

Prak.: P1 Semester: WS 19/20 Wochentag: Mo Gruppennr.: 06
P1/P2 z.B. „WS14/15“ oder „SS15“ Mo/Di/Mi/Do ##

Name: Dittich Vorname: Philipp

Name: Wäldele Vorname: Jonas

Emailadresse(n): _____ Optional

Versuch: P1-31 Geometr. Optik Fehlerrech.: Nein
z.B. „Galvanometer (P1-13)“ oder „Mikrowellenoptik (P2-15)“ Ja/Nein

Betreuer: Pirmin Kessler Durchgeführt am: 28.10.19
TT.MM.JJ

Wird vom Betreuer ausgefüllt.

1. Abgabe am: 4.11.19

Rückgabe am: 4.11.19 Begründung:

Sehr schönes Protokoll
⊗ Abb. an falschen Stellen
+ Anmerkungen

2. Abgabe am: 11.11.19

Ergebnis: (+) / 0 / - Fehlerrechnung: Ja / (Nein)

Datum: 11.11.19 Handzeichen: 

Bemerkungen:

Sehr schönes Protokoll



Hier geht es um optischen Versuche, bei denen die geometrischen Abmessungen groß gegen die Wellenlänge sind und deshalb die Wellennatur des Lichts nicht auffällig zum Vorschein kommt.

Bei einigen Teilaufgaben geht es darum, bekannte optische Instrumente modellhaft aufzubauen und dabei das planvolle Einsetzen optischer Bauelemente zu üben. Bei anderen Aufgaben sollen Brennweite von Linsen und Linsensystemen bestimmt werden. Dabei wird deutlich, wie man die Absolutmessung von Größen (hier Gegenstands- und Bildweiten wegen nur ungenau feststellbarer Positionen der Linsenmitten bzw. unbekannter Hauptebenenlagen) vermeidet und stattdessen Verfahren benutzt, die mit einfacheren und genaueren Differenzmessungen auskommen. Im Zusammenhang mit der Brennweitenbestimmung werden auch gleich sphärische und chromatische Aberrationen untersucht.

Achtung: Gehen Sie bitte sehr sorgfältig mit dem Zubehör in der abgedunkelten Kabine um. Auch scheinbar simple optische Elemente wie Farbgläser und Diapositive sind sehr teuer. *Nicht direkt in einen sehr hellen Strahl hineinblicken! Blendungsgefahr!*

Allgemeiner Hinweis: Bei allen Versuchen, bei denen beleuchtete Objekte abgebildet werden, ist eine sorgfältige Justierung aller optischen Elemente, inklusive Beleuchtungssystem, nötig. Deshalb soll bei der Vorbereitung ein Strahlengang gezeichnet werden, in dem das Beleuchtungssystem nicht fehlen darf.

Aufgaben:

1.) Brennweiten Bestimmungen

1.1 Kontrollieren Sie nur mit Hilfe eines Maßstabes und eines Schirmes die angegebene Brennweite einer dünnen Sammellinse.

1.2 Bestimmen Sie die Brennweite dieser Linse genau mit Hilfe des Besselschen Verfahrens. Untersuchen Sie gleichzeitig die sphärische und chromatische Aberration der Linse.

Hinweise: Bilden Sie einen Gegenstand auf einen Transparenzschirm ab. Für einen festen Abstand $e > 4f$ gibt es zwei Linsenstellungen, in denen ein scharfes vergrößertes bzw. verkleinertes Bild erscheint. Betrachten Sie das Bild zur Beurteilung der Schärfe nötigenfalls mit einer Lupe. Verwenden Sie die folgenden vier möglichen Versuchsbedingungen: rotes / blaues Licht und inneres / äußeres Linsengebiet. Dafür existieren Farbgläser sowie auf die Linsenfassung aufsteckbare Loch- und Scheibenblenden. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit sind für jede Versuchsbedingung mehrere Messungen auszuführen:

- a) bei festem Abstand e zwischen Gegenstand und Bild wiederholte unabhängige Scharfeinstellungen
- b) Variationen von e .

Fragen: Warum muss $e > 4f$ sein? Warum ist es nachteilig, e/f zu groß zu wählen?

1.3 Bestimmen Sie mit Hilfe des Abbéschen Verfahrens die Brennweite eines Zweilinsensystems bei verschiedenen Linsenabständen. Bestimmen Sie bei einem festen Linsenabstand auch die Hauptebenenabstände.

Hinweise: Bei jedem Linsenabstand sollen mindestens für sechs 'Gegenstand-Marke-Abständen' die Vergrößerungen gemessen werden. Die Marke ist ein beliebiger aber fester Ort am Linsensystem. Als Gegenstand ist eine geeichte Skala vorteilhaft und als Schirm wird Millimeterpapier verwendet. Zur Bestimmung der Hauptebenenabstände müssen Sie auch eine Messreihe mit dem um 180° gedrehten Linsensystem durchführen.

Schließen Sie aus den gemessenen Brennweiten des Systems bei mindestens zwei deutlich unterschiedlichen Linsenabständen auf die Brennweiten der beiden Einzellinsen. Es ist vorteilhaft, bei wesentlich mehr Linsenabständen zu messen und eine Ausgleichsrechnung vorzunehmen.

2.) Aufbau optischer Instrumente

2.1 Bauen Sie ein Keplersches (astronomisches) Fernrohr mit wenigstens sechsfacher Vergrößerung und betrachten Sie damit entfernte Gegenstände. Bauen Sie die Linsenkombination auf der leicht transportablen 'kleinen optischen Bank' auf. Messen Sie auf einfache Weise die Vergrößerung und vergleichen Sie sie mit dem errechneten Wert. Bauen Sie auch ein Galileisches Fernrohr auf und überprüfen Sie seine Funktion.

2.2 Bauen Sie einen Projektionsapparat, der $24 \times 36 \text{ mm}^2$ -Diapositive ausleuchtet und in etwa 1,5 m Entfernung etwa zehnfache Vergrößerung aufweist. Projizieren Sie Diapositive und vergleichen Sie Ergebnis und Voraussage. Zeichnen Sie den prinzipiellen Strahlengang (mit Konstruktionslinien für die 'Beleuchtung' und für die 'Abbildung' und mit Lichtbündeln).

2.3 Bauen Sie ein Mikroskop mit >20 -facher Vergrößerung und vergleichen Sie die näherungsweise gemessene Vergrößerung mit dem berechneten Wert. Skizzieren Sie den Strahlengang.

Frage: Warum hat es keinen Sinn, bei einem Mikroskop die Vergrößerung durch Einsatz von Linsen mit immer kleineren Brennweiten in der Hoffnung zu steigern, dann auch eine immer bessere 'Auflösung' zu erreichen?

Zubehör:

Optische Bank mit Reitern

Glühlampe (6V;5A) im Gehäuse und mit Netzgerät

Kondensator

Sammellinsen (4 / 5 / 7 / 9 / 10 / 15 / 20 / 30 / 50 / 100cm, evtl. leicht abweichende Zusammenstellung)

Zerstreuungslinsen (-5 / -10cm)

Zweilinsensystem mit einstellbarem Linsenabstand

verstellbarer Spalt

Irisblende

auf die Linsen aufsteckbare Lochblende, dto. Scheibenblende

Rotfilter und Blaufilter

farbiges Testdiapositiv; Demonstrationsdiapositiv

diverse Gitter (20 Striche/cm bis 208 Striche/cm und Kreuzgitter)

Filterhalter; Blendenhalter

Mattscheibenschirm; mm-Papier

kleine optische Bank (gemeinsam für alle Versuche)

Millimeterskala

Literatur:

Alle Lehrbücher der Optik und alle Optik-Kapitel

Speziell zu Bessel- und Abbéverfahren:

Walcher: *Praktikum der Physik*, 2. Aufl., Par. 4.1.2, 4.1.3

Bergmann, Schaefer: *Experimentalphysik*, Bd. 3, 6. Aufl., S. 99,100

Westphal: *Physikalisches Praktikum*, 13. Aufl., Aufg. 18 und 21

Zu optischen Instrumenten (besonders instruktiv: Projektionsapparat!):

Pohl: *Optik und Atomphysik*, 12. Aufl., §29 - §33

Inhaltsverzeichnis

0	Vorbemerkungen	5
1	Brennweiten-Bestimmungen	7
1.1	Simple Messung mit dem Maßstab	7
1.2	Besselsches Verfahren und Abberationsfehler	7
1.2.1	Bestimmung der Chromatischen Aberration	10
1.2.2	Bestimmung der Sphärischen Aberration	10
1.3	Abbé-Verfahren zur Charakterisierung eines Zweilinsensystems	11
2	Aufbau optischer Instrumente	15
2.1	Bau eines Fernrohrs	15
2.2	Projektionsapparat	16
2.3	Mikroskop	17



Hier geht es um optischen Versuche, bei denen die geometrischen Abmessungen groß gegen die Wellenlänge sind und deshalb die Wellennatur des Lichts nicht auffällig zum Vorschein kommt.

Bei einigen Teilaufgaben geht es darum, bekannte optische Instrumente modellhaft aufzubauen und dabei das planvolle Einsetzen optischer Bauelemente zu üben. Bei anderen Aufgaben sollen Brennweite von Linsen und Linsensystemen bestimmt werden. Dabei wird deutlich, wie man die Absolutmessung von Größen (hier Gegenstands- und Bildweiten wegen nur ungenau feststellbarer Positionen der Linsenmitten bzw. unbekannter Hauptebenenlagen) vermeidet und stattdessen Verfahren benutzt, die mit einfacheren und genaueren Differenzmessungen auskommen. Im Zusammenhang mit der Brennweitenbestimmung werden auch gleich sphärische und chromatische Aberrationen untersucht.

Achtung: Gehen Sie bitte sehr sorgfältig mit dem Zubehör in der abgedunkelten Kabine um. Auch scheinbar simple optische Elemente wie Farbgläser und Diapositive sind sehr teuer. *Nicht direkt in einen sehr hellen Strahl hineinblicken! Blendungsgefahr!*

Allgemeiner Hinweis: Bei allen Versuchen, bei denen beleuchtete Objekte abgebildet werden, ist eine sorgfältige Justierung aller optischen Elemente, inklusive Beleuchtungssystem, nötig. Deshalb soll bei der Vorbereitung ein Strahlengang gezeichnet werden, in dem das Beleuchtungssystem nicht fehlen darf.

Aufgaben:

1.) Brennweiten Bestimmungen

1.1 Kontrollieren Sie nur mit Hilfe eines Maßstabes und eines Schirmes die angegebene Brennweite einer dünnen Sammellinse.

1.2 Bestimmen Sie die Brennweite dieser Linse genau mit Hilfe des Besselschen Verfahrens. Untersuchen Sie gleichzeitig die sphärische und chromatische Aberration der Linse.

Hinweise: Bilden Sie einen Gegenstand auf einen Transparenzschirm ab. Für einen festen Abstand $e > 4f$ gibt es zwei Linsenstellungen, in denen ein scharfes vergrößertes bzw. verkleinertes Bild erscheint. Betrachten Sie das Bild zur Beurteilung der Schärfe nötigenfalls mit einer Lupe. Verwenden Sie die folgenden vier möglichen Versuchsbedingungen: rotes / blaues Licht und inneres / äußeres Linsengebiet. Dafür existieren Farbgläser sowie auf die Linsenfassung aufsteckbare Loch- und Scheibenblenden. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit sind für jede Versuchsbedingung mehrere Messungen auszuführen:

- a) bei festem Abstand e zwischen Gegenstand und Bild wiederholte unabhängige Scharfeinstellungen
- b) Variationen von e .

Fragen: Warum muss $e > 4f$ sein? Warum ist es nachteilig, e/f zu groß zu wählen?

1.3 Bestimmen Sie mit Hilfe des Abbéschen Verfahrens die Brennweite eines Zweilinsensystems bei verschiedenen Linsenabständen. Bestimmen Sie bei einem festen Linsenabstand auch die Hauptebenenabstände.

Hinweise: Bei jedem Linsenabstand sollen mindestens für sechs 'Gegenstand-Marke-Abständen' die Vergrößerungen gemessen werden. Die Marke ist ein beliebiger aber fester Ort am Linsensystem. Als Gegenstand ist eine geeichte Skala vorteilhaft und als Schirm wird Millimeterpapier verwendet. Zur Bestimmung der Hauptebenenabstände müssen Sie auch eine Messreihe mit dem um 180° gedrehten Linsensystem durchführen.

Schließen Sie aus den gemessenen Brennweiten des Systems bei mindestens zwei deutlich unterschiedlichen Linsenabständen auf die Brennweiten der beiden Einzellinsen. Es ist vorteilhaft, bei wesentlich mehr Linsenabständen zu messen und eine Ausgleichsrechnung vorzunehmen.

2.) Aufbau optischer Instrumente

2.1 Bauen Sie ein Keplersches (astronomisches) Fernrohr mit wenigstens sechsfacher Vergrößerung und betrachten Sie damit entfernte Gegenstände. Bauen Sie die Linsenkombination auf der leicht transportablen 'kleinen optischen Bank' auf. Messen Sie auf einfache Weise die Vergrößerung und vergleichen Sie sie mit dem errechneten Wert. Bauen Sie auch ein Galileisches Fernrohr auf und überprüfen Sie seine Funktion.

2.2 Bauen Sie einen Projektionsapparat, der $24 \times 36 \text{ mm}^2$ -Diapositive ausleuchtet und in etwa 1,5 m Entfernung etwa zehnfache Vergrößerung aufweist. Projizieren Sie Diapositive und vergleichen Sie Ergebnis und Voraussage. Zeichnen Sie den prinzipiellen Strahlengang (mit Konstruktionslinien für die 'Beleuchtung' und für die 'Abbildung' und mit Lichtbündeln).

2.3 Bauen Sie ein Mikroskop mit >20 -facher Vergrößerung und vergleichen Sie die näherungsweise gemessene Vergrößerung mit dem berechneten Wert. Skizzieren Sie den Strahlengang.

Frage: Warum hat es keinen Sinn, bei einem Mikroskop die Vergrößerung durch Einsatz von Linsen mit immer kleineren Brennweiten in der Hoffnung zu steigern, dann auch eine immer bessere 'Auflösung' zu erreichen?

Zubehör:

Optische Bank mit Reitern

Glühlampe (6V;5A) im Gehäuse und mit Netzgerät

Kondensator

Sammellinsen (4 / 5 / 7 / 9 / 10 / 15 / 20 / 30 / 50 / 100cm, evtl. leicht abweichende Zusammenstellung)

Zerstreuungslinsen (-5 / -10cm)

Zweilinsensystem mit einstellbarem Linsenabstand

verstellbarer Spalt

Irisblende

auf die Linsen aufsteckbare Lochblende, dto. Scheibenblende

Rotfilter und Blaufilter

farbiges Testdiapositiv; Demonstrationsdiapositiv

diverse Gitter (20 Striche/cm bis 208 Striche/cm und Kreuzgitter)

Filterhalter; Blendenhalter

Mattscheibenschirm; mm-Papier

kleine optische Bank (gemeinsam für alle Versuche)

Millimeterskala

Literatur:

Alle Lehrbücher der Optik und alle Optik-Kapitel

Speziell zu Bessel- und Abbéverfahren:

Walcher: *Praktikum der Physik*, 2. Aufl., Par. 4.1.2, 4.1.3

Bergmann, Schaefer: *Experimentalphysik*, Bd. 3, 6. Aufl., S. 99,100

Westphal: *Physikalisches Praktikum*, 13. Aufl., Aufg. 18 und 21

Zu optischen Instrumenten (besonders instruktiv: Projektionsapparat!):

Pohl: *Optik und Atomphysik*, 12. Aufl., §29 - §33

0 Vorbemerkungen

In diesem Teil des Praktikums geht es um Versuche mit Licht, bei denen die Abstände im Verhältnis zur Wellenlänge so groß sind, dass sich die Wellennatur des Lichts nicht zeigt. Eine der Schlüsse, die man daraus ziehen kann, ist, dass jeder Strahlengang der Geometrischen Optik umkehrbar ist. Diese Eigenschaft wird unter Anderem beim Bestimmen der Brennweiten von Linsen mit dem Bessel'schen oder Abbe'schen Verfahren genutzt. Diese beiden Verfahren sind auch in unseren Versuchen zum Einsatz kommen. Daneben beschäftigten wir uns mit dem Bau verschiedener Optischer Geräte wie Fernrohren, einem Projektor und einem Mikroskop. Wichtig hierbei: Die Messgeräte sind nicht sonderlich genau. Viele der Apparaturen, wie zum Beispiel die Halterung für die Dias, können nicht genau örtlich bestimmt werden, sondern liegen ein bis zwei cm entfernt von ihrem Messpunkt. Die verwendete Lampe ließ sich ebenfalls nur schwer fokussieren, es ergab sich kein erkennbarer scharfer Rand des Lichtkegels. Alle Messungen sind daher u.a. durch die divergierenden Lampenstrahlen fehlerbehaftet.

Es folgen nun einige Zusammenhänge, die im gesamten Gebiet der Geometrischen Optik von großer Bedeutung sind. In diesem Protokoll werden wir uns immer wieder auf diese beziehen.

Die folgenden Informationen stammen teilweise aus dem Buch „Eichler Krohnfeld Sahn - 33. Linsen, S.347-361.“

Snellius'sches Brechungsgesetz

Bei nahezu allen Brechungen gilt der einfache Zusammenhang der Lotwinkel und der Brechzahlen der zwei Materialien, durch die sich ein Strahl bewegt.

$$n \sin(\alpha) = n' \sin(\alpha') \quad (0.0.1)$$

Brennweite und Brechkraft einer Linse

Die Brennweite f einer Linse gibt die Distanz ausgehend von der Linsenhauptebene an, bei der sich parallel einfallende Strahlen kreuzen. Bei konvexen Linsen liegt dieser Punkt hinter der Hauptebene, bei konkaven Linsen davor. Das bedeutet, dass konvexe Linsen einfallende Lichtstrahlen auf einen bestimmten Punkt (Brennpunkt F) bündeln (Sammellinse, siehe Abb. 1) und konkave Linsen einfallende Lichtstrahlen auseinanderführen (Streulinse). Die Brechkraft D gibt im Prinzip die gleiche Eigenschaft an, steht zur Brennweite allerdings im Verhältnis

$$D = \frac{1}{f} \quad (0.0.2)$$

Setzt man mehrere Linsen hintereinander, addieren sich ihre Brechkräfte.

Abbildungen, Abbildungsmaßstab, Abbildungsgleichung

In der Geometrischen Optik kann jeder Strahlengang umgekehrt werden. Das erlaubt, solange man die Brennweite kennt, die Konstruktion eines Abbildungs-Strahlengangs einer beliebigen Linsenaufstellung (Listingsche Bildkonstruktion). Die Distanz zur Linse wird mit a gekennzeichnet. Je nachdem, wie nah sich ein Gegenstand an einer Linse befindet, verhält sich sein Bild anders:

$a \gg f$	Bild im Brennpunkt F'
$a > 2f$	Verkleinertes reelles Bild mit $f' < a' < 2f'$
$a = 2f$	Bild in Echtgröße mit $a' = 2f'$
$f < a < 2f$	Vergrößertes reelles Bild mit $a' > 2f'$
$a = f$	Kein scharfes Bild (Fokus im Unendlichen)
$0 < a < f$	Linse wirkt als Lupe: virtuelles Bild

Man bezeichnet das Bild als virtuell, wenn es nicht auf einen Schirm abgebildet werden kann, auch wenn es beim direkten Betrachten durch die Linse scharf erscheint. Ein reelles Bild hingegen kann auf einem Schirm abgebildet werden. Aus den obigen Zusammenhängen folgt ein grundlegender Satz der Geometrischen Optik: Um ein scharfes Bild zu erhalten, muss für den Abstand e zwischen Gegenstand und Schirm gelten:

$$e \geq 4f \quad (0.0.3)$$

Will man angeben, wie viel größer das Bild im Vergleich zum Gegenstand ist, zieht man den **Abbildungsmaßstab** β zur Hilfe:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad (0.0.4)$$

Daneben wichtig ist auch die **Abbildungsgleichung**

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (0.0.5)$$

Paraxialgebiet und sphärische Aberration

Viele der hier aufgezeigten Beziehungen beziehen sich *nur auf das Paraxialgebiet*, also nur auf das *Gebiet nahe der Strahlachse*. Hier gelten neben den obigen Beziehungen wegen der Nähe zum Lot der Linsenhauptebene auch Gleichungen, die die Kleinwinkelnäherung benutzen, wie zum Beispiel

$$\begin{aligned} \sin(\varepsilon) &\approx \tan(\varepsilon) \approx \varepsilon ; \\ \cos(\varepsilon) &\approx 1 \end{aligned} \quad (0.0.6)$$

Strahlen, die weit weg von der Strahlachse die Linse durchlaufen, werden bei sphärischen Linsen (mit denen hier experimentiert wurde) stärker gebrochen. Man spricht von **sphärischer Aberration**. Details zur Berechnung in Aufgabe **1.2**.

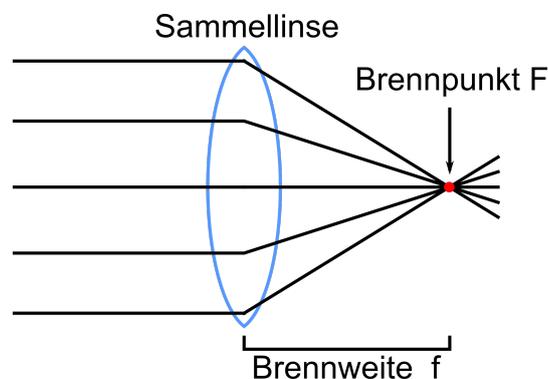


Abbildung 1: Illustration der Brennweite und des Brennpunktes einer Sammellinse.

1 Brennweiten-Bestimmungen

Eine charakteristische Eigenschaft von Sammellinsen ist ihre Brennweite. Diese ist definiert als die Distanz zwischen der Hauptebene der Linse und dem Punkt, auf dem parallel einfallende Strahlen konzentriert werden. In Abbildung 1 ist diese Eigenschaft illustriert. Für optische Anwendungen ist es wichtig, die Brennweite einer Linse möglichst genau messen zu können. Drei Messmethoden werden dafür durchgeführt.

1.1 Simple Messung mit dem Maßstab

Eine Linse mit der Brennweite $f = 5\text{cm}$ wird in möglichst großem Abstand zu einer Lampe montiert (hier 124.18cm), damit die eintreffenden Strahlen möglichst parallel sind: Je paralleler, desto akkurater wird das Ergebnis. Ein Schirm wird hinter die Linse herangeschoben, bis das Licht der Lampe genau auf einen Punkt auf dem Schirm fokussiert wird. Die Abstandsdifferenz zwischen Linse und Schirm wird bestimmt. Die Messung wird pro Praktikant zweimal wiederholt, durch den Mittelwert erhält man die Brennweite der Linse. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: **Gemessene Abstandswerte zwischen Linse und Schirm.** Diese Werte sollten der Brennweite der Linse ungefähr entsprechen. Jeder Praktikant führte zwei Messungen durch, durch den Mittelwert erhält man die Brennweite der Linse.

Praktikant	Messung 1 in cm	Messung 2 in cm
1	5.1	5.4
2	5.35	5.35

Der Mittelwert ergibt sich damit zu

$$\hat{f} = \frac{(5.1 + 5.4 + 5.35 + 5.35)}{4} \text{ cm} = 5.3 \pm 0.1 \text{ cm} \quad (1.1.1)$$

Dieser Wert ist bereits erstaunlich nah an den 5cm Brennweite der Linse, liegt aber 6% darüber. Die Ungenauigkeiten in dieser Messung sind zahlreich: Das Licht ist nicht monochromatisch, die Linse ist voll geöffnet. Dadurch kommen bereits zwei Linsenfehler mit ins Spiel, chromatische und sphärische Aberration, die ein genaues Fokussieren unmöglich machen. Hinzu kommt, dass die Lichtstrahlen, die auf die Linse fallen, weit entfernt von Parallelität liegen: Sie divergieren stark. Dadurch fallen sie auch weiter weg von der Linse wieder zusammen und es ergibt sich eine größere Brennweite. Durch den möglichst großen Abstand zur Lampe wurde der Fehler jedoch bereits um Einiges eingedämmt.

1.2 Besselsches Verfahren und Abberationsfehler

Da eine Bestimmung der Brennweite einer Linse mit Hilfe eines Maßstabs nur durch Zufall sehr exakt sein wird, soll sie mit Hilfe des Besselschen Verfahrens genauer bestimmt werden. Außerdem sollen die Auswirkungen von sphärischer und chromatischer Abberation untersucht werden. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wird ein Dia mit vorgeschaltetem Rot- oder Blaufilter (chromatische Abberation) von einer Lampe beleuchtet. Vor die zu untersuchende Linse wird eine Loch- oder Scheibenblende (sphärische Abberation) montiert.

Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Gesamtdistanz zwischen Lampe und Schirm größer als die vierfache Brennweite der Linse ist. Das folgt aus den Abbildungszusammenhängen aus der Vorbemerkung. Wird der Quotient zu groß gewählt, befindet sich die Linse zu nahe am Dia oder Schirm, um die Schärfe feststellen zu können. Wir haben uns für die bereits verwendete Linse mit einer (vorgegebenen) Brennweite von $f = 5\text{cm}$ entschieden. Die Linse wird nun so lange auf einer optischen Bank bewegt, bis sich die beiden scharfen Bilder einstellen. Bei diesen Stellungen wird

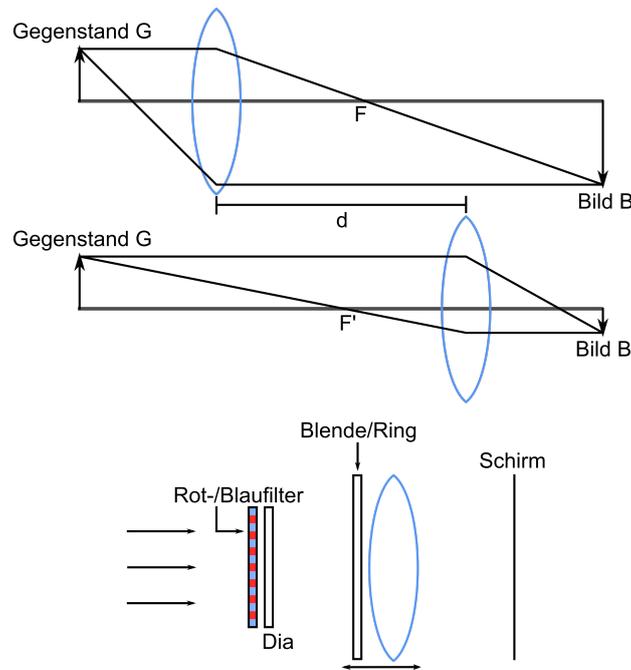


Abbildung 2: **Besselsches Verfahren zur Bestimmung der Brennweite einer Linse sowie Untersuchung von chromatischer und spärischer Abberation.** Oben zu sehen ist die theoretische Konstruktion mit Strahlengang, das untere Bild zeigt die praktische Realisierung mit dem vorhandenen Praktikumszubehör.

jeweils der Abstand zwischen Linse und Lampe notiert. Daraus lässt sich die Distanz zwischen den beiden Stellungen errechnen. Als formeller Zusammenhang für die Brennweite der Linse gilt:

$$f = \frac{s^2 - e^2}{4s} \quad (1.2.1)$$

Wobei s der Gesamtabstand zwischen Gegenstand und Schirm ist und e der Abstand zwischen den beiden Linsenpositionen, unter denen ein scharfes Bild auf den Schirm projiziert wird. Die gemessenen Werte sind in Tabellen 2 und 3 zu sehen. Wichtig bleibt anzumerken, dass alle Messungen mit Ringblende sehr ungenau sind, da das Bild bei keiner Linsenposition wirklich scharf wird. Viel mehr zeigt es vom Bild ausgehende strahlenartige Artefakte, die sich beim Schieben der Linse um ihre Quellen herumbewegen.

Zur Bestimmung der Brennweiten werden nur die Lochblenden-Messungen verwendet, da hier sphärische Aberration keinen Einfluss hat. Nimmt man die Mittelwerte eines jeden Zustandes beider Linsenpositionen, erhält man zwei Werte für e :

$$\begin{aligned} e_{1r} &= 121.64 \text{ cm} - 91.58 \text{ cm} = 30.06 \text{ cm} \\ e_{1b} &= 121.69 \text{ cm} - 91.48 \text{ cm} = 30.21 \text{ cm} \\ e_{2r} &= 123.95 \text{ cm} - 81.33 \text{ cm} = 42.62 \text{ cm} \\ e_{2b} &= 123.94 \text{ cm} - 81.23 \text{ cm} = 42.71 \text{ cm} \end{aligned} \quad (1.2.2)$$

Um nun die Brennweite bestimmen zu können, benötigt man nach Formel 1.2.1 noch den Abstand s zwischen Dia und Schirm:

$$\begin{aligned} s_1 &= 128 \text{ cm} - 85 \text{ cm} = 43 \text{ cm} \\ s_2 &= 130 \text{ cm} - 75 \text{ cm} = 55 \text{ cm} \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

Tabelle 2: **Messung der Ersten Linsenposition des Bessel-Verfahrens.** Alle Angaben in cm. Gemessener Abstand der Linse von der Lichtquelle, unter dem eine scharfe **vergrößerte** Form eines Dias auf einem Schirm abgebildet wird. Dabei wird unter zwei Zuständen unterschieden, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. „Loch“ steht hierbei für Messung mit angebrachter Lochblende, „Ring“ für Messung mit angebrachter Ringblende. Der letzte Messwert jeder Spalte gibt den Durchschnitt aller Messwerte über ihm an.

Zustand 1				Zustand 2			
Rotlicht		Blaulicht		Rotlicht		Blaulicht	
Loch	Ring	Loch	Ring	Loch	Ring	Loch	Ring
91.60	91.20	91.45	91.05	81.30	80.95	81.20	80.75
91.55	91.15	91.45	91.05	81.35	80.85	81.25	80.65
91.57	91.00	91.50	91.07	81.32	80.85	81.30	80.75
91.60	91.10	91.50	91.00	81.35	80.95	81.22	80.70
91.60	91.95	91.50	90.95	81.35	80.90	81.20	80.50
91.58	91.28	91.48	91.02	81.33	80.92	81.23	80.67
<i>Dia: 85; Schirm: 128</i>				<i>Dia: 75; Schirm: 130</i>			

Tabelle 3: **Messung der Zweiten Linsenposition des Bessel-Verfahrens.** Alle Angaben in cm. Gemessener Abstand der Linse von der Lichtquelle, unter dem eine scharfe **verkleinerte** Form eines Dias auf einem Schirm abgebildet wird. Dabei wird unter zwei Zuständen unterschieden, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. „Loch“ steht hierbei für Messung mit angebrachter Lochblende, „Ring“ für Messung mit angebrachter Ringblende. Der letzte Messwert jeder Spalte gibt den Durchschnitt aller Messwerte über ihm an.

Zustand 1				Zustand 2			
Rotlicht		Blaulicht		Rotlicht		Blaulicht	
Loch	Ring	Loch	Ring	Loch	Ring	Loch	Ring
121.60	122.20	121.80	122.45	123.95	124.45	124.00	124.45
121.65	122.20	121.65	122.20	123.95	124.40	123.90	124.50
121.75	122.30	121.70	122.25	124.00	124.40	123.90	124.48
121.60	122.20	121.65	122.27	123.90	124.45	123.95	124.40
121.60	122.20	121.65	122.20	123.95	124.41	123.95	124.42
121.64	122.22	121.69	122.27	123.95	124.42	123.94	124.45
<i>Dia: 85; Schirm: 128</i>				<i>Dia: 75; Schirm: 130</i>			

Womit für die Brennweite der Linse aus dem Mittelwert beider Zustände folgt:

$$\begin{aligned}
 f_{1r} &= \frac{(43 \text{ cm})^2 - (30.06 \text{ cm})^2}{4 \cdot 43 \text{ cm}} \approx 5.50 \text{ cm} \\
 f_{1b} &= \frac{(43 \text{ cm})^2 - (30.21 \text{ cm})^2}{4 \cdot 43 \text{ cm}} \approx 5.44 \text{ cm} \\
 f_{2r} &= \frac{(55 \text{ cm})^2 - (42.62 \text{ cm})^2}{4 \cdot 55 \text{ cm}} \approx 5.50 \text{ cm} \\
 f_{2b} &= \frac{(55 \text{ cm})^2 - (42.71 \text{ cm})^2}{4 \cdot 55 \text{ cm}} \approx 5.46 \text{ cm} \\
 \implies f_1 &= (5.50 + 5.44 + 5.50 + 5.46) \text{ cm} \div 4 = 5.475 \text{ cm}
 \end{aligned} \tag{1.2.4}$$

Dieser Wert ist noch größer als der in Aufgabe 1.1 berechnete. Das kann viele Gründe haben. Der

vermutlich größte Fehler in dieser Messung kommt von der Position des Dias, dessen Marker zwar genau ablesbar war, das sich jedoch nicht genau über diesem befand (siehe auch Vorbemerkungen). Dadurch liegt auf jeder errechneten Distanz ein Fehler von einigen cm, was im Umkehrschluss die hier erkannte Abweichung von knapp 9.5% möglicherweise berechtigt.

1.2.1 Bestimmung der Chromatischen Aberration

Bereits aus den Messergebnissen in Tabellen 2 und 3 erkennt man, dass das kurzwelligere blaue Licht den Brennpunkt der Linse „verkürzt“. Tatsächlich wird kurzwelliges Licht stärker gebrochen als langwelliges Licht, was zu unschärferen Rändern führt, wenn man weißes Licht durch eine Linse scheinen lässt. Diesen Effekt nennt man **chromatische Aberration**. Um herauszufinden, wie stark der Effekt bei dieser Linse ist, vergleicht man die Brennweiten unter rotem und unter blauem Licht. Betrachtet man Gleichung 1.2.1, kann man schließen:

$$\begin{aligned}\Delta f_{1l} &= (5.50 - 5.44) \text{ cm} = 0.06 \text{ cm} \\ \Delta f_{2l} &= (5.50 - 5.46) \text{ cm} = 0.04 \text{ cm} \\ \implies \Delta f_l &= 0.05 \text{ cm (Mittelwert)}\end{aligned}\tag{1.2.5}$$

Da chromatische Aberration prozentual eine größere Aussage hat, gilt im Verhältnis zur Brennweite:

$$\frac{\Delta f_l}{f_l} = \frac{0.05}{5.475} \approx 0.91\%\tag{1.2.6}$$

Also wird blaues Licht von dieser Linse ungefähr 0.91% stärker gebrochen als rotes Licht.

1.2.2 Bestimmung der Sphärischen Aberration

Ähnlich wie bei der Chromatischen Aberration wird die Sphärische Aberration als Verhältnis bestimmt. Wie in der Vorbemerkung bereits erwähnt, wird diese hervorgerufen durch die Verwendung von sphärischen Linsen, die Licht außerhalb des Paraxialgebiets stärker brechen. Berechnet man analog zu 1.2.4 die Brennweiten nach den Ringblenden-Messungen, erkennt man, dass weiter außen einfallende Strahlen tatsächlich stärker gebrochen werden. Die Ringblende blockiert das Paraxialgebiet, wodurch nur achsferne Strahlen auf die Linse treffen.

$$\begin{aligned}e_{1rr} &= 122.22 \text{ cm} - 91.28 \text{ cm} = 30.94 \text{ cm} \\ e_{1rb} &= 122.27 \text{ cm} - 91.02 \text{ cm} = 31.25 \text{ cm} \\ e_{2rr} &= 124.42 \text{ cm} - 80.92 \text{ cm} = 43.50 \text{ cm} \\ e_{2rb} &= 124.45 \text{ cm} - 80.67 \text{ cm} = 43.78 \text{ cm}\end{aligned}\tag{1.2.7}$$

Wie schon für die Lochblende errechnet sich die Brennweite als Durchschnitt aller Brennweiten der Messungen in Zustand 1 und 2 mit rotem und blauem Licht:

$$\begin{aligned}f_{1rr} &= \frac{(43 \text{ cm})^2 - (30.94 \text{ cm})^2}{4 \cdot 43 \text{ cm}} \approx 5.18 \text{ cm} \\ f_{1rb} &= \frac{(43 \text{ cm})^2 - (31.25 \text{ cm})^2}{4 \cdot 43 \text{ cm}} \approx 5.07 \text{ cm} \\ f_{2rr} &= \frac{(55 \text{ cm})^2 - (43.50 \text{ cm})^2}{4 \cdot 55 \text{ cm}} \approx 5.15 \text{ cm} \\ f_{2rb} &= \frac{(55 \text{ cm})^2 - (43.78 \text{ cm})^2}{4 \cdot 55 \text{ cm}} \approx 5.04 \text{ cm} \\ \implies f_r &= (5.18 + 5.07 + 5.15 + 5.04) \text{ cm} \div 4 = 5.11 \text{ cm}\end{aligned}\tag{1.2.8}$$

Teilt man die Paraxial-ferne Brennweite durch die genauere mittige Brennweite, erhält man die prozentuale Angabe der Sphärischen Aberration:

$$\frac{f_r}{f_l} = 93.4\% \quad (1.2.9)$$

Also bricht die Linse weiter außen einfallendes Licht 6.6% stärker als achsnahes Licht.

1.3 Abbé-Verfahren zur Charakterisierung eines Zweilinsensystems

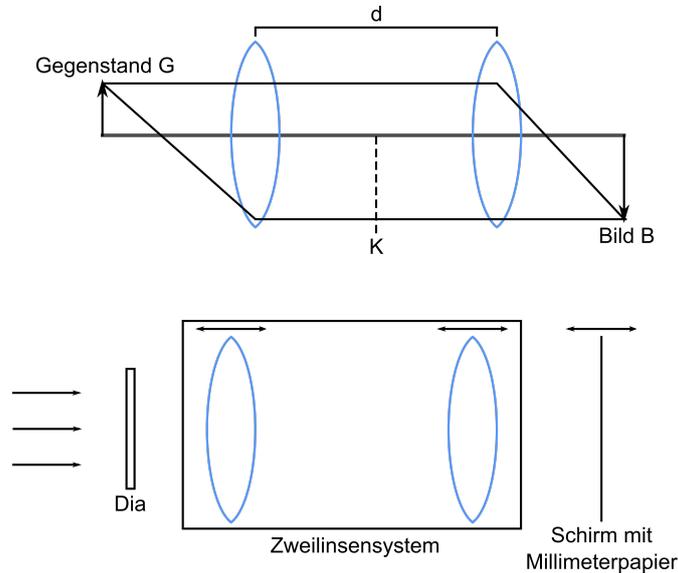


Abbildung 3: **Abbésches Verfahren zur Bestimmung der Brennweite eines Zweilinsensystems.** Oben zu sehen ist die theoretische Konstruktion mit Strahlengang, das untere Bild zeigt die praktische Realisierung mit dem vorhandenen Praktikumszubehör.

Das Abbésche Verfahren dient zur Bestimmung der Gesamtbrennweite und Hauptebenenabstände von Linsensystemen. In diesem Versuch soll diesbezüglich ein Zweilinsensystem untersucht werden. Dieses wird mit einem vorgeschalteten Dia auf die optische Bank montiert. Nach einmaligem Scharfstellen des Bildes auf dem Schirm verbleiben die regelbaren Linsen des Zweilinsensystems in dieser Position. Anschließend wird eine beliebige Markierung K zwischen den beiden Linsen kleinschrittig verschoben. Insgesamt haben wir je Versuch sieben verschiedene Gegenstand-Marker-Abstände verwendet. Der Schirm wird dann so justiert, dass sich wiederum ein scharfes Bild ergibt. Gemessen wird jeweils die aktuelle Position von K, die Position des Schirmes ¹ und der Vergrößerungsfaktor des Dias. Zu diesem Zweck wurde ein Dia verwendet, welches einen Zentimeter in feiner Unterteilung zeigt. Der Vergleich mit dem Millimeterpapier auf dem Schirm liefert den gesuchten Vergrößerungsfaktor. Die gesamte Messung wird anschließend mit dem um 180° gedrehten Linsensystem wiederholt. Außerdem wird eine zweite Messreihe mit anderen Linsenpositionen durchgeführt. Die Messergebnisse finden sich in Tabelle 4.

Da wir Schwierigkeiten bei der Scharfstellung hatten, liegen unsere beiden Linsenpositionen nahe aneinander. Dies wird sich vermutlich auf die Genauigkeit des Ergebnisses auswirken. Im Folgenden werden die durchgeführten Berechnungen erläutert.

Der gemessene Vergrößerungsfaktor ist jeweils definiert als:

$$\gamma = \frac{B}{G} = \frac{b}{a} \quad (1.3.1)$$

¹Dieser Wert wird für die lineare Regression zwar nicht benötigt, findet sich der Vollständigkeit halber aber trotzdem in unseren Messergebnissen.

Weiterhin gilt mit dem Zusammenhang zur Gesamtbrennweite

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{a} \implies \frac{a}{b} = \frac{a}{f} - 1 \implies \frac{1}{\gamma} = \frac{a}{f} - 1 \implies a = f \cdot \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (1.3.2)$$

Mit der Relation aus der Skizze:

$$x = a + h_1 \quad (1.3.3)$$

folgt schließlich:

$$x = f \cdot \left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) + h_1 \quad (1.3.4)$$

Selbiges gilt mit h_2 , wenn das Linsensystem um 180° gedreht wird. Mit Formel (1.3.4) kann eine lineare Regression durchgeführt werden.

Dazu wird jeweils die Distanz zwischen Gegenstand (Dia) und der Markierung K gemessen, diese Werte werden auf der y-Achse des Plots aufgetragen. Auf den gemessenen Vergrößerungsfaktor wird die Funktion $F(\gamma) = \frac{1}{\gamma} + 1$ angewandt, diese Werte sind auf der x-Achse aufgetragen. Für die linearen Regressionen ergeben sich die Abbildungen 4 und 5.

Die aus der linearen Regression gewonnenen Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt.

Abschließend sollen aus den beiden Gesamtbrennweiten die Einzelbrennweiten f_1 und f_2 berechnet werden. Diese sind über die Formel

$$\frac{1}{f_{ges(1,2)}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d_{(1,2)}}{f_1 \cdot f_2} \quad (1.3.5)$$

miteinander verknüpft.

Tabelle 4: **Messungen des Abbé-Verfahrens.** Alle Angaben in cm. Es wurden unter zwei verschiedenen Linsenabständen gemessen, die durch die Spalten unterschieden werden. Darunter stehen die jeweiligen Positionen des Dias und die verwendeten Linsenpositionen in „Strichen auf dem Tubus“. Beide Linsenpositionen wurden jeweils sieben Mal in normaler und in um 180° gedrehter Anordnung vermessen. B/G steht hierbei für das Größenverhältnis zwischen Bild und Gegenstand.

	Linsenabstand 1			Linsenabstand 2		
	k	Schirm	B/G	k	Schirm	B/G
Normal	90.00	140.00	4.98	65.00	92.70	2.45
	90.50	131.50	3.76	65.50	90.75	2.20
	91.00	124.80	3.13	66.00	89.15	1.95
	91.50	121.20	2.70	66.50	88.00	1.75
	92.00	118.30	2.33	67.00	87.00	1.60
	92.50	116.60	2.10	67.50	86.35	1.46
	93.00	115.10	1.88	68.00	85.95	1.38
Gedreht	90.00	111.65	1.10	65.00	85.40	1.14
	90.50	111.60	1.06	65.50	85.35	1.10
	91.00	111.50	1.00	66.00	85.25	1.05
	91.50	111.60	0.95	66.50	85.28	1.00
	92.00	111.60	0.91	67.00	85.20	0.98
	92.50	111.75	0.89	67.50	85.40	0.90
	93.00	112.00	0.84	68.00	85.48	0.84
<i>Dia: 76.55, L1/L2 = 1,0</i>			<i>Dia: 51.00, L1/L2 = 3,1</i>			

Tabelle 5: **Ergebnisse der linearen Regression.** Alle Messswerte in cm. Es wird unterschieden zwischen normaler und gedrehter Anordnung, sowie zwischen beiden Linsenpositionen.

		f	Durchschnitt	h	$d = h_1 + h_2$
Stellung 1	0°	9.2	8.65	2.4	0.6
	180°	8.1		-1.8	
Stellung 2	0°	9.2	9.35	1.1	-2.5
	180°	9.5		-3.6	

Die Gesamtbrennweiten $f_{ges,1}$ und $f_{ges,2}$ sowie die Linsenabstände d_1 und d_2 wurden in der linearen Regression berechnet. Es folgt:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{f_{ges,1}} &= \frac{1}{f_{ges,2}} - \frac{d_1 - d_2}{f_1 f_2} \\
 \implies f_1 f_2 &= \frac{d_2 - d_1}{\frac{1}{f_{ges,1}} - \frac{1}{f_{ges,2}}} = -358.17 \text{ cm}^2 \\
 \implies \frac{1}{f_2} &= \frac{f_1}{f_1 f_2} = \frac{1}{f_{ges,2}} - \frac{1}{f_1} + \frac{d_2}{f_1 f_2} \\
 \implies f_{1,2} &= \frac{(\frac{f_1 f_2}{f_{ges,2}} + d_2)}{2} \pm \sqrt{[\frac{(\frac{f_1 f_2}{f_{ges,2}} + d_2)}{2}]^2 - f_1 f_2} \\
 \implies f_1 &= 7.43 \text{ cm}; \quad f_2 = -48.23 \text{ cm.}
 \end{aligned} \tag{1.3.6}$$

Insgesamt sollte jedoch angemerkt werden, dass die Werte wohl keine hohe Genauigkeit besitzen. Eine Zerstreuungslinse mit 48 cm Brennweite halten wir in dem Linsensystem für unwahrscheinlich. Weiterhin kommen durch die mehreren Ungenauigkeiten bei der Durchführung hohe Fehler ins Spiel, sodass auch die letztendlich ausgerechneten Brennweiten fehlerbehaftet sind, wodurch die Werte bis auf zwei Nachkommastellen vermutlich in abschließender Analyse wenig sinnvoll sind.

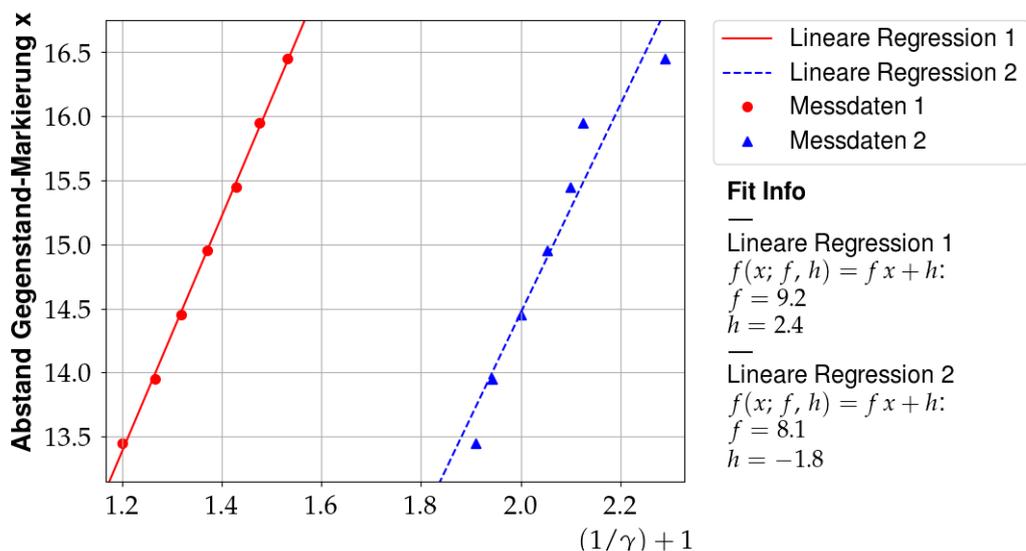


Abbildung 4: **Ergebnisse der linearen Regression mit der ersten Spiegelstellung.** Der rote Graph zeigt die Ausgleichsgerade zur ersten Messreihe, beim blauen Graphen wurde das System um 180° gedreht.

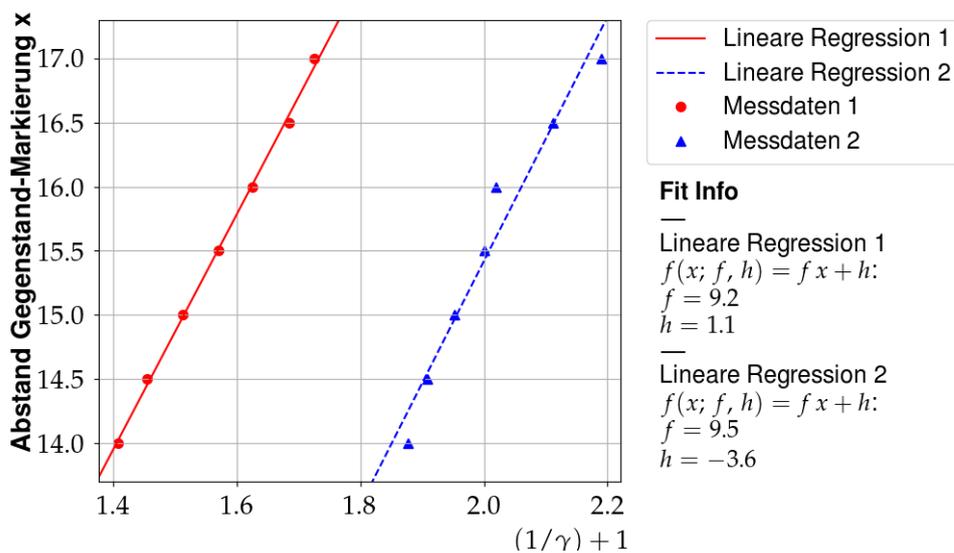


Abbildung 5: **Ergebnisse der linearen Regression mit der zweiten Spiegelstellung.** Der rote Graph zeigt die Ausgleichsgerade zur ersten Messreihe, beim blauen Graphen wurde das System um 180° gedreht.

2 Aufbau optischer Instrumente

2.1 Bau eines Fernrohrs

Fernrohre bestehen hauptsächlich aus Kombinationen zweier Linsen in passendem Abstand. Zwei häufige Bauweisen sind dabei Kepler- und Galilei-Fernrohre.

Kepler-Fernrohr

Ein Kepler-Fernrohr besteht aus zwei konvexen Linsen. Dabei sollte die als Objektiv fungierende Linse eine möglichst große Brennweite haben und die als Okular verwendete eine möglichst kleine. Die Linsen werden dann so positioniert, dass ihre Brennpunkte möglichst exakt zusammenfallen (Abbildung 6). Dort kreuzen sich durch das Objektiv einfallende Strahlen und man sieht durch das Okular ein „auf dem Kopf stehendes“ virtuelles Bild. Die Vergrößerung eines Kepler-Fernrohres errechnet man mit der Formel

$$\Gamma_{\text{Kep}} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \approx \frac{f_{\text{Obj}}}{f_{\text{Ok}}} \quad (2.1.1)$$

Wobei ε der Winkel zum Lot auf der Linsenebene ist. Die gestrichene Größe ist dabei der Bildwinkel, die ungestrichene Größe der einfallende Gegenstandswinkel.

Wollen wir eine mindestens sechsfache Vergrößerung, brauchen wir also mindestens ein Verhältnis von:

$$\frac{f_{\text{Obj}}}{f_{\text{Ok}}} \geq 6 \quad (2.1.2)$$

Um diesen Wert auf jeden Fall zu erreichen und da die Auswahl auf gewisse Linsen beschränkt war, wurde für das Objektiv eine Sammellinse mit einer Brennweite von $f_{\text{Obj}} = 50 \text{ cm}$ und für das Okular eine Sammellinse mit $f_{\text{Ok}} = 5 \text{ cm}$ gewählt. Für die Länge des Fernrohres (also für den Abstand zwischen den beiden Linsen) folgt dann:

$$l = f_{\text{Obj}} + f_{\text{Ok}} = 50 \text{ cm} + 5 \text{ cm} = 55 \text{ cm} \quad (2.1.3)$$

und eine Vergrößerung von

$$\Gamma_{\text{Kep}} \approx \frac{50 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} = 10 \quad (2.1.4)$$

Auf die tatsächliche Messung des Vergrößerungsfaktors wurde verzichtet, da sich dieses Verfahren in früheren Versuchsreihen als wenig aussagekräftig herausgestellt hat.

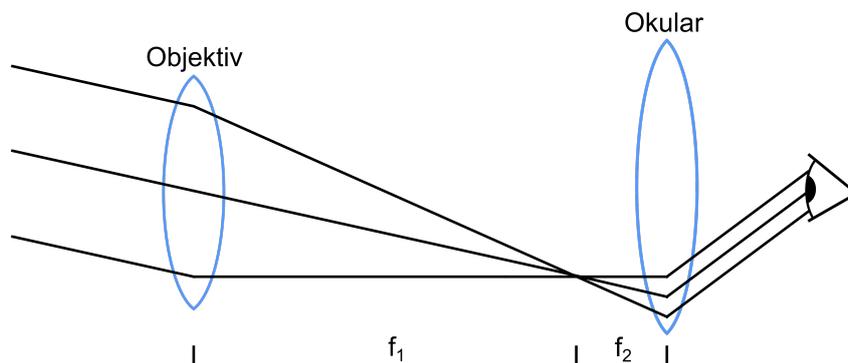


Abbildung 6: **Aufbau eines Kepler-Teleskops.** Das Kepler-Teleskop besteht aus zwei konvexen Linsen unterschiedlicher Brennweite. In dieser Illustration ist das Okular größer dargestellt, um den Strahlengang besser zu veranschaulichen. In der Realität besitzt das Okular eine kleinere Brennweite als das Objektiv.

Galilei-Fernrohr

Im Gegensatz zum Kepler-Fernrohr besteht das Galilei-Fernrohr aus einem konvexen Okular und einem konkaven Objektiv. Die beiden Linsen werden so positioniert, dass die Distanz genau die Summe der beiden Brennweiten beträgt (die Brennweite der konkaven Linse ist dabei negativ). Im Gegensatz zum Kepler-Fernrohr ist das Galilei-Fernrohr meist kompakter. Wie außerdem im Strahlengang (Abbildung 7) zu sehen ist, kreuzen sich die einfallenden Strahlen nicht, sodass das Bild ungespiegelt zu sehen ist. Ähnlich zum Kepler-Fernrohr gilt für die Vergrößerung:

$$\Gamma_{\text{Gal}} = \frac{f_{\text{Obj}}}{|f_{\text{Ok}}|} \quad (2.1.5)$$

Hierbei wurden dieselben Brennweiten mit konkavem Okular verwendet. Der theoretische Vergrößerungsfaktor errechnet sich also ebenfalls zu:

$$\Gamma_{\text{Gal}} \approx \frac{50 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} = 10 \quad (2.1.6)$$

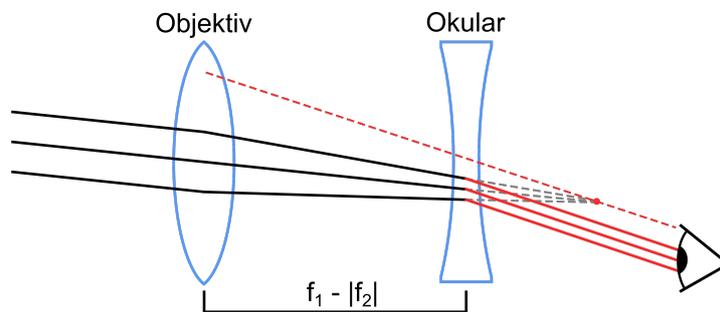


Abbildung 7: **Aufbau eines Galilei-Fernrohrs.** Das Galilei-Fernrohr besteht aus einem konvexen Objektiv und einem konkaven Okular.

2.2 Projektionsapparat

Zur vergrößerten Darstellung eines Diapositivs soll ein Projektionsapparat konstruiert werden. Dieser besteht aus einer Lichtquelle, hinter die ein Kondensator geschaltet ist. Der Kondensator dient dabei dazu, eine möglichst gleichmäßige und vollständige Beleuchtung des nahe hinter dem Kondensator plazierten Dias zu gewährleisten. Zwischen Dia und Schirm befindet sich eine weitere Linse als Objektiv. Als Dia wird der Zentimetermaßstab und als Schirm Millimeterpapier verwendet, um den Vergrößerungsfaktor messen zu können. Der Aufbau mit Strahlengang ist in Abbildung 8 zu sehen. Vorgegeben war ein Vergrößerungsfaktor von mindestens 10 bei einem Abstand von 1,5m zwischen Schirm und Dia. Die theoretischen Berechnungen zur zu verwendenden Brennweite lauten:

$$b + g = 1,5 \text{ m} \quad ; \quad \gamma = 10 = \frac{b}{g} \quad \implies \quad b = 10 \cdot g \quad (2.2.1)$$

Daraus folgt für b, g und f:

$$g \approx 13.6 \text{ cm}, \quad b \approx 136.4 \text{ cm}, \quad f \approx 12.4 \text{ cm}. \quad (2.2.2)$$

Aufgrund des Aufbaus auf der optischen Bank musste der Abstand verkürzt werden. Um dies auszugleichen, wurde eine Linse mit der Brennweite $f = 10 \text{ cm}$ verwendet. Bei Werten von

$$g \approx 10.3 \text{ cm}, \quad b \approx 121.3 \text{ cm} \quad (2.2.3)$$

ergab sich ein recht genau ablesbarer Vergrößerungsfaktor von $\gamma = 11$. Die Theorie liefert nach obiger Vorgehensweise für diese Werte einen Vergrößerungsfaktor von $\gamma_T \approx 11.8$.

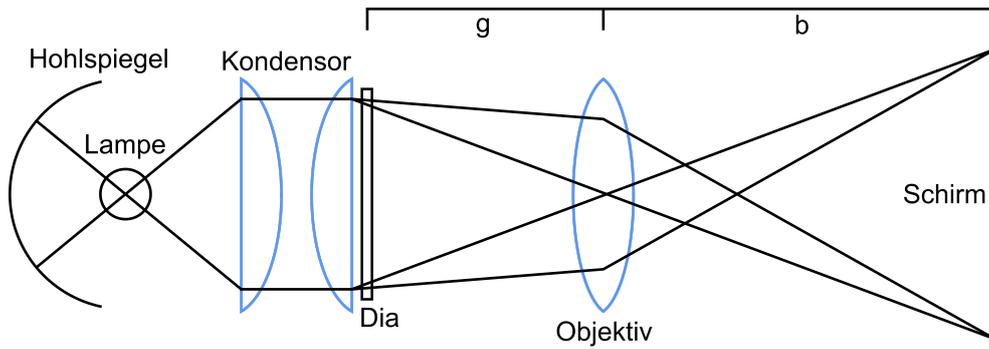


Abbildung 8: **Aufbau eines Projektionsapparates.** Bei diesem Versuch sind theoretische Konstruktion und praktischer Versuchsaufbau nahezu identisch.

2.3 Mikroskop

Ein Mikroskop dient dazu, einen kleinen Ausschnitt eines Bildes sehr stark zu vergrößern. Es wird dabei auf eine ähnliche Technik wie bei einem Keplerschen Fernrohr zurückgegriffen. Auch beim Mikroskop werden zwei konvexe Linsen verwendet, deren Brennpunkte zusammenfallen. Jedoch dient beim Mikroskop das Objektiv nicht zum Einfangen nahezu paralleler Strahlen aus großer Entfernung, sondern zum Einfangen stark divergierender Strahlen eines Gegenstands direkt vor ihm. Daher wird als Objektiv eine Sammellinse mit möglichst kurzer Brennweite verwendet. Betrachtet man in der Sektion „Vorbereitung“ die Verhältnisse zwischen Vergrößerung und Abstand des Gegenstands von der Linse, erkennt man, dass eine Vergrößerung im Falle $f < a < 2f$ eintritt. Das vergrößerte Bild ist dann im Abstand $a' > 2f$ hinter der Linse abgebildet. Diese Technik wendet man beim Mikroskop auch an. Durch Positionierung eines Dias etwas weiter als eine Brennweite von der Linse weg wird ein scharfes Reelles Bild in die Ebene zwischen Objektiv und Okular geworfen. Das Okular wird dann genau so positioniert, dass dessen Brennpunkt mit der Zwischenebene übereinstimmt. Somit werden die Strahlen gemäß dem Fall $a = f$ durch das Okular zu parallel verlaufenden Strahlen und man kann beim Durchsehen ein stark vergrößertes virtuelles Bild im Unendlichen erkennen (siehe Abbildung 9). Mit der **Abbildungsgleichung** aus der Vorbemerkung lässt sich durch Auflösen nach a' die Vergrößerung des Mikroskops berechnen. Sie beträgt

$$\gamma \approx \frac{b s_0}{f_1 f_2} \quad (2.3.1)$$

Wobei s_0 die Bezugssehweite $s_0 = 25 \text{ cm}$ (Distanz, unter der das menschl. Auge nicht akkomodieren muss) ist. Die Größe b lässt sich anhand Abbildung 9 als $e - f_2$ erkennen, also der Abstand zwischen den Linsen minus die Brennweite des Okulars. f_1 ist die Brennweite des Objektivs, f_2 ist die Brennweite des Okulars.

Die Lampe ist im Versuch an dem Punkt $D_L = 3 \text{ cm}$ angebracht, das Dia bei $D_D = 20.49 \text{ cm}$. Das Objektiv sitzt direkt hinter dem Dia, bei $D_{\text{Obj}} = 25.7 \text{ cm}$, das Okular bei $D_{\text{Ok}} = 106 \text{ cm}$. Dabei hat das Objektiv eine Brennweite von $f_1 = 5 \text{ cm}$ und das Okular eine Brennweite von $f_2 = 10 \text{ cm}$.

Möchte man überprüfen, ob der Abstand der Linsen richtig gewählt wurde, kann man diese in die Abbildungsgleichung einsetzen. Hierbei gilt für den Abstand des Gegenstands von der ersten Linse $a = D_{\text{Obj}} - D_D$ und für den Abstand des scharfen Bildpunkts $a' = D_{\text{Ok}} - D_{\text{Obj}} - f_2$, da der Bildpunkt der ersten Linse mit der Brennweite f_2 der zweiten Linse zusammenfallen sollten. Setzt man all das

ein und löst nach f_1 auf, sollte man die bekannte Brennweite Objektivs erhalten.

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_1} &= \frac{1}{D_{\text{Obj}} - D_{\text{D}}} + \frac{1}{D_{\text{Ok}} - D_{\text{Obj}} - f_2} \\ &= \frac{1}{(25.7 - 20.49) \text{ cm}} + \frac{1}{(106 - 25.7 - 10) \text{ cm}} \\ &\approx 0.2061 \text{ cm} \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

$$\Leftrightarrow f_1 \approx 4.85 \text{ cm}$$

Dieses Ergebnis stimmt mit der Angabe der Linse überein. Somit sind die Abstände zwischen den Linsen korrekt gewählt.

Um die Vergrößerung des Mikroskops zu erhalten, setzt man nun den berechneten Wert für b , die Bezugssehweite s_0 , sowie die Brennweiten der beiden Linsen in die Mikroskopgleichung ein, erhält man eine ungefähre Vergrößerung von

$$\gamma \approx \frac{70.4 \text{ cm} \cdot 25 \text{ cm}}{5 \text{ cm} \cdot 10 \text{ cm}} = 35.2 \quad (2.3.3)$$

Möchte man die Vergrößerung des Mikroskops noch viel weiter in die Höhe treiben, könnte man meinen, man sollte Linsen mit noch kürzeren Brennweiten verwenden. Dabei ergibt sich aber das Problem, dass sich dann die Welleneigenschaften des Lichts zeigen und Effekte wie Beugung auftreten. Je kleiner die Brennweite einer Linse wird, desto kleiner wird das Verhältnis zwischen Wellenlänge des Lichts und Abstand und die Gesetze der Geometrischen Optik treffen immer weniger zu. Für sehr starke Vergrößerungen müsste man daher beispielsweise Elektronenmikroskope verwenden.

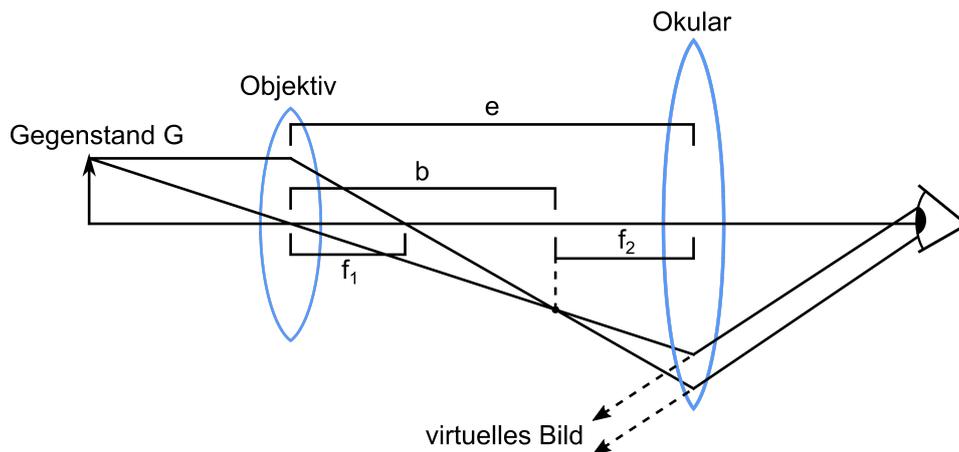


Abbildung 9: **Aufbau eines Mikroskops.** Durch die Anordnung der zwei Sammellinsen entsteht für den Betrachter ein stark vergrößertes Bild im Unendlichen.