

Optische Abbildung (OPA)

Themengebiet: Optik

1 Grundlagen

1.1 Geometrische Optik

Die Wirkungsweise optischer Instrumente, die Linsen, Spiegel, Prismen und Blenden enthalten, lässt sich mit Hilfe der geometrischen Optik beschreiben, wenn vom Wellencharakter des Lichtes abgesehen werden kann, also Beugungserscheinungen außer acht gelassen werden können (Wellenlänge $\lambda \rightarrow 0$).

Man betrachtet dann *Lichtstrahlen*, worunter man dünne, parallele Lichtbündel versteht. Es werden die folgenden Annahmen gemacht:

1. Ein Lichtstrahl breitet sich geradlinig im einheitlichen Medium aus.
2. Verschiedene Lichtstrahlen sind unabhängig voneinander.
3. Der Strahl ist umkehrbar.
4. Es gelten das Reflexions- und das Brechungsgesetz.

Die geometrische Optik behandelt die Abbildung eines Objektraumes auf einen Bildraum. Die Begriffe Objekt und Gegenstand bezeichnen dabei dasselbe. Punkte werden normalerweise durch lateinische Großbuchstaben, Strecken durch lateinische Kleinbuchstaben und Winkel durch griechische Kleinbuchstaben bezeichnet (vgl. Abb. 1). Größen, die sich im Objekt- und Bildraum entsprechen, werden mit dem gleichen Buchstaben bezeichnet, die bildseitigen aber zusätzlich mit einem Strich (') versehen. Ist die Neigung der zu einer Abbildung beitragenden Lichtstrahlen bezüglich der optischen Achse, also der Verbindungsgerade aller Krümmungsmittelpunkte der beteiligten optischen Elemente, klein ($\sigma < 5^\circ$; sog. Gaußscher Abbildungsbereich), kann man die Wirkung eines optischen Systems näherungsweise auf zwei Hauptebenen H, H' und zwei Brennebenen F, F' zurückführen (Abb. 1). Der physikalische Strahlengang lässt sich dann durch einen mathematischen ersetzen, wodurch die Konstruktion der optischen Abbildung und die Rechnung sehr erleichtert werden.

Für rotationssymmetrische Problemstellungen reicht es außerdem aus, einen ebenen Schnitt durch die Rotationsachse, die mit der optischen Achse übereinstimmt, zu betrachten.

In der Optik wird die optische Achse meistens als z-Achse bezeichnet. Die positive Richtung der optischen Achse ist durch die Lichtrichtung im Objektraum gegeben. Zur einheitlichen Darstellung auf Bildern ist sie von links nach rechts zu zeichnen. Die positive Richtung der y-Achse soll von unten nach oben weisen. Als Ursprung (Nullpunkt) des Koordinatensystems können z.B. Brennpunkt oder Hauptpunkt einer Linse (oder eines Linsensystems) gewählt werden. Wir nehmen im Folgenden den Hauptpunkt bzw. die Hauptpunkte (H und H') als Bezugspunkte für Streckenangaben. Alle Strecken, die von dem Bezugspunkt aus in Lichtrichtung (nach rechts) gemessen werden, sind positiv. Außerdem sind alle nach oben verlaufenden Strecken positiv. In den Darstellungen sind alle Strecken durch einseitige Pfeile bezeichnet, deren Anfangspunkt (ohne Pfeil) den Bezugspunkt angibt. Beim Winkel eines Strahles gegen die optische Achse (z.B. σ in Abb. 1) ist das Vorzeichen positiv zu nehmen, wenn der Strahl die optische Achse von oben kommend trifft; im anderen Falle (von unten auf die Achse treffend) ist das Vorzeichen des Winkels negativ. Die Vorzeichen, die die Größen in Darstellungen haben, können eingeklammert vor die Buchstaben gesetzt werden.

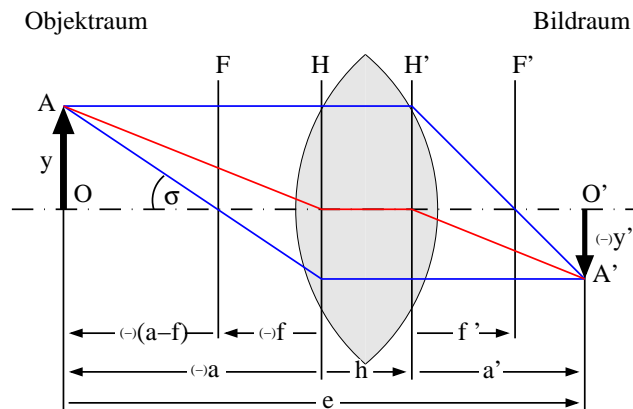


Abbildung 1: Zur Nomenklatur in der geometrischen Optik.

Zusammengefasst gilt für die in diesem Versuch verwendete Vorzeichenkonvention:

1. Die Lichtrichtung in Abbildungen ist von links nach rechts.
2. Es werden *orientierte Strecken* benutzt. In z-Richtung sind Strecken, die vom Bezugspunkt nach rechts (in Lichtrichtung) laufen, positiv, nach links negativ. Die y-Richtung wird nach oben als positiv gezählt.
3. Im Objekt- und Bildraum einander entsprechende Größen erhalten gleiche Buchstaben. Größen im Bildraum werden durch einen Strich (') gekennzeichnet.

Diese hier verwendete Vorzeichenkonvention ist in Anlehnung an die DIN 1335. Diese Vorzeichenregelungen werden nur in wenigen Physik-Büchern berücksichtigt, daher ist beim Vergleich der angegebenen Formeln mit Lehrbuchangaben Vorsicht geboten. Um stimmige Ergebnisse zu erhalten, muss man mit den Vorzeichen sehr sorgfältig umgehen.

1.2 Optische Abbildung

Die Konstruktion der Abbildung eines Gegenstandes im Objekttraum auf den Bildraum kann in folgender Weise erfolgen: Ein vom Punkt A des Objektes ausgehender Lichtstrahl verläuft parallel zur optischen Achse bis zur bildseitigen Hauptebene H' (*Parallelstrahl*) und geht dann weiter durch den bildseitigen Brennpunkt F'^1 . Ein zweiter vom Punkt A ausgehender Lichtstrahl verläuft geradlinig durch den objektseitigen Brennpunkt F bis zur objektseitigen Hauptebene H (*Brennstrahl*), und dann bildseitig parallel zur optischen Achse weiter. Der Schnittpunkt der beiden betrachteten Strahlen im Bildraum ist der Bildpunkt A' . Die Schnittpunkte der Hauptebenen mit der optischen Achse, die Hauptpunkte H bzw. H' , und die Brennpunkte F, F' bezeichnet man auch als Kardinalpunkte des optischen Systems.

Um die Abbildung mathematisch zu erfassen, betrachtet man folgendes: Der Objekttraum mit dem gewählten Koordinatensystem $K_H = (y, a)$ und Nullpunkt in H wird auf den Bildraum mit dem Koordinatensystem $K_{H'} = (y', a')$ mit dem Nullpunkt in H' abgebildet. Die Strecke $a = HO$ (die Objekt- oder Gegenstandsweite) ist negativ zu rechnen, da die Strecke von rechts nach links, also entgegengesetzt der Lichtrichtung, verläuft. Ebenso verhält es sich mit der objektseitigen Brennweite f . Die Bildweite a' und die bildseitige Brennweite f' sind entsprechend positiv zu rechnen. Die Objekt- oder Gegenstandsgröße y ist in Abb. 1 positiv, die Bildgröße y' negativ. Es lässt sich dann folgende Beziehung entnehmen:

$$\frac{|y'|}{|y|} = \frac{|f|}{|a| - |f|} = \frac{-f}{-(a-f)} = \frac{a' - f'}{f'} \quad (1)$$

¹Der bildseitige Brennpunkt F' ist also dadurch gekennzeichnet, dass alle objektseitigen Parallelstrahlen durch ihn hindurchlaufen

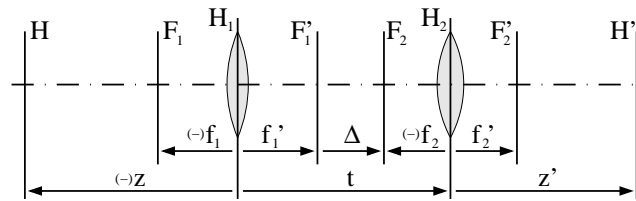


Abbildung 2: Verwendete Größen im Linsensystem.

bzw. durch Umformung

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

Diese allgemeine Form der Linsengleichung gilt auch für optische Systeme, bei denen die Brechzahlen der Medien auf beiden Seiten verschieden sind (z.B. beim Auge). Ist das Medium auf beiden Seiten gleich, dann gilt $f' = -f$ und aus Gleichung (2) ergibt sich (unter Beachtung der Vorzeichen):

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad (3)$$

Im Weiteren ist nun angenommen, dass das Medium außerhalb der Linsen überall gleich ist.

Als Abbildungsmaßstab² β bezeichnet man das Verhältnis von Bild- und Objektgröße

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (4)$$

wobei β Werte aus dem Bereich $]-\infty; \infty[$ annehmen kann.

Für ein Objekt in der Entfernung der doppelten Brennweite ($a = 2 \cdot f$) ergibt sich aus Gleichung (3) $a' = -2 \cdot f$. Man erhält dann $\beta = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = -1$, das Bild ist also genauso groß wie der Gegenstand selbst, aber umgekehrt.

1.3 Dünne Linsen

Man nennt eine Linse *dünn*, wenn die Mittendicke der Linse (in Luft) wesentlich kleiner ist als die Brennweite. In der Praxis kann man dies bei mindestens einem Faktor 10 zwischen Linsendicke und Brennweite annehmen. Die beiden Hauptebenen H und H' liegen dann sehr eng zusammen (d.h. $h \approx 0$) in der Linsenmitte, so dass alle Strecken (wie z.B. die Gegenstandsweite a und die Bildweite a') auf die Linsenmitte bezogen werden können.

1.4 Linsensysteme

Das einfachste Linsensystem besteht aus zwei dünnen Linsen mit den Brennweiten f_1' und f_2' , die im Abstand t voneinander angeordnet sind, wie in Abbildung 2 gezeigt. Den Abstand Δ der inneren beiden Brennpunkte F_1' und F_2

$$\Delta = t - f_1' - (-f_2) = t - f_1' - f_2' \quad (5)$$

bezeichnet man als (*optische*) *Tube*slänge des Systems. Die Brennweite des Linsensystems ist dann

$$f' = -\frac{f_1' \cdot f_2'}{\Delta} \quad (6)$$

²Den Begriff „Vergrößerung“ sollte man in diesem Zusammenhang vermeiden, da damit in der Optik meistens die Winkelvergrößerung gemeint ist

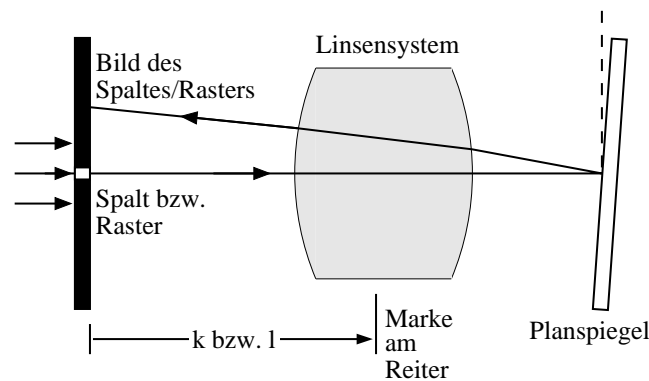


Abbildung 3: Autokollimation

f'_1 und f'_2 müssen vorzeichenrichtig eingesetzt werden, also > 0 für Sammellinsen bzw. < 0 für Streulinsen. Der Abstand der Hauptebenen H und H' des Systems von den Hauptebenen H_1 und H_2 der Einzellinsen beträgt

$$z = \frac{f_1 \cdot t}{\Delta} \quad \text{bzw.} \quad z' = \frac{f'_2 \cdot t}{\Delta} \quad (7)$$

und der Abstand der beiden Hauptebenen H und H' des Systems

$$h = \frac{t^2}{\Delta} \quad (8)$$

2 Bestimmung der Brennweite und der Hauptebenen bei Linsen- und Linsensystemen

Von verschiedenen in Frage kommenden Messverfahren greifen wir hier drei heraus. Bei zwei von ihnen sind nur Längenmessungen entlang der optischen Achse erforderlich. Diese sind auf einer optischen Bank relativ einfach und zuverlässig durchzuführen. Beim dritten Verfahren, der Messmethode nach Abbe, sind auch Längenmessungen in y -Richtung vorzunehmen.

2.1 Autokollimation

Mit Autokollimation bezeichnet man ein optisches Abbildungsverfahren, mit dessen Hilfe ein Objekt wieder in der Objektebene abgebildet wird. Hierbei wird die Umkehrbarkeit des Strahlenganges in einem optischen System ausgenutzt. Als Objekt kann z.B. ein beleuchteter Spalt oder ein Rastergitter dienen. In einem Abstand davon befindet sich das Linsensystem. Dahinter wird in beliebiger Entfernung ein Planspiegel senkrecht zur optischen Achse angebracht. In Abbildung 3 ist der entsprechende Aufbau skizziert. Wird das Linsensystem so angeordnet, dass sich das Objekt in der vorderen Brennebene F befindet, so ist das hinter dem Linsensystem austretende Licht parallel. Es wird am Spiegel reflektiert und durch die Linsen wieder auf die vordere Brennebene F , also in sich selbst, abgebildet. In dieser Position des Linsensystems wird der Abstand k zwischen einer Marke am Linsensystem und dem Objekt gemessen. Dann wird das Linsensystem um 180 Grad gedreht und der oben beschriebene Einstellvorgang wiederholt. Es ergibt sich der Abstand l zwischen Spalt und (derselben) Ablesemarke. Mit Abbildung 3 sieht man, dass für die Summe der gemessenen Abstände gilt

$$s = k + l = f' - f + h = 2 \cdot f' + h = -2 \cdot f + h, \quad (9)$$

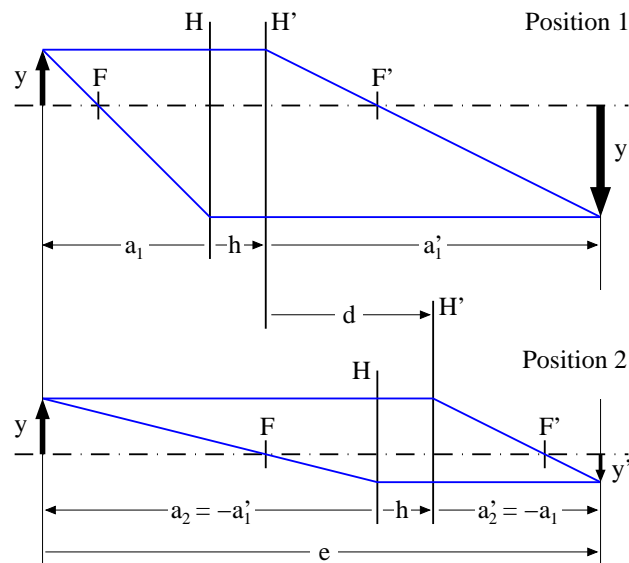


Abbildung 4: Bestimmung der Brennweite nach dem Besselverfahren.

für die Brennweite und den Hauptebenenabstand gilt also

$$f' = \frac{k+l-h}{2} \quad (10)$$

$$h = k+l-2 \cdot f' \quad (11)$$

Für dünne Linsen kann man $h = 0$ annehmen. Für diesen Fall ergibt sich die Brennweite f aus den gemessenen Größen k und l . Im Fall von dicken Linsen oder Linsensystemen reicht dies nicht aus. Man benötigt noch eine weitere Messung, um Brennweite und Hauptebenenabstand zu ermitteln.

2.2 Messmethode nach Bessel

Ein weiteres Messverfahren ist das Besselverfahren. Dabei geht man davon aus, dass es bei genügend großem Abstand e zwischen Gegenstand und Bild zwei Linsenstellungen gibt, bei denen eine scharfe, reelle Abbildung zustande kommt. Dies ergibt sich aus der Umkehrbarkeit des Strahlenganges, wenn man Objektweite a und Bildweite a' miteinander vertauscht. Die Situation ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Abstand der Positionen des Linsensystems bei den beiden scharfen Abbildungen ist d . Es lässt sich vorzeichenrichtig ablesen:

$$-a_1 + h + d + a_2' = e \quad (12)$$

$$-a_2 + h - d + a_1' = e \quad (13)$$

Wegen $a_1' = -a_2$ und $a_1 = -a_2'$ folgt

$$-a_1 + h + d - a_1 = e \quad \text{bzw.} \quad a_1 = \frac{d+h-e}{2} \quad (14)$$

$$a_1' + h - d + a_1' = e \quad \text{bzw.} \quad a_1' = \frac{d-h+e}{2} \quad (15)$$

Setzt man $a_1 = a$ und $a'_1 = a'$, so erhält man durch Einsetzen in die Gleichung (3) für f' bzw. f

$$f' = \frac{1}{4} \cdot \left[(e-h) - \frac{d^2}{e-h} \right] \quad (16)$$

$$f = \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{d^2}{e-h} - (e-h) \right] \quad (17)$$

Falls der Hauptebenenabstand h bekannt ist und man e und d misst, lässt sich die Brennweite berechnen. Die Strecken e und d lassen sich im Gegensatz zu a und a' relativ genau messen.

Aus den Gleichungen (16) und (17) lässt sich der Mindestabstand e_{\min} , bei dem man noch scharfe, reelle Bilder erhält, bestimmen:

$$e_{\min} = 4 \cdot f' + h = -4 \cdot f + h \quad (18)$$

Dies ist der Fall, in dem $d = 0$ ist, also beide Positionen zusammenfallen.

Für dünne Linsen, bei denen man den Hauptebenenabstand vernachlässigen kann (d.h. $h = 0$), ist die Brennweite mit Gleichung (16) bestimmbar.

Für dicke Linsen bzw. Linsensysteme ist jedoch noch ein weiteres Verfahren notwendig, um den Hauptebenenabstand zu ermitteln, z.B. die Autokollimation (2.1).

2.3 Kombination von Autokollimation und Besselverfahren.

Bei Linsensystemen und dicken Linsen lassen sich weder mit der Autokollimation noch mit dem Besselverfahren allein Brennweite und Hauptebenenabstand ermitteln.

Nimmt man nun die beiden Messverfahren zusammen, so hat man mit den Gleichungen (11) und (16) zwei Gleichungen für die beiden Unbekannten h und f' . Man erhält daraus zwei Beziehungen, in denen nur noch messbare Größen vorkommen:

$$f' = \frac{1}{2} \sqrt{(e-k-l)^2 - d^2} \quad (19)$$

$$h = k+l - \sqrt{(e-k-l)^2 - d^2} \quad (20)$$

2.4 Messmethode nach Abbe

Bei diesem Messverfahren werden Bildweite und Vergrößerung in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite gemessen. Aus Abbildung 1 entnimmt man folgende Beziehungen:

$$\frac{y}{f-a} = \frac{y'}{f} \quad \text{und} \quad \frac{y'}{a'-f'} = \frac{-y}{f'} \quad (21)$$

Für den Abbildungsmaßstab β erhält man daraus

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{f}{f-a} = \frac{f'-a'}{f'} \quad (22)$$

Man kann dies nach a bzw. a' auflösen und schreiben

$$a = f \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \quad \text{bzw.} \quad a' = f' \cdot (1 - \beta) \quad (23)$$

Da die Lage der Hauptebenen H und H' unbekannt ist, können a und a' nicht direkt gemessen werden, sondern nur die Abstände g bzw. g' zwischen Objekt bzw. Bild und einer (willkürlichen) Bezugsebene E . Die Situation

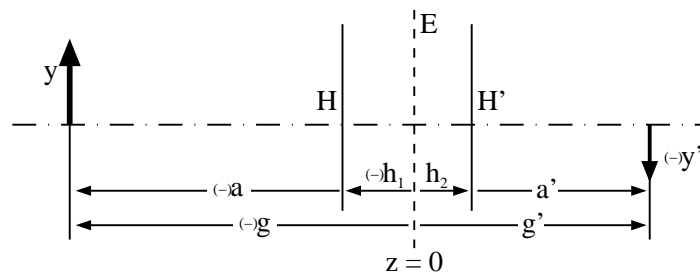


Abbildung 5: Bezeichnungen bei dem Abbe-Verfahren.

ist in Abbildung 5 skizziert. Bei Messungen liegt es nahe, diese Bezugsebene an den Ort einer Ablesemarke am Klemmreiter, auf dem das Linsensystem montiert ist zu legen.

Aus Abbildung 5 liest man folgende Beziehungen ab

$$g = a + h_1 \quad \text{und} \quad g' = a' + h_2 \quad (24)$$

Damit ergibt sich aus Gleichung (23)

$$g = f \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) + h_1 \quad \text{bzw.} \quad g' = f' \cdot (1 - \beta) + h_2 \quad (25)$$

Trägt man nun g als Funktion von $1 - 1/\beta$ auf, und g' als Funktion von $1 - \beta$, so liefern die Steigungen der beiden Geraden die Brennweite f bzw. f' . Die Schnittpunkte der Geraden mit der y -Achse sind die Abstände h_1 und h_2 . Damit hat man dann die Brennweite des Linsensystems und die Lage der Hauptebenen H und H' zur Bezugsebene E bestimmt. Wichtig ist dabei allerdings die genaue Beachtung der Vorzeichen.

3 Aufgabenstellung

Alle für das Experiment vorhandenen Linsen können in hinreichender Näherung als dünne Linsen betrachtet werden. Die Hauptebene liegt in der Mitte der Linse (Linsenhalterung).

3.1 Aufgaben mit Einzellinsen

Aufgabe 1:

Welche der Linsen A, B, C, D, E, G, H sind Sammellinsen, welche Streulinsen? Tragen Sie Ihre Antwort in das Protokollbuch ein.

Aufgabe 2:

Bestimmen Sie mit der Autokollimationsmethode die Brennweiten der Linsen B und G. Führen Sie jeweils fünf Messungen für k und l durch. Geben Sie an, welche Unsicherheiten zu berücksichtigen sind.

Aufgabe 3:

Bestimmen Sie auch mit der Besselmethode die Brennweiten der Linsen B und G. Wählen Sie den Abstand e zwischen Objekt und Schirm so, dass der Abbildungsmaßstab beim vergrößerten Bild etwa $\beta \simeq (-)5$ ist. Bestimmen Sie die beiden Positionen, bei denen eine scharfe Abbildung entsteht, jeweils fünf mal. Geben Sie auch hier an, welche Unsicherheiten zu berücksichtigen sind.

Vergleichen Sie nun die beiden Messungen und geben Sie dann für jede Linse die Brennweite an (gewichteter Mittelwert).

3.2 Aufgaben mit einem Linsensystem

Bilden Sie aus zwei Linsen, die Sie beim Betreuer erfragen, ein Linsensystem. Der Abstand zwischen den Linsen wird Ihnen ebenfalls vom Betreuer vorgegeben.

Aufgabe 4:

Bestimmen Sie für das Linsensystem die Brennweite f' und den Hauptebenenabstand h . Benutzen Sie dafür die Autokollimations- und Besselmethode.

Führen Sie jeweils mindestens fünf Messungen für k und l (Autokollimation) und für beide Positionen bei der Besselmethode durch. Geben Sie an, welche Unsicherheiten zu berücksichtigen sind.

Aufgabe 5:

Bestimmen Sie für das Linsensystem die Brennweite f' und den Hauptebenenabstand h mit der Messmethode nach Abbe (graphisch).

Aufgabe 6:

Stellen Sie die Lage der Brennpunkte und der Hauptebenen des Systems und die Position der Linsen in einer Zeichnung (Maßstab 1:5) dar.

Aufgabe 7:

Berechnen Sie die Brennweite der Zerstreuungslinse des Systems (mit Unsicherheiten) aus den in den Aufgaben 4 und 5 ermittelten Brennweiten. Verwenden Sie dazu die Gleichung (6) mit dem vorgegebenen t .

Vergleichen Sie den Wert mit der Herstellerangabe $f' = -100$ mm.

Aufgabe 8:

Berechnen Sie nun mit den Gleichungen (7) und (8) die Lage und den Abstand der Hauptebenen des Linsensystems. Benutzen Sie dazu $f'_E = -100$ mm.

Vergleichen Sie das Ergebnis mit Ihren Ergebnissen aus den Aufgaben 4 und 5.

Aufgabe 9:

Lassen Sie sich vom Betreuer das am Rechner simulierte System, mit dem Sie gemessen haben, ausdrucken. Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit denen, die sich aus dem Ausdruck ergeben.

4 Versuchsaufbau und -durchführung

Alle Versuche werden auf einer optischen Bank durchgeführt. Die optischen Komponenten werden auf Klemmreiter gesteckt, mit denen Sie auf der optischen Bank verschoben werden können. Die Position des Reiters liest man dabei am weißen Pfeil auf der Skala ab.

Als Lichtquelle dient eine Halogenlampe. Die Lampe ist magnetisch gehalten und kann seitlich verschoben werden. Sie soll stets so justiert sein, dass die Ausleuchtung der Anordnung optimal ist. Für die Versuche wird eine Linse A etwa im Abstand ihrer Brennweite hinter der Lampe angebracht (warum?).

Als abzubildendes Objekt verwenden Sie das quadratische Raster. Schieben Sie dieses in den Blendenhalter und stellen Sie ihn dicht hinter die Linse A.

Für das Protokoll ist es sinnvoll, nicht nur Abstände (Differenzen), sondern die tatsächlich gemessenen Positionen zu notieren. Skizzieren Sie sich auch, in welcher Reihenfolge die Linsen des Systems bei welcher Messung standen, und an welcher Messmarke Sie abgelesen haben.

Zum Autokollimationsverfahren

Neben dem Raster wird ein weißer Schirm in den Blendenhalter gesteckt, sodass eine Hälfte der Blendenöffnung vom Raster, die andere vom Schirm bedeckt ist. Setzen Sie einen Reiter mit der zu untersuchenden Linse und direkt dahinter einen Blendenhalter mit dem Spiegel auf die optische Bank. Verschieben Sie beide so, dass das Bild des Gitters scharf auf dem Schirm abgebildet wird. Dazu müssen Sie den Spiegel etwas aus seiner senkrechten Position herausdrehen.

Für das Linsensystem setzen Sie die beiden Linsen in dem vom Betreuer vorgegebenen Abstand auf zwei verbundene Reiter. Notieren Sie den Abstand der verwendeten Ablesemarke von den beiden Linsen. Achten Sie darauf, dass Sie bei den Messungen am gedrehten Linsensystem die richtige Ablesemarke verwenden.

Zum Besselverfahren

Beim Besselverfahren wählen Sie den Abstand e zwischen Objekt und Schirm so, dass der Abbildungsmaßstab beim vergrößerten Bild etwa $\beta \simeq (-)5$ ist.

Der Schirm neben dem Raster wird wieder entfernt.

Zum Abbeverfahren

Beginnen Sie mit einem Abstand von etwa 1300 mm zwischen Raster und Schirm. Positionieren Sie das Linsensystem so, dass Sie eine scharfe (vergrößerte) Abbildung des Rasters auf dem Schirm erhalten und messen

Sie g und g' bezüglich einer Ablesemarke an Ihrem Linsensystem. Bestimmen Sie den zugehörigen Abbildungsmaßstab β , indem Sie die Rastergröße des Bildes messen. Verschieben Sie das Linsensystem nun zur zweiten Position, an der Sie ein scharfes (verkleinertes) Bild auf dem Schirm erhalten. Bestimmen Sie auch hier³ g und g' und β .

Verschieben Sie daraufhin den Schirm in Schritten von etwa 25 bis 50 mm in Richtung Lampe. Verschieben Sie jeweils das Linsensystem soweit, bis sich wieder eine scharfe Abbildung ergibt, verfahren Sie wie oben (Bestimmung von g , g' und β für beide möglichen Linsenpositionen). Bei diesem Versuchsteil sind erhebliche Unsicherheiten möglich, vermerken Sie daher auch die Messunsicherheit zu den Messwerten.

Wiederholen Sie diesen Schritt solange, bis der Gesamtabstand so klein wird, dass keine scharfe Abbildung mehr möglich ist.

Zur Auswertung tragen Sie dann g über $1 - 1/\beta$ und g' über $1 - \beta$ auf. Beachten Sie dabei die richtigen Vorzeichen.

5 Fragen

1. Wie verhalten sich die Abbildungsmaßstäbe der beiden scharfen Abbildungen beim Besselverfahren zueinander?
2. Wie werden in einem Projektionsapparat Lampe, Kondensor, Objekt und Objektiv angeordnet? Skizzieren und begründen Sie den Sachverhalt.
3. Was ergibt sich aus den Gleichungen (3) und (4) für Lage, Größe und Art des Bildes, wenn sich das Objekt in einem Abstand $a = 0,5 \cdot f$ von der objektseitigen Hauptebene einer Sammellinse befindet?
4. Wie verändert sich die Gesamtbrennweite eines Systems zweier Sammellinsen gleicher Brennweite in Abhängigkeit vom Abstand t ?

³Für große Abstände e kann es schwierig sein, das verkleinerte Bild auszumessen. Es sind daher nur dann Werte aufzunehmen, wenn eine sinnvolle Größenmessung möglich ist, eventuell über mehrere Kästchenbreiten.