

Ausarbeitung zu "Optische Abbildung"



Anfängerpraktikum Teil 3
Technische Universität München

Clara Donat, Matthias Quintern
Kurs Block A, Gruppe 5, Team 9

05. März 2021

Einleitung

In diesem Versuch werden die Brennweite und die Lage der Hauptebenen verschiedener optischer Systeme bestimmt. Dabei kommen das Autokollimations-, das Bessel- sowie das Abbeverfahren zum Einsatz.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	2
1.1 Geometrische Optik und Vorzeichenkonvention	2
1.2 Optische Abbildung	2
1.3 Linsensysteme	3
1.4 Autokollimation	3
1.5 Besselverfahren	4
1.6 Kombination von Autokollimation und Besselverfahren	4
1.7 Abbeverfahren	5
2 Experimentelles Vorgehen	5
2.1 Versuchsaufbau	5
2.2 Autokollimationsverfahren	5
2.3 Besselverfahren	6
2.4 Abbeverfahren	6
3 Ergebnisse und Diskussion	6
3.1 Brennweite der Linsen B und G	6
3.1.1 Autokollimationsverfahren	6
3.1.2 Besselverfahren	7
3.1.3 Vergleich der Verfahren	7
3.2 Brennweite und Hauptebenenabstand des Linsensystems	7
3.3 Brennweite der Linse E	7
3.4 Lage und Abstand der Hauptebenen	8
4 Fragen	9
4.1 Verhältnis der Abbildungsmaßstäbe beim Besselverfahren	9
4.2 Bestimmte Gegenstandsweite	9
4.3 Projektionsapparat	9
4.4 Gesamtbrennweite Linsensystem	9
5 Fehlerrechnung	10

1 Grundlagen

1.1 Geometrische Optik und Vorzeichenkonvention

In der geometrischen Optik wird der Wellencharakter des Lichts vernachlässigt und dieses stattdessen näherungsweise durch Lichtstrahlen dargestellt. Für die Lichtstrahlen gilt, dass sie sich in homogenen Medien geradlinig ausbreiten, sich gegenseitig nicht beeinflussen und dass sie dem Brechungs- sowie Reflexionsgesetz folgen. Zudem ist der Strahlengang umkehrbar.

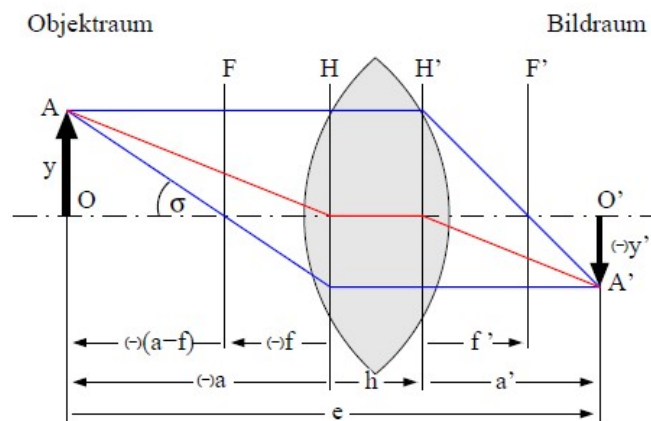


Abbildung 1: Nomenklatur und Vorzeichenkonvention (Grafik kopiert aus [2])

Allgemein beschäftigt sich die geometrische Optik mit der Abbildung eines Gegenstands aus einem sogenannten Objektraum in einen Bildraum.

Die in Abbildung 1 eingezeichneten, gerichteten Strecken werden von den Hauptebenen H und H' aus gemessen. Der Strahlengang geht von links nach rechts und alle Strecken, die in dieselbe Richtung zeigen, werden positiv gezählt (ansonsten negativ). Die y -Richtung erhält ebenso ein positives Vorzeichen. Im Gegensatz dazu sind Winkel zwischen von unten auf die optische Achse (in Abbildung 1 gestrichelt) treffenden Strahlen mit der optischen Achse negativ.

1.2 Optische Abbildung

Unter Berücksichtigung der Vorzeichenkonvention erhält man für das Verhältnis β von Bildgröße y' zur Gegenstandsgröße y :

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

wobei β als Abbildungsmaßstab, f als Brennweite, a als Gegenstands- und a' als Objektweite bezeichnet wird. Gleichung 1 lässt sich zu:

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

umformen. Während Formel 2 für optische Systeme gilt, deren Umgebungsmedien auf beiden Seiten einen unterschiedlichen Brechungsindex haben können, kann man unter Voraussetzung eines gleichen Mediums auf beiden Seiten Gleichung 2 zu:

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

umformen, wobei $f' = -f$ eingesetzt wurde.

1.3 Linsensysteme

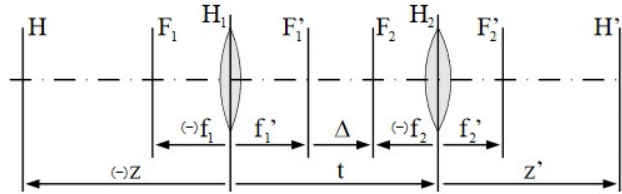


Abbildung 2: Linsensystem (Grafik kopiert aus [2])

Die Mittendicke sogenannter *dünnere Linsen* ist mindestens zehn Mal kleiner als ihre Brennweite. Abbildung 2 zeigt ein Linsensystem, das aus zwei solchen dünnen Linsen besteht. Die Gesamtbrennweite f' der Anordnung kann man mit:

$$f' = -\frac{f_1' \cdot f_2'}{\Delta} \quad (4)$$

berechnen, wobei:

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

die optische Tubuslänge, also der Abstand der inneren Brennpunkte F_1' und F_2 ist. Die Abstände z und z' zwischen den Hauptebenen H und H' des Systems und den Hauptebenen H_1 bzw. H_2 der einzelnen Linsen ergeben sich zu:

$$z = \frac{f_1' \cdot t}{\Delta} \quad \text{bzw.} \quad z' = \frac{f_2' \cdot t}{\Delta}. \quad (6)$$

Mit:

$$h = \frac{t^2}{\Delta} \quad (7)$$

kann man die Distanz zwischen H und H' ermitteln.

1.4 Autokollimation

Bei der *Autokollimation* wird ein Objekt wieder in der Objektebene abgebildet, indem es nach dem Durchgang durch ein Linsensystem an einem Spiegel reflektiert wird. Das Objekt wird in der vorderen Brennebene angebracht, damit es scharf auf sich selbst abgebildet wird. k ist dabei die Distanz zwischen dem Objekt und einer Marke am Linsensystem. Nun dreht man das System um 180° und platziert das Objekt wieder in der vorderen Brennebene. Dann ist l die Distanz zwischen dem Objekt und derselben Marke. Das Prinzip ist in Abbildung 3a dargestellt. Für die Brennweite f' gilt dann [2]

$$f' = \frac{k + l - h}{2} \quad (8)$$

und für den Hauptebenenabstand h

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

Für eine dünne Linse vereinfacht sich dies zu

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

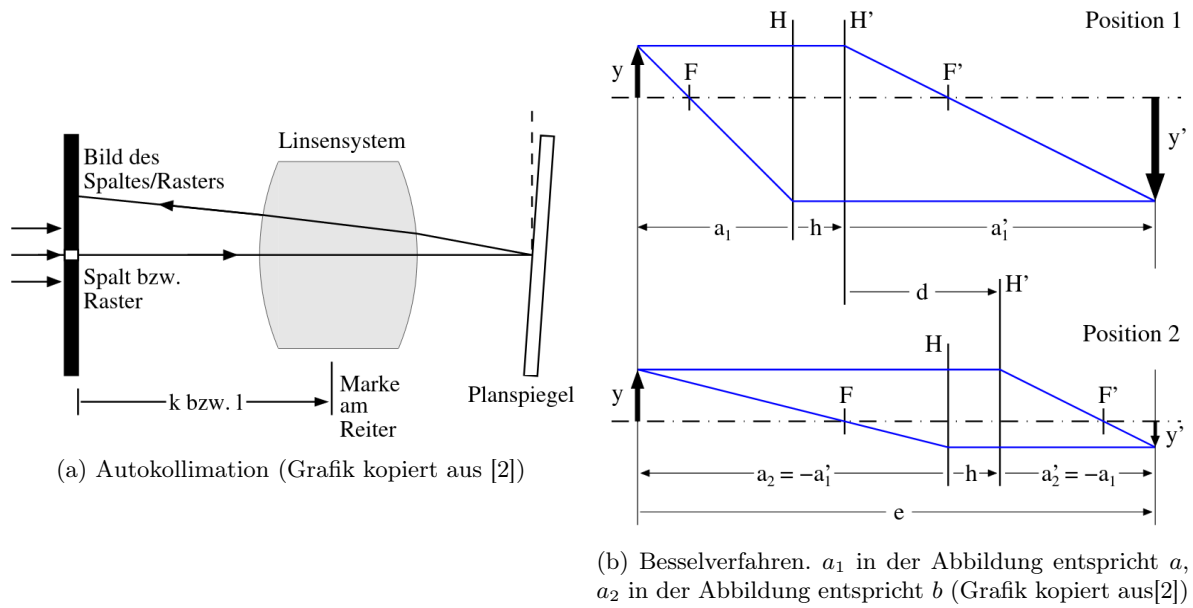


Abbildung 3

1.5 Besselverfahren

Beim *Besselverfahren* wird, wie in Abbildung 3b dargestellt, das Linsensystem zwischen einem Objekt und einem Schirm platziert. Wenn Objekt und Schirm einen ausreichend großen Abstand e zueinander haben, gibt es (vorausgesetzt das Linsensystem streut nicht) zwei Positionen des Linsensystems $a = b'$ und $b = a'$, bei denen das Objekt scharf auf den Schirm abgebildet wird. Für diese Positionen findet man die Beziehungen

$$a_1 = \frac{d+h-e}{2} \qquad a_1' = \frac{d-h+e}{2}, \qquad (11)$$

dabei ist $d = a_1' - a_1$ der Abstand der beiden Positionen des Linsensystems. Mithilfe von Gleichung 3 erhält man für die Brennweiten f und f'

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{d^2}{e-h} - (e-h) \right) \qquad f' = \frac{1}{4} \left((e-h) - \frac{d^2}{e-h} \right). \qquad (12)$$

Für eine dünne Linse lässt sich dies vereinfachen zu:

$$f = -f' = \frac{e}{4} \left(\frac{d^2}{e^2} - 1 \right). \qquad (13)$$

1.6 Kombination von Autokollimation und Besselverfahren

Die beiden in Teil 1.4 und 1.5 beschriebenen Verfahren eignen sich nur für einzelne dünne Linsen, nicht jedoch für Linsensysteme.

Erst durch Kombination beider Verfahren lässt sich die Gesamtbrennweite des Systems bestimmen. Auflösen des Gleichungssystem bestehend aus den Gleichungen 12 und 8 nach f' und h liefert:

$$f' = \frac{1}{2} \sqrt{(e-k-l)^2 - d^2} \qquad (14)$$

und

$$h = k+l - \sqrt{(e-k-l)^2 - d^2}. \qquad (15)$$

1.7 Abbeverfahren

Beim *Abbeverfahren* werden die Bildweite β und die Bildweite a' in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite a gemessen. Da h unbekannt ist, kann man a und a' nicht direkt messen. Stattdessen werden die Abstände g und g' zu einer selbst gewählten Marke gemessen, wie in Abbildung 4 dargestellt. Aus

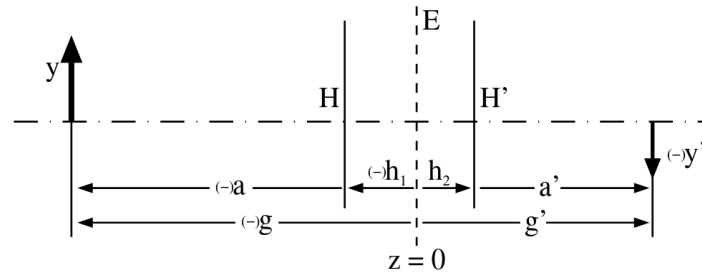


Abbildung 4: Darstellung des Abbeverfahrens (Grafik kopiert aus[2])

Abbildung 1 werden die Gleichungen

$$\frac{y}{f-a} = \frac{y'}{f} \qquad \frac{y'}{a'-f'} = \frac{-y}{f'} \qquad (16)$$

abgeleitet. Aus Abbildung 4 ist erkennbar, dass

$$g = a + h_1 \qquad g' = a' + h_2 \qquad (17)$$

gilt. Mit diesen Gleichungen und $\beta = \frac{y'}{y}$ erhält man schließlich

$$g = f \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) + h_1 \qquad (18)$$

$$g' = f' \cdot (1 - \beta) + h_2. \qquad (19)$$

2 Experimentelles Vorgehen

2.1 Versuchsaufbau

Die Versuche werden auf einer optischen Bank durchgeführt, auf die man verschiebbare Reiter mit Linsen, Spiegeln, usw. stecken kann. Deren Position kann an Pfeilen am Messreiter abgelesen werden.

Die Anordnung besteht aus einem quadratischen Raster, das als abzubildendes Objekt dient. Es wird von einer Halogenlampe beleuchtet, hinter welcher ca. im Abstand ihrer Brennweite eine Linse A montiert ist, um den Aufbau gleichmäßig auszuleuchten. Das Raster wird stets bei einer ganzzahligen Stelle auf der Messskala platziert, um Rechnungen zu vereinfachen. Zudem wird es als Nullpunkt für alle Längenmessungen gewählt.

2.2 Autokollimationsverfahren

Bei dieser Messmethode schiebt man einen Schirm so vor das Raster, dass die Blendenöffnung je zur Hälfte vom Schirm und vom Raster bedeckt ist. Direkt hinter der zu betrachtenden Linse bzw. hinter dem Linsensystem wird ein Reiter mit einem Spiegel gesetzt, der das Licht zurück auf den Schirm wirft. Das optische System aus Linse/n und Spiegel wird so lange verschoben, bis ein scharfes Bild auf dem Schirm entsteht.

Dieses Verfahren wird für die Linsen B und G sowie das Linsensystem G-E mit 30 mm Abstand jeweils 5-mal durchgeführt.

2.3 Besselverfahren

Hier wird kein vorgeschobener Schirm beim Raster benötigt. Die Distanz e zwischen Objekt und Schirm wird so eingestellt, dass ein um den Faktor (-3) bis (-4) vergrößertes Bild des Rasters am Schirm entsteht. Dieses Verfahren wird ebenfalls für die Linsen B und G sowie für das Linsensystem G-E mit 30 mm Abstand jeweils 5-mal durchgeführt.

2.4 Abbeverfahren

Bei diesem Verfahren wählt man zunächst einen Abstand von ca 1300 mm zwischen Raster und Schirm. Die Messung wird mit dem Linsensystem G-E durchgeführt. Hat man eine Position für das Linsensystem gefunden, bei der das Raster scharf und vergrößert am Schirm abgebildet wird, misst man die Abstände g und g' bezüglich einer gewählten Ablesemarke. Zudem liest man die veränderte Rastergröße auf dem Schirm ab, um später daraus den Abbildungsmaßstab zu bestimmen.

Nun verschiebt man das Linsensystem so weit in Richtung Schirm, bis das dort entstandene Bild wieder scharf ist. Nun werden wieder die Werte für g , g' und β aufgenommen.

Anschließend wird der Schirm so lange in 50 mm-Schritten in Richtung Lampe verschoben und bei jeder neuen Schirmposition das eben beschriebene Verfahren wiederholt, bis keine scharfe Abbildung mehr entsteht.

3 Ergebnisse und Diskussion



Die verwendeten Längen a, b, k, l entsprechen alle jeweils der Strecke \overline{OL} , lassen sich also durch $L - O$ berechnen. O bezeichnet die Position des Rasters, L die der jeweiligen Linse. Beim Linsensystem wird die Linse G als Ablesemarke gewählt.

Die Länge e entspricht der Länge der Strecke \overline{OS} , wobei S die Position des Schirms bezeichnet.

3.1 Brennweite der Linsen B und G

Die Brennweiten der beiden dünnen Linsen ($h = 0$) werden jeweils einmal mit dem Autokollimationsverfahren und einmal mit dem Besselverfahren bestimmt. Daraus lässt sich dann ein gewichteter Mittelwert bilden. Zudem lässt sich erkennen, welches Verfahren für den verwendeten Aufbau präziser ist.

Messung	$f_{B, \text{Auto}}$ [cm]	$f_{B, \text{Bessel}}$ [cm]	$f_{G, \text{Auto}}$ [cm]	$f_{G, \text{Bessel}}$ [cm]
1	9.65 ± 0.30	9.74 ± 0.17	7.10 ± 0.30	7.00 ± 0.18
2	9.60 ± 0.30	9.82 ± 0.17	7.10 ± 0.30	6.93 ± 0.18
3	9.65 ± 0.30	9.71 ± 0.17	7.15 ± 0.30	7.07 ± 0.18
4	9.70 ± 0.30	9.71 ± 0.17	7.20 ± 0.30	7.04 ± 0.18
5	9.65 ± 0.30	9.79 ± 0.17	7.10 ± 0.30	7.10 ± 0.18
gew. Mittelwert	$9,65 \pm 0,13$	$9,757 \pm 0,075$	$7,13 \pm 0,13$	$7,021 \pm 0,080$

Tabelle 1: Brennweiten der Linsen B und G

3.1.1 Autokollimationsverfahren

Für die Brennweitenbestimmung der beiden Linsen mit dem Autokollimationsverfahren wird Gleichung 10 benutzt. Die erhaltenen Werte sind in Tabelle 1 aufgetragen. Es werden eine Ableseunsicherheit und eine Bestimmunsicherheit berücksichtigt; die Fehlerrechnung ist in Teil 5 näher erläutert. Man erhält einen gewichteten Mittelwert von $\bar{f}'_{B, \text{Auto}} = (9.65 \pm 0.13)$ cm und $\bar{f}'_{G, \text{Auto}} = (7.13 \pm 0.13)$ cm.

3.1.2 Besselverfahren

Durch Einsetzen der erhaltenen Werte für k und l lassen sich mit Gleichung 13 direkt die Brennweiten $f_{B, \text{Bessel}}$ und $f_{G, \text{Bessel}}$ berechnen. Für Distanz zwischen Raster und Schirm beträgt dabei $e_B = (55.00 \pm 0.14)$ cm bei der Messung mit der Linse B sowie $e_G = (42.00 \pm 0.14)$ cm bei der Messung mit der Linse G. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgetragen. Man erhält die gewichteten Mittelwerte $\bar{f}'_{B, \text{Bessel}} = (9.757 \pm 0.075)$ cm und $\bar{f}'_{G, \text{Bessel}} = (7.021 \pm 0.080)$ cm. Die Fehlerrechnung wird in Teil 5 erklärt.

3.1.3 Vergleich der Verfahren

Beim Vergleich der Werte für je eine Linse fällt auf, dass es Unterschiede zwischen den beiden Messungen gibt. Innerhalb der Unsicherheiten stimmen die Mittelwerte jedoch überein. Zudem sieht man, dass die Unsicherheiten beim Besselverfahren kleiner sind als beim Autokollimationsverfahren. Das deutet darauf hin, dass mit dem Besselverfahren eine genauere Bestimmung der Brennweite möglich ist, allerdings kann dies auch an der Schätzung der Bestimmunsicherheiten liegen. Die Unsicherheiten wurden offenbar auch ausreichend berücksichtigt, da bei der Berechnung der Mittelwerte stets die interne Unsicherheit größer war als die externe.

Für das endgültige Ergebnis wird aus den Mittelwerten der beiden Verfahren wieder der gewichtete Mittelwert gebildet. Man erhält schließlich $\bar{f}'_B = (9.730 \pm 0.065)$ cm und $\bar{f}'_G = (7.051 \pm 0.068)$ cm.

Vor dem Versuch wurde mit bloßem Auge getestet, in welcher Entfernung von einem Objekt man dieses scharf durch die Linsen beobachten kann. Dies war im Dezimeterbereich möglich; die berechneten Werte liegen also in der richtigen Größenordnung.

3.2 Brennweite und Hauptebenenabstand des Linsensystems

Aus den Messungen mit dem Autokollimations- und Besselverfahren erhält man die Längen k, l und d . Die Distanz zwischen Objekt und Schirm beim Besselverfahren ist dabei $e = (70.00 \pm 0.14)$ cm. Bei dem Linsensystem kann man wegen $h \neq 0$ nicht wie im vorherigen Teil vorgehen, jedoch kann man die durch Kombination der beiden Verfahren erhaltenen Gleichungen 14 und 15 anwenden.

Da die Werte k, l und d aus unterschiedlichen Messreihen kommen, macht es keinen Sinn, jeweils f und h zu bestimmen und davon den Mittelwert zu bilden. Daher werden erst Mittelwerte der Längen gebildet und anschließend die Brennweite und der Hauptebenenabstand berechnet. Man erhält $k = (16.42 \pm 0.19)$ cm, $l = (10.90 \pm 0.19)$ cm und $d = (32.56 \pm 0.27)$ cm.

Mit Gleichung 14 wird die Brennweite des Systems zu $f' = (13.80 \pm 0.23)$ cm bestimmt. Für den Hauptebenenabstand bekommt man mittels Gleichung 15 $h = (-0.27 \pm 0.71)$ cm.

Als nächstes sollen Brennweite und Hauptebenenabstand noch mittels der Messmethode nach Abbe bestimmt werden. Dazu wird $(-)g$ gegen $1 - \frac{1}{(-)\beta}$ und g' gegen $1 - (-)\beta$ aufgetragen und jeweils linear gefittet. Die Daten mit den Fits sind in Abbildung 5 aufgetragen. Die Steigung entspricht dann der Brennweite f bzw. f' und die y-Achsenverschiebung entspricht h_1 bzw. h_2 . Numerisch ergeben sich $f = (-12, 5 \pm 2, 2)$ cm, $f' = (14, 45 \pm 4, 04)$ cm, $h_1 = (-4, 3 \pm 2, 9)$ cm und $h_2 = (-3, 9 \pm 5, 2)$ cm als Werte für die Fitparameter. Der Hauptebenenabstand berechnet sich zu $h = h_2 - h_1 = (0, 4 \pm 6, 0)$ cm.

Auffällig ist, dass die Unsicherheiten bei der Abbe-Methode sehr viel größer als bei der Kombination aus Autokollimation und Besselverfahren sind. Dies liegt höchstwahrscheinlich unter anderem daran, dass das Messen der Rastergröße am Schirm nur relativ ungenaue Werte liefert.

Die mit den beiden unterschiedlichen Verfahren ermittelten Werte für f' und h stimmen innerhalb ihrer Unsicherheiten überein. Bildet man den gewichteten Mittelwert von f' , erhält man $\bar{f}' = (13, 80 \pm 0, 23)$ cm.

3.3 Brennweite der Linse E

Mithilfe der bisherigen Ergebnisse kann nun die Brennweite der Zerstreulinse E berechnet werden, die Teil des vorher verwendeten Linsensystems ist. Dazu wird Gleichung 5 in 4 eingesetzt und nach $f'_2 = f'_E$

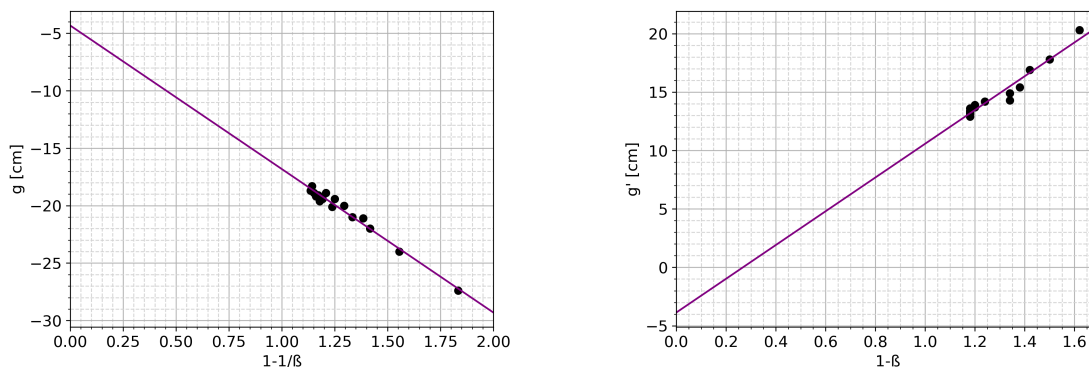


Abbildung 5: g bzw. g' in Abhängigkeit von $1 - \frac{1}{\beta}$ bzw. $1 - \beta$

umgestellt. Mit $f'_1 = f'_G$ erhält man

$$f'_E = \frac{f'(t - f')}{f' - f'_G}. \quad (20)$$

Mit der in Teil 3.1.3 und 3.2 bestimmten Brennweiten f'_G und $f' = f'_{GE,30mm}$ erhält man den Wert $f'_E = (13.8 \pm 1.0)$ cm.

3.4 Lage und Abstand der Hauptebenen

Die Größe h lässt sich noch auf eine andere Weise als in Abschnitt 3.2 berechnen. Setzt man Gleichung 5 in 6 ein und verwendet die Herstellerangabe für die E-Linse $f'_2 = f'_E = -10$ cm [2], ergeben sich mit $t = (3,00 \pm 0,10)$ cm, $f_1 = -f'_1 = -f'_G = (-7,051 \pm 0,068)$ cm aus Tabelle 1, dass $z = (-1,055 \pm 0,037)$ cm und $z' = (-1,496 \pm 0,051)$ cm gilt. Der Hauptebenenabstand lässt sich mit Gleichung 7 zu $h = (0,449 \pm 0,030)$ cm berechnen.

h wurde in 3.2 numerisch zu $h = (-0.27 \pm 0.71)$ cm und graphisch zu $h = (0.4 \pm 6.0)$ cm bestimmt. Die Werte stimmen innerhalb der Unsicherheiten überein. Man erkennt jedoch, dass die Berechnung mit Gleichung 7 die geringste Unsicherheit aufweist. Mit den drei Werten wird der gewichtete Mittelwert zu $\bar{h} = (0.448 \pm 0.030)$ cm.

Das Linsensystem ist in Abbildung 7 mit den Brennweiten und Hauptebenen dargestellt. Zusätzlich

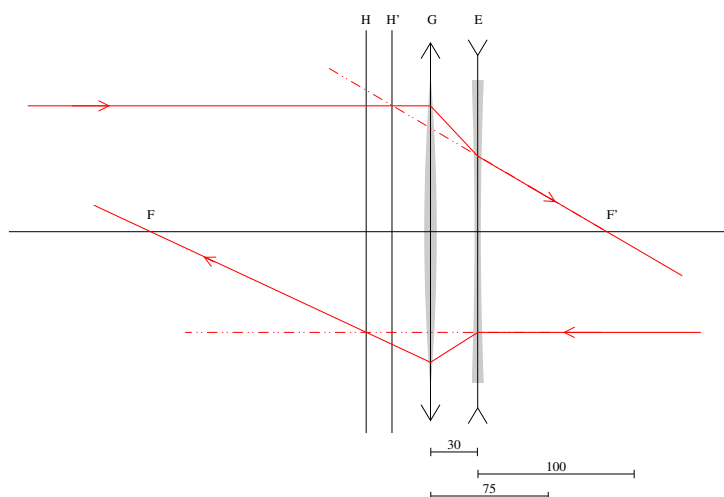


Abbildung 6: Am Rechner simuliertes System aus Moodle [1]

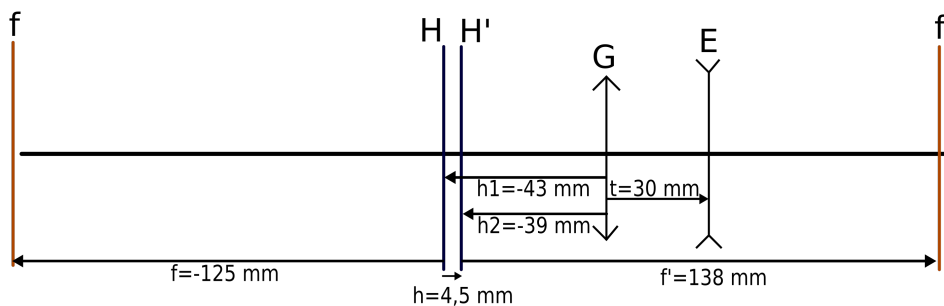


Abbildung 7: Linsensystem GE-30 mm

wurde auf Moodle eine Grafik des Systems bereitgestellt (Abbildung 6). Die Anordnung des Systems stimmt mit dem aus Moodle überein, über die Brennweiten und Hauptebenenabstände lässt sich keine Aussage treffen, da diese in der Moodle-Grafik nicht angegeben sind.

4 Fragen

4.1 Verhältnis der Abbildungsmaßstäbe beim Besselverfahren

Aus Abbildung 3b lassen sich die Abbildungsmaßstäbe der beiden scharfen Bildpositionen mit $\beta_i = \frac{a'}{a}$ zu $\beta_1 = \frac{a'}{a_1}$ und $\beta_2 = \frac{a'}{a_2}$ ablesen. Teilt man die beiden Maßstäbe durcheinander, erhält man $\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{a_1'^2}{a_2'^2}$.



4.2 Bestimmte Gegenstandsweite

Platziert man ein Objekt im Abstand $a = \frac{f}{2}$ von der gegenstandsseitigen Hauptebene einer Sammellinse mit $f > 0$, erhält man mit Gleichung 3 für die Bildweite $a' = f$. Für den Abbildungsmaßstab ergibt sich unter Verwendung von Gleichung 1 der folgende Wert:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = 2. \quad (21)$$

Der Gegenstand wird also doppelt so groß abgebildet und das Bild zeigt in positive y-Richtung.

4.3 Projektionsapparat

Der Aufbau eines Projektionsgeräts ist in Abbildung 8 skizziert. Projektionsapparate besitzen eingebaute Lampen als Lichtquellen. Hinter diesen ist ein Kondensator montiert, der dafür sorgt, dass möglichst viel vom Lampenlicht zum abzubildenden Objekt gelangt. Ein dahinter positioniertes Objektiv erzeugt schließlich eine reelle Abbildung vom Gegenstand.

4.4 Gesamtbrennweite Linsensystem

Nun soll die Gesamtbrennweite f'_{ges} eines Linsensystems bestehend aus zwei dünnen konvexen Linsen mit Brennweite f' in Abhängigkeit von t berechnet werden. Eingesetzt in Gleichung 4 ergibt sich:

$$f'_{ges} = -\frac{f'^2}{t - 2f'} = \frac{f'^2}{2f' - t}, \quad (22)$$

wobei $f' > 0$ verwendet wurde. Man kann erkennen, dass f'_{ges} für $t > 2f'$ im negativen und für $t < 2f'$ im positiven Bereich liegt. Im Spezialfall $t = 2f'$ wird die Gesamtbrennweite unendlich groß, d.h. die Strahlen verlaufen nach dem Linsensystem parallel zur optischen Achse.

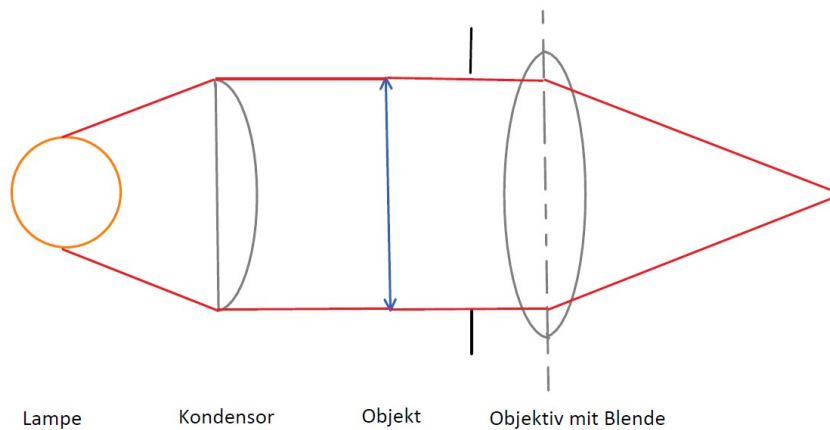


Abbildung 8: Schematischer Aufbau eines Projektors

5 Fehlerrechnung

Die Unsicherheiten der Längen setzen sich aus einer Ablese- und einer Bestimmunsicherheit zusammen. Die Ableseunsicherheit an der Skala wird auf $u_{\text{Ablese}} = 0.10 \text{ cm}$ geschätzt. Für die Bestimmunsicherheiten werden je nach Methode verschiedene Werte verwendet. Diese sind ungefähr der Bereich, in dem man das Linsensystem verschieben kann, ohne einen Unterschied in der Schärfe des Bildes sehen zu können.

Für das Autokollimationsverfahren wird $u_{\text{Bestimm}}(P_l) = u_{\text{Bestimm}}(P_k) = 0.40 \text{ cm}$ verwendet, für das Bessel- und Abbeverfahren $u_{\text{Bestimm}}(P_a) = 0.50 \text{ cm}$ und $u_{\text{Bestimm}}(P_b) = 0.30 \text{ cm}$. P_i steht dabei für die Position des Linsensystems an der Stelle, die für die Berechnung von der Länge i benötigt wurde. Die Gesamtunsicherheit einer Messgröße wird dann berechnet mit

$$u(P_i) = \sqrt{u_{\text{Ablese}}(P_i)^2 + u_{\text{Bestimm}}(P_i)^2}. \quad (23)$$

Für alle weiteren Rechnungen wird dann die Gaußsche Fehlerfortpflanzung benutzt.

Beim Abbeverfahren wird zudem die Vergrößerung $\beta = \frac{y'}{y}$ gemessen. Die Unsicherheit der Rastergröße y wird vernachlässigt, da diese im Vergleich zu $u(y')$ sehr gering wäre. Für die Positionen, an denen das Linsensystem auf der linken Seite ist, wird $u(y') = 0.20 \text{ cm}$ verwendet, da die Gitterlinien am Schirm sehr dick waren und sich die Größe so nicht eindeutig bestimmen ließ. Für die Positionen auf der rechten Seite wird $u(y') = 0.050 \text{ cm}$ verwendet. Hier war das Bild sehr klein und die Größe daher besser erkennbar.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Fakultät für Physik. *Linsensystem GE-30*. Technische Universität München. URL: https://www.moodle.tum.de/pluginfile.php/2734627/mod_resource/content/1/G-E-30.pdf.
- [2] Fakultät für Physik. *Optische Abbildung (OPA)*. Technische Universität München. 25. Feb. 2021. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap3/OPA.pdf>.

Optische Abbildungen

Aufgabe 1

A: Zerstreu, B: Sammell, C: Sammell, E: Sammell, G: Zerstreu

Wie düpe benutzbar \rightarrow Sammellinse

Aufgabe 2

Linse B:

Messung	k [cm]	l [cm]	$u(\text{Ables}) = u(k) = u(l) = 1 \text{ mm}$ $u(\text{Einstell}) = 0,4 \text{ cm}$
1	9,8	9,5	
2	9,6	9,6	
3	9,5	9,8	
4	9,6	9,8	
5	9,7	9,6	

Linse G:

Messung	k [cm]	l [cm]	Dicke Schirm = 1,8 mm Dicke Revolver = 1,85 mm
1	7,1	7,1	
2	7,1	7,1	
3	7,2	7,1	
4	7,1	7,3	
5	7,1	7,1	

Aufgabe 3 Düse B

Messung	e [cm]	d [cm]	Position
1	55	52,2 - 12,5	10
2	55	52,1 - 11,7	
3	55	52,4 - 11,6	
4	55	52,2 - 12,4	
5	55	52,1 - 12,6	

Düse G

Messung	e [cm]	d [cm]
1	42	33,3 - 8,9
2	42	33,2 - 8,7
3	42	33,3 - 9,3
4	42	33,1 - 9,0
5	42	33,3 - 9,4

Aufgabe 4 Linsensystem: G-E | 30 mm, Einstellunsicherheit

Aufkollimation	Bei G-Marke abgelesen	$u(\text{Einstell}) = 0,4 \text{ cm}$
Messung	k [cm]	l [cm]
1	16,4	10,7 10,7
2	16,4	10,7 11
3	16,6	11,1
4	16,2	10,9
5	16,5	10,8

Besselverfahren

Messung	e [cm]	d [cm]
1	70	54 - 21,5
2	70	54,1 - 21,8
3	70	54,3 - 21,7
4	70	54,3 - 21,8
5	70	54,3 - 21,4

$u(d_1) = 0,5 \text{ cm}$, $u(d_2) = 0,3 \text{ cm}$

bei G_1 geteilt abgelesen
 \downarrow
 $(d_2 - d_1)$

Aufgabe 5

Bei G_1 abgelesen

Messung	g	g'	Bildgröße auf Schirm	OS
1	18,7	111,3	3,7	$\frac{1300}{OS} = \frac{440}{1300} \text{ mm}$ $OS = 1300 \text{ mm}$
2	117,1	12,9	0,09 0,09	
3	111,9	23,4 13,1	0,09	$OS = 1250 \text{ mm}$
4	18,3	106,7	3,5	
5	18,9	111,1	3,3	$OS = 1200 \text{ mm}$
6	106,7	13,3	0,09	
7	101,6	13,4	0,09	$OS = 1150 \text{ mm}$
8	19,2		3,1	
9	19,1		2,9	$OS = 1100 \text{ mm}$
10	96,8		0,09	
11	91,4		0,09	$OS = 1050 \text{ mm}$
12	19,6		2,8	

Messung	g [cm]	g' [cm]	dB [cm]	OS [mm]
13	19,4		2,6	1000 1000
14	86,3		0,1	1000
15	81,3		0,1	950
16	18,9		2,4	950
17	20,1		2,1	900
18	76,1		0,1	900 900
19	70,8		0,12	850
20	19,4		2	850
21	20		1,7	800
22	66,7		0,17	800
23	60,1		0,17	750
24	21		1,5	750
25	21,1		1,3	700
26	54,5		0,19	700
27	48,1		0,21	650
28	22		1,2	650
29	24		0,9	600
30	42,2		0,25	600
31	34,7		0,31	550
32	27,4		0,6	550
33				500
34				500