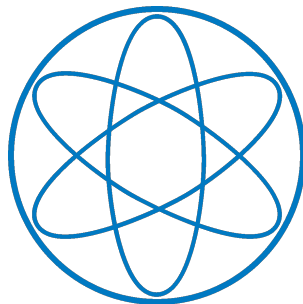


# Anfängerpraktikum Teil 3

## (Optik und Atomphysik)

### Optische Abbildung



Kurs 3, Gruppe 1, Team 2:

Eduard Koller

Michael Labenbacher

Fakultät für Physik

Technische Universität München

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Verwendete Methoden</b>	<b>1</b>
2.1. Autokollimation-Verfahren . . . . .	2
2.2. Bessel-Verfahren . . . . .	2
2.3. Kombination von Autokollimation- und Bessel-Verfahren . . . . .	3
2.4. Abbe-Verfahren . . . . .	3
<b>3. Experimentelles Vorgehen</b>	<b>4</b>
3.1. Bestimmung des Linsentyps . . . . .	4
3.2. Linsen-Verfahren . . . . .	4
3.2.1. Autokollimation-Verfahren . . . . .	4
3.2.2. Bessel-Verfahren . . . . .	4
3.2.3. Abbe-Verfahren . . . . .	5
<b>4. Auswertung der Messergebnisse</b>	<b>5</b>
4.1. Fehlerbetrachtung . . . . .	5
4.2. Charakterisierung der Linsen . . . . .	5
4.3. Einzellinsen . . . . .	5
4.4. Linsensystem . . . . .	6
<b>5. Diskussion</b>	<b>7</b>
5.1. Einzellinsen . . . . .	7
5.2. Linsensystem . . . . .	8
<b>6. Fragen</b>	<b>8</b>
<b>Anhang</b>	<b>10</b>
<b>A. Messergebnisse und Berechnungen</b>	<b>10</b>
A.1. Einzellinsen . . . . .	10

A.2. Linsensystem . . . . .	10
<b>B. Literaturverzeichnis</b>	<b>13</b>

## 1. Einleitung

In den folgenden Versuchsreihen werden Eigenschaften, wie Brennweite und Hauptebenenabstand, von optischen Systemen analysiert. Dabei wird der Wellencharakter des Lichts außer Acht gelassen, die Annahmen der geometrischen Optik verwendet und auf Abbildungsfehlern eingegangen. Angemerkt sei hier, dass Messergebnisse dem Anhang zu entnehmen sind und die Vorzeichenkonvention der Anleitung [1] verwendet wird.

## 2. Verwendete Methoden

Der Ausgangspunkt stellt die Linsengleichung, für gleiches Medium auf beiden Seiten,

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f}, \quad (2.1)$$

dar. Gleichung (2.1) liefert den Zusammenhang des bildseitigen Brennpunkts  $f'$  mit der Objekt- und Bildweite  $a$  bzw.  $a'$ . Das Verhältnis

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{f' - a'}{f'} \quad (2.2)$$

zwischen Bild- und Objektgröße  $y'$  bzw.  $y$  bezeichnet man als Abbildungsmaßstab  $\beta$ .

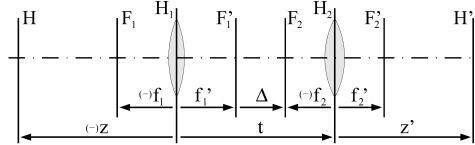


Abbildung 2.1.: Bezeichnungen für Linsensysteme. [1]

Für Linsensysteme, siehe [Abbildung 2.1](#), bezeichnet man

$$\Delta = t - f_1' - f_2' \quad (2.3)$$

als Abstand der inneren beiden Brennpunkte und  $t$  als Tubuslänge des Systems. Die Brennweite des Linsensystems folgt mit

$$f' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta} \quad (2.4)$$

Zusammenhänge zu den Abständen der Hauptebenen  $H$  und  $H'$  des Systems von den einzelnen Hauptebenen der Linsen  $H_1$  und  $H_2$  sind durch

$$z = \frac{f_1 \cdot t}{\Delta} \quad z' = \frac{f_2' \cdot t}{\Delta} \quad h = \frac{t^2}{\Delta} \quad (2.5)$$

gegeben. Zur Bestimmung bestimmter Kenngrößen von Linsen und Linsensystemen werden die in den folgenden Abschnitten aufgelisteten Verfahren benutzt.

### 2.1. Autokollimation-Verfahren

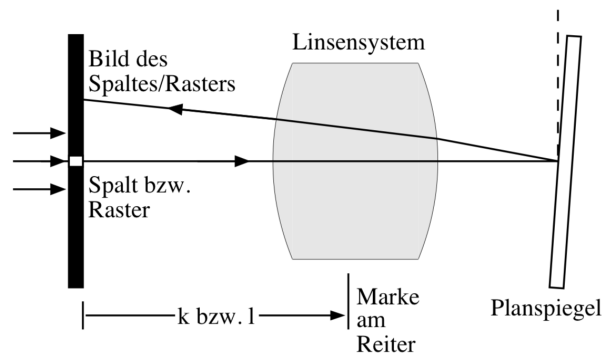
Zur Bestimmung der Brennweite und des Hauptebenenabstandes wird in dieser Methode die Umkehrbarkeit des Strahlenganges ausgenutzt. Die Grundidee ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Ein Gegenstand, vorzugsweise ein Gitter oder Spalt, wird beleuchtet und über ein optisches System auf die Bildseite abgebildet. Dort wird er an einem Spiegel reflektiert und zurück auf die Gegenstandseite auf den Gegenstand abgebildet. Für ein scharfes Bild, muss der Strahlengang symmetrisch sein, dies ist genau dann der Fall, falls der Gegenstand in der Brennebene  $f$  steht, man misst hier den Abstand  $k$ . Anschließend dreht man das Linsensystem um  $180^\circ$  und wiederholt den Vorgang, um  $l$  zu bestimmen. Aus der Skizze 2.2 erkennt man den Zusammenhang

$$k + l = -2f + h = 2f' + h, \quad (2.6)$$

woraus man die Brennweite bzw. den Hauptebenenabstand erhält

$$f' = \frac{k + l - h}{2} \quad h = k + l - 2f', \quad (2.7)$$

wenn jeweils das andere bekannt ist.



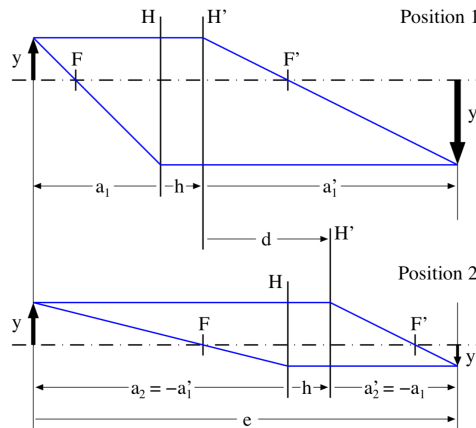
**Abbildung 2.2.:** Autokollimation: Der Gegenstand, ein Spalt bzw. Raster, wird an einem Spiegel in der Bildebene in die Objektebene gespiegelt, so dass ein scharfes Bild entsteht. [1]

### 2.2. Bessel-Verfahren

Analog zur Autokollimation 2.1 wird in diesem Verfahren die Umkehrbarkeit des Strahlenganges ausgenutzt. Dies fordert die Existenz, bei ausreichend großem Abstand  $e$  zwischen Bild und Objekt, von zwei Linsenstellungen, bei denen man ein scharfes Bild erhält. Dabei muss für Messungen das optische System ein reelles Bild liefern und mit Gleichung (2.1) folgt in diesen Abständen für die Brennweite

$$f' = \frac{1}{4} \left[ (e - h) - \frac{d^2}{e - h} \right], \quad (2.8)$$

mit  $d$  dem Abstand der Positionen des Linsensystems, wo jeweils ein scharfes Bild vorliegt und  $h$  dem Hauptebenenabstand.



**Abbildung 2.3.:** Bessel-Verfahren: Der Gegenstand, ein Raster, wird auf einen Schirm in der Objektebene abgebildet. Dabei existieren zwei Linsenstellungen, in denen eine scharfe (reelle) Abbildung, einmal vergrößert bzw. verkleinert, erzeugt wird. [1]

### 2.3. Kombination von Autokollimation- und Bessel-Verfahren

Mit den beiden zuvor beschriebenen Messverfahren lässt sich aus den Gleichungen (2.7) und (2.8) die Brennweite und der Hauptebenenabstand

$$f' = \frac{1}{2} \sqrt{(e - k - l)^2 - d^2} \quad h = l + k - \sqrt{(e - k - l)^2 - d^2} \quad (2.9)$$

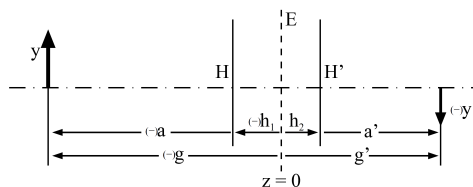
aus messbaren Größen berechnen.

### 2.4. Abbe-Verfahren

In Abhängigkeit der Gegenstandsweite  $a$  werden in dieser Methode der Abbildungsmaßstab und die Bildweite  $a'$  gemessen. I. A. ist die Lage der Hauptebenen  $H$  und  $H'$  unbekannt, weshalb eine beliebige, mit hoher Messgenauigkeit bestimmbare Bezugsebene  $E$ , wie in Abbildung 2.4 erkennbar, festgelegt wird. Damit ändern sich die Messgrößen auf  $g$  und  $g'$  zwischen Objekt bzw. Bild und der Ebene  $E$ . Mit der Definition (2.2) folgen die Beziehungen

$$g = f \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) + h_1 \quad g' = f' \cdot (1 - \beta) + h_2 \quad (2.10)$$

und es lassen sich aus der Steigung dieser bezüglich  $1 - 1/\beta$  bzw.  $1 - \beta$  linearen Funktionen die Brennweiten  $f$  bzw.  $f'$  und aus dem  $y$ -Schnittpunkt der Hauptebenenabstand  $h = h_2 - h_1$  berechnen.



**Abbildung 2.4.:** Abbe-Verfahren: Der Gegenstand, z. B. ein Raster, wird auf einen Schirm projiziert, die Bild-, Gegenstandshöhen und -weiten werden gemessen. [1]

## 3. Experimentelles Vorgehen

### 3.1. Bestimmung des Linsentyps

Zur Bestimmung des Linsentyps benutzt man bestimmte Eigenschaften von Sammell- und Zerstreuungslinsen. Bei den Linsen  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $G$  und  $H$  betrachte man ein Bild in weiter Entfernung ( $g \gg f$ ), steht dieses auf dem Kopf so handelt es sich eindeutig um eine Sammellinse. Lieferte ersteres zur Festlegung kein Ergebnis, so betrachte man in kleinen Entfernungen ( $g \approx f$ ) das Verhalten von der Bildgröße  $B$  und der Gegenstandsweite  $g$ . Aus Gleichung (2.2) und (2.1) erkennt man, dass bei einer Sammellinse eine Vergrößerung der Gegenstandsweite zu einer Vergrößerung des Bildes und bei einer Streulinse zu einer Verkleinerung führt.

### 3.2. Linsen-Verfahren

In diesem Abschnitt wird der Aufbau und das experimentelle Vorgehen bei den im Kapitel 2 vorgestellten Verfahren erläutert. Bei diesen werden die Bauteile mithilfe von frei beweglichen Klemmreitern auf einer Schiene ausgerichtet und die Abstände mittels einer an der Schiene befestigten Skala und an den Reitern angebrachten Markern bestimmt. Die Sammellinse zwischen der Halogenlampe und dem Gegenstand diente zur Optimierung der Ausleuchtung dessen.

#### 3.2.1. Autokollimation-Verfahren

Beim Autokollimation-Verfahren stellt man die optischen Objekte in folgender Reihenfolge (Strahlengang von links nach rechts) auf:

Halogenlampe - Sammellinse - Gitter - optisches Instrument - Spiegel

Das optische Instrument besteht versuchsabhängig aus den Linsen  $B$ ,  $G$  oder dem Linsensystem  $GE$ . Neben dem Gitter wird ein Schirm eingeschoben, auf welchen das gespiegelte Bild abgebildet wird. Sobald man durch verschieben des Instruments ein scharfes Bild erhält, misst man den Abstand zwischen Gitter und diesem, um  $k$  (bzw.  $l$  durch Drehung des Instruments um  $180^\circ$  in der optischen Ebene) zu erhalten. Dabei werden die gesuchten Größen mithilfe der Marker an der jeweiligen Komponente an der Skala abgelesen. Dieser Vorgang wird fünf mal pro Linsensystem wiederholt und im Anschluss der Mittelwert berechnet. Beim Linsensystem  $GE$  ist zusätzlich der Abstand zwischen den beiden Linsen zu erfassen.

#### 3.2.2. Bessel-Verfahren

Bei dieser Methode wurden die optischen Objekte wie folgt aufgebaut:

Halogenlampe - Sammellinse - Gitter - optisches Instrument - Schirm

Das optische Instrument besteht versuchsabhängig aus den Linsen  $B$ ,  $G$ , oder dem Linsensystem  $GE$ . Die Größen werden durch Markierungen an dem jeweiligen Objekt und der Skala abgelesen. Durch Messung der Positionen von Gitter und Schirm erhält man die Größe  $e$ . Die Größe  $d$  aus  $a_1$  und  $a_2$ . Dabei wurde  $a_1$  als die Gegenstandsweite bestimmt, bei der eine Vergrößerung ( $\beta \approx -4$ ) und  $a_2$ , bei der eine Verkleinerung ( $0 > \beta > -1$ ) eintritt. Die unterschiedlichen Effekte erhält man durch Verschiebung des optischen Systems. Für die Einzellinsen wird der Vorgang fünf mal wiederholt und beim Linsensystem zehn mal, da dort stärkere Schwankungen beim Ablesen auftreten können.

### 3.2.3. Abbe-Verfahren

Das Abbe-Verfahren hat den selben Aufbau wie das Bessel-Verfahren. Der Schirm wird beginnend in einer Entfernung von von 130 cm vom Gegenstand aufgestellt und bis 95 cm in 5 cm Schritten angenähert. Von 95 cm bis 70 cm erfolgt die Verkürzung des Abstandes in 2.5 cm Schritten. Bei jedem Abstand des Schirmes werden dann bis zu zwei Positionen bestimmt, wo ein scharfes Bild zu sehen ist. Als Messdaten wird dann der Vergrößerungsmaßstab  $\beta$  mithilfe eines Messschieber gemessen und der Abstand des optischen Instruments vom Gegenstand mithilfe des Markers am Instrument und der Schienenskala.

## 4. Auswertung der Messergebnisse

### 4.1. Fehlerbetrachtung

Die berücksichtigten Abweichungen beinhalten eine geschätzte, statistische Ableseungenauigkeit in der Positionierung des Reiters auf der Skala von 0.3 mm und einer systematischen Herstellerungenauigkeit von  $0.1\% \cdot \text{„Messwert“}$ . Nullpunktfehler auf dieser Skala sind, auf Grund von Differenzmessungen nicht vorhanden und Fortpflanzung vom systematischen Fehler erfolgte durch Differenzbildung, unter Annahme linearem Skalierungsfehler.

Für die Einzelmessungen der Bildhöhen bei einer Vergrößerung des Bildes und bei der Messung des Abstandes der Linsen  $GE$  beim Linsensystem wurde eine statistische Abweichung von 2 mm geschätzt, welche Stabilisationsprobleme und Schärfefehler (Astigmatismus) beinhaltet. Analog 1 mm bei verkleinerten Bildern. Systematische Abweichungen sind auf Grund der hohen statistischen bei der Messung mit der Schiebelehre nicht relevant.

### 4.2. Charakterisierung der Linsen

Die Bestimmung der Linsencharakteristik ergab, nach der Vorgehensweise im [Abschnitt 3.1](#), die Tabelle 4.1. Die Linsen  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $G$  und  $H$  lieferten ein auf dem Kopf stehendes Bild bei großem Abstand, was eindeutig auf eine Sammellinse hinweist. Bei  $D$  führte eine Vergrößerung der Gegenstandsweite zu einer Vergrößerung des Bildes bei naher Betrachtung und für  $E$  ergab sich analog eine Verkleinerung, womit die Zerstreu- für  $E$  bzw. Sammelcharakteristik für  $D$  nachgewiesen wurde.

**Tabelle 4.1.:** Charakterisierung der Einzellinsen

	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$	$G$	$H$
Sammellinse	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>
Zerstreuungslinse					<b>X</b>		

### 4.3. Einzellinsen

In Tabelle 4.2 sieht man die berechneten Brennweiten für Linse  $B$  und Linse  $G$  sowie deren gewichteten Mittelwert. Die Brennweiten wurden jeweils einmal mit der Autokollimations-

methode 3.2.1 mit Formel (2.7) und einmal mit der Besselmethode 3.2.2 mit Formel (2.8) bestimmt. Dabei wurde bei beiden Verfahren die Näherung  $h \approx 0$  genutzt, da die Gegenstandsweite im Vergleich zur Ausdehnung der Linse deutlich größer ist ( $g \gg h$ ). Die Messwerte für das Autokollimation- bzw. Bessel-Verfahren finden sich im Anhang A.

**Tabelle 4.2.:** Brennweiten der Linsen  $B, G$

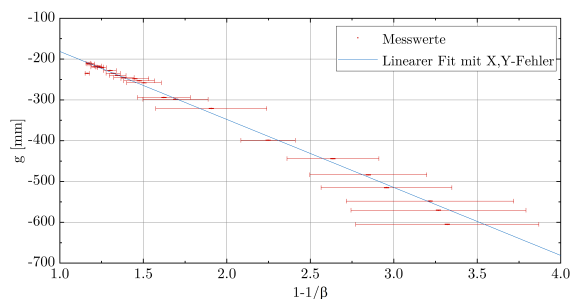
	$f'_B$ mm	$\Delta f'_B$ mm	$f'_G$ mm	$\Delta f'_G$ mm
Autokollimationsmethode	99,15	0.29	75.65	0.26
Besselmethode	99.2	0.6	73.1	0.4
Gew. Mittelwert	99.16	0.26	74.83	0.22

#### 4.4. Linsensystem

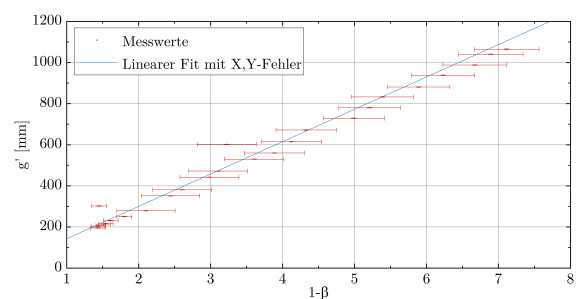
Die Messung nach dem Autokollimations- und Bessel-Verfahren in Kombination führt nach dem Kapitel 2.3 auf die Brennweite und den Hauptebenenabstand. Analog das Abbe-Verfahren, wie in Abschnitt 2.4 erläutert, welches nach linearem Fit in Abbildung 4.1 die Ergebnisse in Tabelle 4.3 liefert. Die Fit-Daten befinden sich im Anhang A. Dabei wurden auch die systematischen Abweichungen der Längenmessung auf dem Reiter, welche im Verhältnis zu den statistischen vernachlässigbar gering sind, mit einbezogen.

**Tabelle 4.3.:** Brennweite und Hauptebenenabstand vom Linsensystem  $GE$

	$f'$ mm	$\Delta f'$ mm	$h$ mm	$\Delta h$ mm
Auto- und Bessel-Verfahren	161.6	1.5	12.1	3.4
Abbe-Verfahren (Fit in Abbildung 4.1.a)	167	11	0	21
Abbe-Verfahren (Fit in Abbildung 4.1.b)	157	7	0	21
Gew. Mittelwert <sup>1</sup>	161.5	1.4	12.1	3.4



**a.** Fit nach Gleichung (2.10) mit  $g(x) = f \cdot x + h_1$  und  $x = 1 - 1/\beta$ .



**b.** Fit nach Gleichung (2.10) mit  $g'(x) = f' \cdot x + h_2$  und  $x = 1 - \beta$ .

**Abbildung 4.1.:** Messpunkte, Fehlerbalken und lineare Fits unter Berücksichtigung von  $x$ - und  $y$ -Fehlern beim Abbe-Verfahren für das Linsensystem  $GE$ .

<sup>1</sup>Auf Grund des großen Fehlers beim Abbe-Verfahren vom Hauptebenenabstand  $h$ , da die Messung der Bildhöhe starken Abweichungen unterlag, wurde dieser nicht in die Mittlung mit einbezogen.

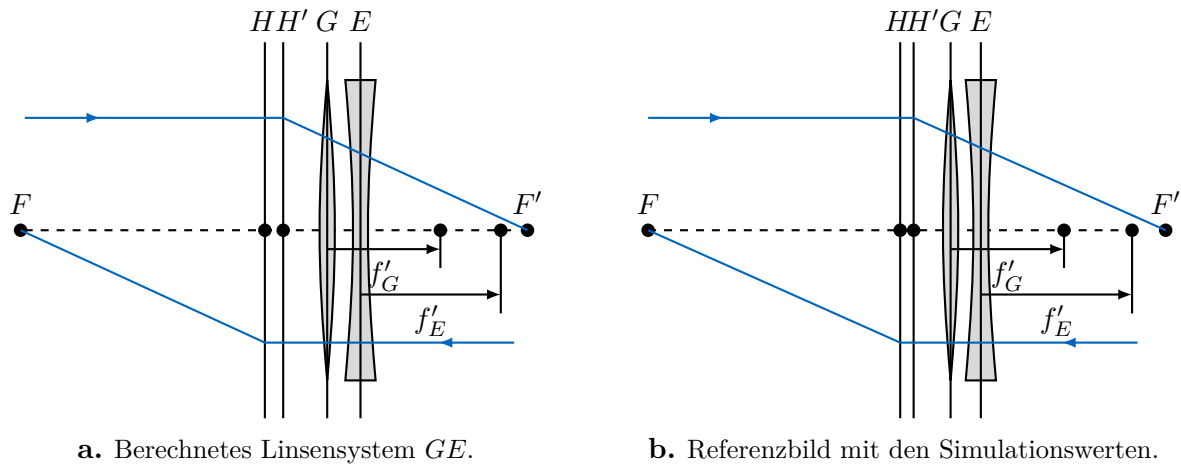


Die Messwerte für die einzelnen Verfahren sind dem Anhang A.2 zu entnehmen. Mit den Werten aus Tabelle 4.3 und 4.4 lässt sich das Linsensystem mit dessen Eigenschaften skizzieren, in Abbildung 4.2 ersichtlich. Das maßstabsgetreue Bild wurde dabei mit einem Referenzbild aus den Simulationsergebnissen des Betreuers mit  $t = 20$  mm,  $f'_G = 75$  mm und  $f'_E = -100$  mm gegenübergestellt.

**Tabelle 4.4.:** Brennweite der Zerstreulinse  $E$  und Abstand der Hauptebenen  $H$  und  $H'$  zu den Hauptebenen der Einzellinsen.

	$f'_E$ mm	$\Delta f'_E$ mm	$z$ mm	$z'$ mm
Berechnet	-93	17	-41.2	-51.1
Simulation	-100		-33.3	-44.4

In Abbildung 4.2 lässt sich erkennen, dass der Hauptebenenabstand aus den von den Messwerten berechneten größer ist, was vor allem durch den größeren Linsenabstand  $t$  bedingt ist.



**Abbildung 4.2.:** Darstellung der Brennpunkte, Hauptebenen und Positionen der Linsen  $G$  und  $E$  des Linsensystems  $GE$  im Maßstab 1:5. Die zwei Brechungen der einfallenden Lichtstrahlen an den beiden Linsen wurde auf eine an der jeweiligen Hauptebene reduziert.

## 5. Diskussion

### 5.1. Einzellinsen

Die aus den Messwerten berechneten Werte (siehe Tabelle 4.2) für die Brennweiten stimmen bei Linse  $B$  innerhalb der Messtoleranz überein, während bei  $G$  mindestens ein Unterschied von  $\approx 2.5\%$  auftritt. Da bei Linse  $B$  die Ergebnisse gut übereinstimmen, können materielle Fehler (wie fehlerhafter Spiegel) weitgehend ausgeschlossen werden. In Betracht zu ziehen sind Ungenauigkeiten im Versuchsaufbau für Linse  $G$ , wie z. B. bei der Position der optischen

Instrumente, Fehler beim Linsenschliff von  $G$  und die Annahme einer dünnen Linse. Zudem kann die große Abweichung bei  $G$  bei den beiden Experimenten durch verschiedene Effekte wie sphärische und chromatische Aberration, da die Abhängigkeit bzgl.  $f$  von der Wellenlänge  $\lambda$  nicht bekannt ist, erklärt werden. Vergleicht man den Wert für  $G$  mit der Simulationsangabe  $f'_G = 75 \text{ mm}$ , so stimmt dieser innerhalb der Messtoleranz mit dem gemittelten Wert überein.

## 5.2. Linsensystem

Die Gesamtbrennweite des Linsensystems bei den zwei Messverfahren stimmt innerhalb der Messunsicherheiten mit sich und dem simulierten Wert  $f' = 166.7 \text{ cm}$  überein (siehe [Tabelle 4.3](#) und [4.4](#)). Beim Hauptebenenabstand  $h$  ist jedoch ein großer Unterschied festzustellen. Der Fehler ist auf die Unsicherheiten bei der Brennweite, bzw. der Messungen der Bildhöhen, zurückzuführen, da bei einer linearen Regression eine kleine Änderung der Steigung  $f$  eine große des  $y$ -Achsen-Abschnittes  $\sim h$  bedingt.

Für die Streulinse  $E$  stimmen die Ergebnisse ebenfalls mit dem theoretischen Wert innerhalb der Unsicherheit überein. Abweichungen sind z. B. auf unbekannte Parameter wie die benutzte Wellenlänge oder andere Abmessungen des simulierten Systems (Abstand der Linsen unterscheidet sich um  $\approx 2 \text{ mm}$ ) zurückzuführen. Sehr auffallend ist der Linsenfehler der zu einer tonnenförmigen Verzeichnung führt, welcher die Messung des Vergrößerungsmaßstabes  $\beta$  erschwerte.

## 6. Fragen

### 1. Frage: Wie verhalten sich die Abbildungsmaßstäbe der beiden scharfen Abbildungen beim Bessel Verfahren zueinander?

Für den Vergrößerungsmaßstab gilt Gleichung (2.2). Daraus erhalten wir für die erste Position (Vergrößerung):

$$\beta_1 = \frac{y'_1}{y} = \frac{f' - a'_1}{f'}$$

Unter der Berücksichtigung, dass die zweite Position (Verkleinerung) durch eine Verschiebung hervorgeht erkennt man in [Abbildung 2.3](#) mit  $a_2 = -a'_1$

$$\beta_2 = \frac{y'_2}{y} = \frac{f}{f - a_2} = \frac{f'}{f' - a'_1}$$

und für das Verhältnis der Abbildungsmaßstäbe ergibt sich:

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{(f' - a'_1)^2}{f'^2}$$

welches für kleine Bildweiten  $a'_1$  gegen 1 läuft.

### 2. Frage: Wie werden in einem Projektionsapparat Lampe, Kondensor, Objekt, Objektiv angeordnet?

Die Reihenfolge der Optischen Instrumente ist (Strahlengang links nach rechts):

Lampe - Kondensor - Objekt - Objektiv

Die Lampe dient zur Beleuchtung des Objektes, welches zwischen Kondensor und Objektiv liegt. Der Kondensor dient zur vollständigen Ausleuchtung des Objektes, das Objektiv sorgt für eine scharfe Abbildung auf einen Schirm, z. B. eine Wand. Dazu muss die Brennweite des Objektives natürlich ausreichend groß gewählt werden.

**3. Frage: Was ergibt sich aus den Gleichungen (2.1) und (2.2) 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?**

Mit der Gleichung (2.2) für den Abbildungsmaßstab  $\beta = \frac{f}{f-a}$  erhält man  $\beta = 2$ . Das induziert, dass das Bild doppelt so groß, in positive  $y$ -Richtung orientiert und virtuell ist.

**4. Frage: Wie verändert sich die Gesamtbrennweite eines Systems zweier Sammellinsen gleicher Brennweite  $f'_S$  in Abhängigkeit vom Abstand  $t$ ?**

Mit Gleichung 2.4 und der optischen Tubuslänge 2.3 folgt

$$f' = \frac{f_S'^2}{2f'_S - t}$$

und für große  $t$  strebt die Gesamtbrennweite gegen 0 und für  $t = 0$  entspricht das System theoretisch einem mit halber Brennweite.

## A. Messergebnisse und Berechnungen

### A.1. Einzellinsen

Die Position des Gitters am Reiter betrug bei der Autokollimation  $c = (299.0 \pm 0.6)$  mm und die Messergebnisse für  $\tilde{k}$  und  $\tilde{l}$  befinden sich in [Tabelle A.1](#). Dabei bedeutet das „Tilde“-Zeichen, dass die Position des Gitters noch abgezogen werden muss.

**Tabelle A.1.:** Messwerte von  $\tilde{k}$  und  $\tilde{l}$  bei den Linsen  $B$  und  $G$  beim Autokollimationsverfahren.

$B$				$G$			
$\tilde{k}$	$\Delta\tilde{k}$	$\tilde{l}$	$\Delta\tilde{l}$	$\tilde{k}$	$\Delta\tilde{k}$	$\tilde{l}$	$\Delta\tilde{l}$
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
396.0	0.7	398.0	0.7	375.5	0.7	376.5	0.7
398.0	0.7	400.0	0.7	375.0	0.7	374.0	0.7
399.0	0.7	398.5	0.7	373.0	0.7	374.5	0.7
398.0	0.7	399.0	0.7	374.0	0.7	373.5	0.7
397.0	0.7	398.0	0.7	375.5	0.7	375.0	0.7

Beim Bessel-Verfahren wurde das Raster bei  $c = (299.0 \pm 0.6)$  mm und der Schirm für die Linse  $B$  bei  $\tilde{e} = (1\,120.0 \pm 1.4)$  mm bzw. für  $G$  bei  $\tilde{e} = (800.0 \pm 1.1)$  mm positioniert.

**Tabelle A.2.:** Messwerte von  $\tilde{a}_1$  und  $\tilde{a}_2$  bei den Linsen  $B$  und  $G$  beim Bessel-Verfahren.

$B$		$G$	
$ \tilde{a}_1 $	$ \Delta\tilde{a}_1 $	$ \tilde{a}_2 $	$ \Delta\tilde{a}_2 $
mm	mm	mm	mm
416.0	0.7	1007.0	1.3
415.5	0.7	1007.5	1.3
415.0	0.7	1006.0	1.3
417.0	0.7	1006.0	1.3
417.0	0.7	1004.5	1.3

### A.2. Linsensystem

Zwischen den Linse  $G$  und  $E$  betrug der minimal mögliche Abstand  $t = (22 \pm 2)$  mm, die Position des Gitters  $c = (299.0 \pm 0.6)$  mm und bei der Bessel-Methode wurde der Schirm auf  $\tilde{e} = (1\,100 \pm 14)$  mm eingestellt. Auf Grund dessen, dass die Positionen der Hauptebenen am Beginn unbekannt sind, können  $a_1$  bzw.  $a_2$  bei der Bessel-Methode nicht gemessen werden, jedoch kann die Position  $\tilde{m}_G$  eines festen Markers z. B. der Linse  $G$  erfasst werden und die Ergebnisse sind in [Tabelle A.3](#) aufgelistet.

Beim Abbe-Verfahren betrug die Position des Gitters  $c = (299.0 \pm 0.6)$  mm und  $y'$  beschreibt die Höhe eines Kästchens, welches auf den Schirm abgebildet wurde. Die Objekthöhe wurde

zu  $9 \cdot y = (44.9 \pm 1.3) \text{ mm}$  bestimmt, wobei die Höhe und Breite der gesamten 9 Kästchen des Gitters gemessen und eine Mittlung durchgeführt wurde.

Die Fit-Daten beim Abbe-Verfahren sind in [Tabelle A.4](#) aufgelistet. Dabei wurden die Abweichungen bzgl.  $1 - 1/\beta$  bzw.  $1 - \beta$  und  $g$  bzw.  $g'$  mit berücksichtigt.

**Tabelle A.3.:** Messwerte des Autokollimations- und Bessels-Verfahrens für das Linsensystem  $GE$ .

Bessel				Autokollimation			
$ \tilde{m}_{G1} $ mm	$ \Delta\tilde{m}_{G1} $ mm	$ \tilde{m}_{G2} $ mm	$ \Delta\tilde{m}_{G2} $ mm	$\tilde{k}$ mm	$\Delta\tilde{k}$ mm	$\tilde{l}$ mm	$\Delta\tilde{l}$ mm
535.5	0.8	901.0	1.2	481.0	0.8	428.5	0.7
547.0	0.8	906.0	1.2	480.5	0.8	431.0	0.7
539.0	0.8	911.0	1.2	479.5	0.8	430.0	0.7
543.0	0.8	907.0	1.2	480.0	0.8	428.5	0.7
535.0	0.8	903.0	1.2	479.0	0.8	427.5	0.7
533.0	0.8	906.0	1.2				
545.5	0.8	911.0	1.2				
538.5	0.8	913.0	1.2				
541.0	0.8	912.0	1.2				
543.0	0.8	912.0	1.2				

**Tabelle A.4.:** Fit-Ergebnisse beim Abbe-Verfahren des Linsensystems  $GE$ .

$g(x) = f \cdot x + h_1$ mit $x = 1 - 1/\beta$				$g'(x) = f' \cdot x + h_2$ mit $x = 1 - \beta$			
$f$ mm	$\Delta f$ mm	$h_1$ mm	$\Delta h_1$ mm	$f'$ mm	$\Delta f'$ mm	$h_2$ mm	$\Delta h_2$ mm
-167	11	-15	14	157	7	-15	16

**Tabelle A.5.:** Messwerte der Abbe-Methode für das Linsensystem  $GE$ .

$ \tilde{g} $ mm	$ \Delta\tilde{g} $ mm	$ \tilde{e} $ mm	$ \Delta\tilde{e} $ mm	$ \tilde{g}' $ mm	$ \Delta\tilde{g}' $ mm
335.0	0.6	1400.0	1.7	30.5	2.0
310.0	0.6	1350.0	1.7	29.4	2.0
312.0	0.6	1300.0	1.6	28.3	2.0
312.0	0.6	1250.0	1.6	26.1	2.0
319.0	0.6	1200.0	1.5	24.4	2.0
317.0	0.6	1150.0	1.5	21.9	2.0
319.5	0.6	1100.0	1.4	21.0	2.0
321.0	0.6	1050.0	1.4	19.9	2.0
328.0	0.6	1000.0	1.3	16.6	2.0

335.0	0.6	950.0	1.3	15.6	2.0
340.0	0.6	900.0	1.2	14.4	2.0
345.0	0.6	875.0	1.2	13.0	2.0
348.0	0.6	950.0	1.3	11.1	2.0
353.0	0.7	825.0	1.1	10.5	2.0
358.0	0.7	800.0	1.1	9.9	2.0
394.0	0.7	775.0	1.1	8.0	2.0
398.5	0.7	750.0	1.1	7.2	2.0
421.0	0.7	700.0	1.0	5.5	2.0
$ \tilde{g} $ mm	$ \Delta\tilde{g} $ mm	$ \tilde{e} $ mm	$ \Delta\tilde{e} $ mm	$ 2 \cdot \tilde{g}' $ mm	$ \Delta 2 \cdot \tilde{g}' $ mm
705.0	1.0	900.0	1.2	4.3	1.0
670.5	1.0	875.0	1.2	4.4	1.0
648.0	0.9	950.0	1.3	4.5	1.0
615.0	0.9	825.0	1.1	5.1	1.0
583.5	0.9	800.0	1.1	5.4	1.0
544.0	0.8	775.0	1.1	6.1	1.0
499.0	0.8	750.0	1.1	8.0	1.0

## B. Literaturverzeichnis

- [1] *Optische Abbildung (OPA)*. 2016. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap3/OPA.pdf> (besucht am 25. Februar 2019) (siehe S. 1–3).