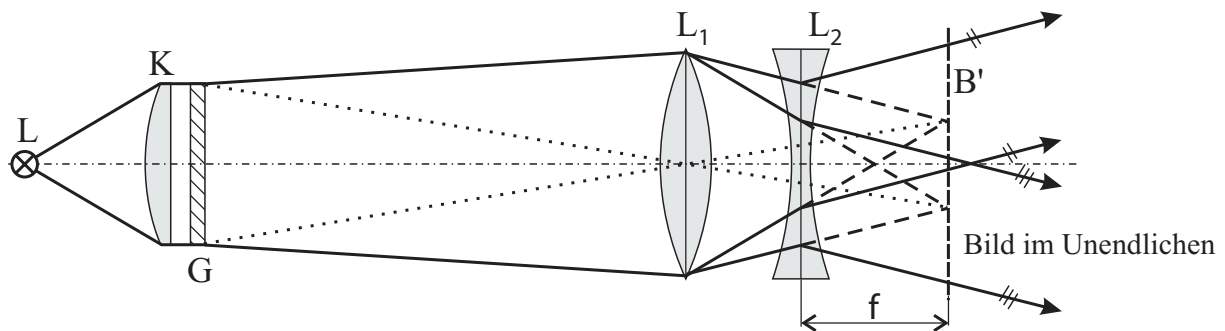


Abbildung 5: Kombination einer Sammellinse mit einer Zerstreuungslinse. G Gegenstand, L_1 Sammellinse, L_2 Zerstreuungslinse, B' Bild nur durch Sammellinse, B Bild im Unendlichen, L Lichtquelle, K Kondensor, f_2 Brennweite der Zerstreuungslinse.

Abbildungsgleichung und Ableitung der Linsenmacherformel

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (4)$$

3. Was ist Tiefenschärfe und wie hängt sie mit dem Blendendurchmesser zusammen?
4. Skizzieren Sie für eine Sammellinse und eine Zerstreuungslinse die Bildkonstruktion und den tatsächlichen Strahlungsverlauf für $g > 2f$, $g > f$, $g < f$, $g < f/2$ (Gesamtbündeldarstellung und Konstruktion nach geometrischer Optik).
5. Wo in einer Abbildung kann man den Bildausschnitt verändern?
6. Die wichtigsten Linsenfehler und deren Korrektur.
7. Die Funktionsweise eines Kondensors ist zu erklären (Bildkonstruktion und Strahlengang für die Abbildung mit und ohne Kondensor).
8. Das menschliche Auge.

4 Aufgaben

1. Nur für Physiker: Justieren der optischen Anordnung mittels Laser und Lochblende.
2. Die Brennweite einer dünnen Sammellinse ist nach (2.1) zu messen (10 verschiedene Messungen!).
Linsen werden vom Betreuer ausgegeben. Es ist die volle Länge der optischen Bank auszunutzen, dann den Schirm um jeweils 10 cm in Richtung Objekt verschieben und Bild erneut scharfstellen. Für 10 verschiedene Abstände $f < g < 2f$ ist der zugehörige Bildabstand b im Diagramm $1/b$ als Funktion von $1/g$ aufzutragen. Gleicher, geeigneter Maßstab für x- und y-Achse! Die Ausgleichskurve wird eine zur ersten Mediane senkrechte Gerade, die auf der Ordinaten- und auf der Abszissenachse jeweils gleiche Strecken von der Länge der reziproken Brennweite $1/f$ abschneidet. Die Maßzahl der Brechkraft $D = 1/f$ (in Dioptrien) kann unmittelbar an der Achse abgelesen werden. Die derart erhaltene Brennweite ist mit der aus den Einzelmessungen bestimmten Brennweite zu vergleichen.
3. Für 5 verschiedene Gesamtabstände a ist die Brennweite derselben Linse nach dem Bessel'schen Verfahren (2.2) zu kontrollieren.
4. Es ist nach (2.3.1) die Brennweite einer Zerstreuungslinse zu messen (10 verschiedene Messungen!).
Es sind 10 Messungen für verschiedene g' , b durchzuführen. Kontrolle der Brennweite nach (2.3.2).
5. Versuchen Sie, ob Sie einige Linsenfehler durch geeignetes Experimentieren darstellen können.

Hinweis zur Unsicherheitsanalyse: Beachten Sie, dass die einzelnen Methoden zwar verschieden große Unsicherheiten haben, die Brennweite der Linse sich aber bei allen Versuchen gleich ergeben muß!

Literatur

- [1] Demtröder, *Experimentalphysik* Band 2 (Kapitel 9 Geometrische Optik).
- [2] Bergmann-Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik* Bd. III, Walter de Gruyter, Berlin, 1989.
- [3] Walcher, *Praktikum der Physik*.
- [4] Handapparat des Praktikums.