

## Versuchsanleitung 0 2 : ABBESches Verfahren

### 1 Einleitung

Um eine optische Abbildung mit hoher Abbildungsgüte (hinsichtlich Schärfe, Bildhelligkeit, Verzeichnungsfreiheit, Astigmatismus, Farbwiedergabe u. a.) zu gewährleisten, bedarf es des Einsatzes von Linsensystemen. Einzellinsen sind dafür aufgrund ihrer zahlreichen Abbildungsfehler (z. B. chromatische und sphärische Aberrationen, Verzeichnung und Astigmatismus) nicht geeignet. In Linsensystemen werden die Einzellinsen in einer oder mehreren Gruppen so zusammengestellt, dass ihre Abbildungsfehler kompensiert oder wenigstens reduziert werden.

Natürlich ist es aufgrund der vielen in einem System befindlichen brechenden Flächen nicht einfach, den Strahlengang durch das System hindurch zu verfolgen, um die Berechnung oder Konstruktion eines Bildes vorzunehmen. Abhilfe schafft hier das Hauptebenenmodell, das mit den Systembrennpunkten und Hauptflächen nur noch die für die Abbildung wichtigsten Eigenschaften enthält.

Das Modell muss natürlich für ein bestimmtes Linsensystem immer erst aufgestellt werden. Sind Eigenschaften und Anordnung der Systemkomponenten bekannt, geschieht das durch Rechnung und/oder Konstruktion, anderenfalls auf experimentellem Wege wie im vorliegenden Versuch.

### 2 Grundlagen

Es soll zunächst eine sogenannte dünne Linse betrachtet werden, deren Dicke (Abstand der Durchstoßpunkte der optischen Achse durch die Linsenflächen) klein gegen die Beträge ihrer Krümmungsradien sein soll.

Die Bildkonstruktion soll nur mit sogenannten Paraxialstrahlen, die nahe der optischen Achse und unter kleinem Winkel zu dieser auf die Linse treffen, erfolgen.

Unter diesen Voraussetzungen wird sicher kein großer Fehler begangen werden, wenn die Brechung der Lichtstrahlen nicht (wie tatsächlich) an den Linsenflächen sondern an der Ebene H vorgenommen wird (vgl. Bild 1).

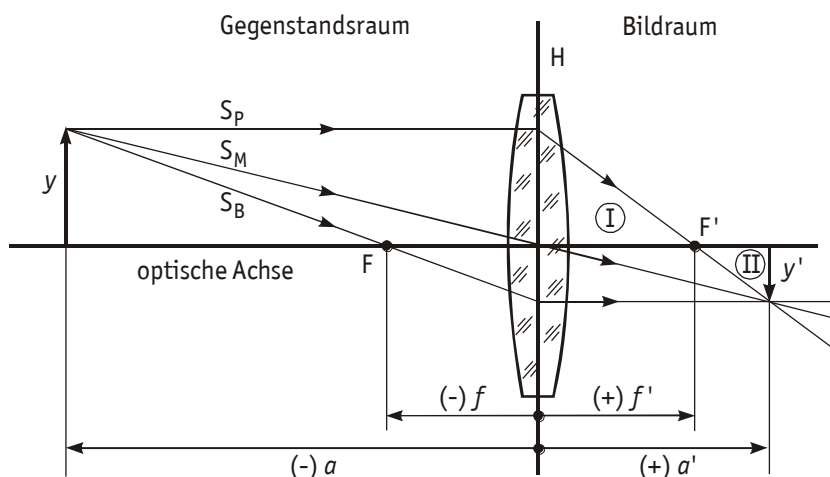


Bild 1 Optische Abbildung an einer dünnen Linse

An der in Bild 1 dargestellten Linse erfolgt die Abbildung eines Gegenstands der Größe  $y$  in ein (im Beispiel reelles) Bild der Größe  $y'$ . Befinden sich sowohl im Gegenstandsraum als auch im Bildraum Medien der gleichen Brechzahl  $n$  (also in beiden z. B. Luft), so besitzt die Linse (ungeachtet eines eventuell unsymmetrischen Querschnittes) eine symmetrische Lage der Brennpunkte  $F$  und  $F'$ . Dann sind gegenstandsseitige Brennweite  $f$  und bildseitige Brennweite  $f'$  betragsmäßig gleich und es gilt  $f = -f'$ .

Von jedem Punkt des Gegenstandes (im Bild 1 ist das nur für die Pfeilspitze gezeigt) gehen Lichtstrahlenbündel aus, die auf die Linse treffen. Im Bild 1 wurden drei Strahlen des Bündels ausgewählt, deren durch die Lichtbrechung veränderter Verlauf hinter der Linse sich sofort angeben lässt. Der Parallelstrahl ( $S_P$ ) verlässt die Linse durch den Brennpunkt  $F'$ , der Mittelpunktstrahl ( $S_M$ ) erleidet keine Richtungsänderung und der Brennpunktstrahl ( $S_B$ ) verlässt die Linse parallel zur optischen Achse. Alle drei vereinigen sich in einem reellen Bildpunkt. Ist dessen Lage so bestimmt, kann natürlich der Verlauf weiterer (in Bild 1 nicht dargestellter) Strahlen des Bündels angegeben werden.

Das Verhältnis  $\frac{y'}{y}$  heißt Abbildungsmaßstab  $\gamma$ . Nach Bild 1 gilt

$$\gamma = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad (2-1)$$

Betrachtet man in Bild 1 die beiden ähnlichen Dreiecke I und II, so erkennt man die Proportion

$$-\frac{y}{f'} = \frac{y'}{a' - f'} \quad (2-2)$$

Unter Verwendung von (2-1) folgt aus (2-2) die bekannte Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \quad (2-3)$$

Durch Umformung lassen sich aus (2-3) die beiden Gleichungen

$$a = f' \cdot \left( \frac{1}{\gamma} - 1 \right) = f' \cdot \frac{1}{\gamma} - f' \quad (2-4)$$

und

$$a' = f' \cdot (1 - \gamma) = -f' \cdot \gamma + f' \quad (2-5)$$

gewinnen, auf die später zurückgegriffen werden soll.

Die Bildkonstruktion mit Hilfe des Hauptebenenmodells eines Linsensystems ist nun (und darin liegt der Sinn dieses Modells) der an der dünnen Linse sehr ähnlich. Die (paraxialen) Strahlen werden an den Hauptebenen  $H$  und  $H'$  gebrochen. Diese haben einen gewissen Abstand ( $h + h'$ ) voneinander (vgl. Bild 2). Zwischen den Hauptebenen erfolgt nur eine zur optischen Achse parallele Verschiebung der Strahlauftreffpunkte.

Die Gleichungen (2-1) bis (2-5) behalten auch für das Linsensystem ihre Gültigkeit, wenn die veränderte Zählweise der Entfernungen nach Bild 2 beachtet wird.

Man erhält mit Hilfe des Hauptebenenmodells einen wirklichkeitsgetreuen Strahlenverlauf außerhalb des Linsensystems. Der Verlauf der Strahlen innerhalb des Linsensystems ist natürlich völlig anders als im Hauptebenenmodell, er kann (und soll auch) von diesem nicht wiedergegeben werden.

### **3 Versuchsanordnung**

Solange für das zu untersuchende Objektiv die Lage der Hauptebenen noch nicht bekannt ist, legt man willkürlich eine Marke  $M$  fest, auf die zunächst die Entfernungen bezogen werden. Die Marke  $M$  kann z. B. in die Frontebene des Objektivs gelegt werden, weil diese leicht zugänglich ist (siehe Bild 2).

Wie in der technischen Optik gebräuchlich, sind in Bild 2 die Vorzeichen der Entfernungen entsprechend der Vorzeichenkonvention nach DIN 1335 angegeben.

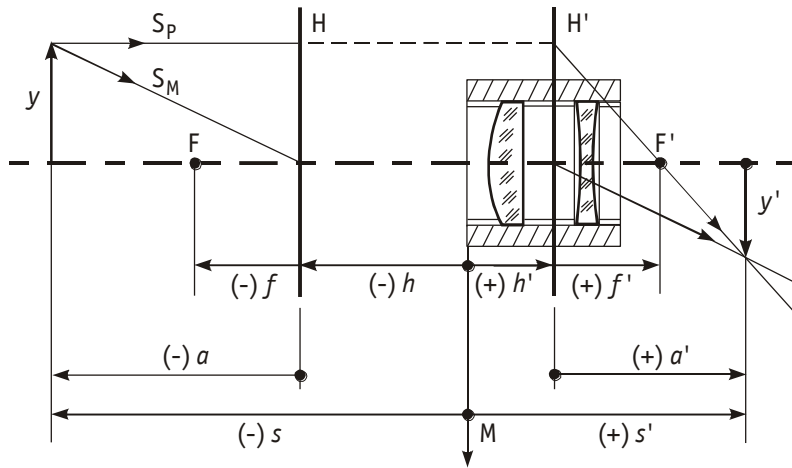


Bild 2 Lage der Hauptebenen und Zählweise der Entfernungen

Man entnimmt Bild 2 die Beziehungen  $s = a + h$  und  $s' = a' + h'$ . Damit folgen aus (2-4) und (2-5) die Gleichungen

$$s = f' \cdot \frac{1}{\gamma} + (h - f') \quad (3-1)$$

und

$$s' = -f' \cdot \gamma + (h' + f') \quad (3-2)$$

Stellt man mit Hilfe von Messwerten  $s$  über  $\frac{1}{\gamma}$  und  $s'$  über  $\gamma$  dar, sind nach (3-1) und (3-2) Geraden zu erwarten, aus denen  $f'$ ,  $h$  und  $h'$  bestimmt werden können.

In der Versuchsanordnung ist der Gegenstand der Größe  $y$  eine Kontaktkopie einer in der Bildebene angebrachten transparenten Messskale, beide Skalen haben also den gleichen Skalenswert. Die Skalen und das Objektiv sind auf Reitern montiert, die sich auf einer optischen Schiene verschieben lassen. Die Positionen von Gegenstand, Bild und Objektiv sind mit Hilfe von Zeigern auf einem Längenmaßstab abzulesen, wobei die Position des Objektivs durch die Position der Marke  $M$  bestimmt wird. Man wählt für jede Abbildung zunächst eine Objektivposition. Dann stellt man das Bild scharf und notiert dessen Position. In der Bildebene sind gleichzeitig die schwarzen Striche der Messskale und die (aufgrund des Filters) grün leuchtenden Striche des Bildes der Objektskale sichtbar. Die Beobachtung kann durch Zuhilfenahme einer Lupe erleichtert werden.

Man bringt (durch Verschieben des Objektes senkrecht zur optischen Achse) eine selbst zu wählende (aber möglichst große) Anzahl  $z'$  von Skalenteilen des Bildes mit der dazugehörigen Anzahl  $z$  von Skalenteilen der Messskale zur Deckung und berechnet daraus den Abbildungsmaßstab

$$\gamma = \frac{z}{z'} \quad (3-3)$$

und den Kehrwert  $\frac{1}{\gamma}$ . Aus den Positionen von Gegenstand, Objektiv und Bild berechnet man  $s$  und  $s'$ .

Das Einstellen des Bildes (einschließlich der Ermittlung von  $\gamma$ ,  $\frac{1}{\gamma}$  und  $s'$ ) wird bei jeder Abbildung mehrmals vorgenommen, um subjektive Einstellfehler zu verringern. Die Messungen werden nun für verschiedene  $s$  und somit also für verschiedene  $\gamma$  wiederholt und man untersucht auf diese Weise die Abhängigkeiten  $s = s\left(\frac{1}{\gamma}\right)$  und  $s' = s'(\gamma)$  für das im Versuch benutzte Objektiv der Brennweite  $f'$ .

Die Berechnung der Ausgleichsgeraden zu den Gl. (3-1) und (3-2) erfolgt anschließend am PC.

## 4 Aufgaben

- 4.1 Für verschiedene Abbildungsmaßstäbe  $\gamma$  sind mit einem Linsensystem (Objektiv) reelle Bilder einer Objektskale auf einer Mattscheibe zu erzeugen. Dabei sind für die verschiedenen Abbildungsmaßstäbe  $\gamma$  jeweils mehrfach die Gegenstandsweite  $s$  und die zugehörige Bildweite  $s'$  zu messen.
- 4.2 Mit den Ergebnissen von 4.1 sind  $s$  und  $s'$  als Funktionen von  $\frac{1}{\gamma}$  bzw.  $\gamma$  darzustellen.  
Aus beiden Darstellungen ist die Brennweite  $f'$  durch Ausgleichsrechnung zu bestimmen.
- 4.3 Die Hauptebenenlagen  $h$  und  $h'$  sind anzugeben.

## 5 Fragen

- 5.1 Nennen Sie Gründe für die geringe Abbildungsgüte von Einzellinsen.
- 5.2 Ein Lichtstrahl trifft aus beliebiger Richtung eine beliebige Stelle einer dünnen Sammellinse. Man konstruiere den Strahlenverlauf hinter der Linse.
- 5.3 Welche Unterschiede bestehen zwischen reellen und virtuellen Bildpunkten?
- 5.4 Das von einer dünnen Sammellinse erzeugte Bild eines Objektes hat die Bildweite  $a' = -f'$ .  
Wo steht das Objekt?
- 5.5 Ein Parallelstrahl, ein Mittelpunktstrahl und ein Brennpunktstrahl fallen auf eine dünne Zerstreuungslinse.  
Wie laufen diese drei Strahlen hinter der Linse weiter?
- 5.6 Eine Zerstreuungslinse ( $f_2' = -30$  mm) steht  $e' = 10$  mm hinter einer Sammellinse ( $f_1' = 20$  mm).  
Berechnen Sie die Systembrennweite  $f'$ .
- 5.7 Ein Gegenstand steht in der halben Brennweite vor einer dünnen Sammellinse. Man konstruiere das Bild.
- 5.8 Ein Linsensystem hat die Brennweite  $f' > 0$  und den Hauptebenenabstand  $\frac{f'}{2}$ . Konstruieren Sie das Bild eines bei  $a = -2f'$  vor H befindlichen Objektes.
- 5.9 Wie berechnet man aus den für verschiedene Wertepaare  $(\gamma, s')$  mittels Linear Fit (also mittels linearer Regression) bestimmten Parametern  $A$  und  $B$  der Geraden  $s' = -f' \cdot \gamma + (h' + f')$  die Brennweite  $f'$  und die Hauptflächenlage  $h'$ ?
- 5.10 Zwei gleiche dünne Linsen ( $f' > 0$ ) im Abstand  $\frac{f'}{2}$  bilden ein Linsensystem. Man konstruiere die Hauptebene H.

## Literatur

- [ 1 ] Recknagel, A. : Physik/Optik  
Huss-Medien, Berlin, 1990 (13. Auflage)  
ISBN : 978-3-341-00844-7 (Hardcover)
- [ 2 ] Schenk/Kremer (Hrsg.) : Physikalisches Praktikum  
Springer Spektrum, Heidelberg, Wiesbaden, 2014 (14. Auflage)  
ISBN : 978-3-658-00665-5 (Softcover) / 978-3-658-00666-2 (eBook)
- [ 3 ] Hering, E. u.a. : Physik für Ingenieure  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2021 (13. Auflage)  
ISBN : 978-3-662-63176-8 (Hardcover) / 978-3-662-63177-5 (eBook)