

# Praktikum Klassische Physik I

## *Versuchsauswertung:* P1-31, 40, 41: Geometrische Optik

Christian Buntin, Jingfan Ye  
*Gruppe Mo-11*

Karlsruhe, 09. November 2009

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Brennweiten-Bestimmungen</b>	<b>2</b>
1.1	Einfache Bestimmung der Brennweite . . . . .	2
1.2	Brennweitenbestimmung mittels des Besselschen Verfahrens . . . . .	2
1.3	Brennweitenbestimmung mittels des Abbéschen Verfahrens . . . . .	4
1.3.1	Messergebnisse . . . . .	5
1.3.2	Diagramme . . . . .	6
1.3.3	Hauptebenenabstände . . . . .	8
1.3.4	Rückschluss auf die Einzellinsen . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Aufbau optischer Instrumente</b>	<b>10</b>
2.1	Das Keplersche und Galileische Fernrohr . . . . .	10
2.2	Der Diaprojektor . . . . .	11
2.3	Das Mikroskop . . . . .	11

# 1 Brennweiten-Bestimmungen

## 1.1 Einfache Bestimmung der Brennweite

Die Lichtquelle wurde so eingestellt, dass sie so gut wie möglich paralleles Licht lieferte. Deshalb wurde die Linse auch in einem Abstand von ca. 1 m von der Lichtquelle aufgebaut. Da sich die Lichtstrahlen in einem Punkt treffen sollten, wurde dieser Punkt mittels eines verschiebbaren Schirmes gesucht. Für drei Einstellungen dieses Punktes wurden die Positionen ermittelt:

Position Schirm	Position Linse	Abstand
493 mm	672 mm	179 mm
40 mm	209 mm	169 mm
210 mm	383 mm	173 mm
Mittelwert:		$174 \pm 3$ mm
Angegebene Brennweite:		150 mm

**Tabelle 1:** Grobe Brennweitenbestimmung

Die Brennweite soll hier dem Abstand zwischen Linse und Schirm entsprechen. Somit eignet sich dieses Verfahren nicht sehr gut zur genauen Bestimmung von Brennweiten, da die Messwerte alle über dem eigentlichen Wert liegen.

Es wurde auch versucht, den Abstand Linse–Schirm so einzustellen, dass er der Brennweite der Linse entsprach. Trotz verstellen der Kondensorlinse der Lichtquelle war es allerdings nicht möglich, einen möglichst kleinen Punkt zu erzeugen. Somit erzeugt diese Lichtquelle nicht ausreichend paralleles Licht, um damit überhaupt genaue Brennweitenmessungen nach dieser Methode vornehmen zu können.

## 1.2 Brennweitenbestimmung mittels des Besselschen Verfahrens

Die Brennweite der Linse wurde mittels des Besselschen Verfahrens in drei Messreihen gemessen:

- i) mit blauem Farbfilter und Lochblende
- ii) mit rotem Farbfilter und Lochblende
- iii) mit rotem Farbfilter und Scheibenblende

Dazu wurden die Positionen des Schirmes, des Gegenstandes (hier zur besseren Beurteilung der Bildschärfe das Dia einer Radierung) und der möglichen Linsenpositionen (teils mehrfach eingestellt und gemessen) bestimmt, an denen ein scharfes Bild zu sehen ist. Aus diesen Messwerten lässt sich dann, wie in der Vorbereitung beschrieben, die Brennweite berechnen.

Aufgrund der Verwendung eines Dias ist hier, anders als in der vorherigen Aufgabe, paralleles Licht nicht nötig.

Schirm $x_S$	Dia $x_D$	Linse (a) $a$	Linse (b) $b$	Abstand $d = \bar{b} - \bar{a}$	Schirm-Dia $e = x_D - x_S$	Brennweite $f = \frac{1}{4} \left( e - \frac{d^2}{e} \right)$
100	750	338 336 335	509 510 508	172,7	650	151
100	800	316	576	260	700	151
100	850	309	638	329	750	151
100	900	300	696	396	800	151
Mittelwert mit statistischem Fehler:						151 ± 0

**Tabelle 2:** Messreihe i (mit blauem Farbfilter und Lochblende): Positionen der Apparaturen, alle Angaben in mm

Schirm $x_S$	Dia $x_D$	Linse (a) $a$	Linse (b) $b$	Abstand $d = \bar{b} - \bar{a}$	Schirm-Dia $e = x_D - x_S$	Brennweite $f = \frac{1}{4} \left( e - \frac{d^2}{e} \right)$
100	750	338 341 340	506 505 502	164,7	650	152
100	900	302	692	390	800	153
100	850	311	635	324	750	153
100	800	323	574	251	700	153
Mittelwert mit statistischem Fehler:						153 ± 1

**Tabelle 3:** Messreihe ii (mit rotem Farbfilter und Lochblende): Positionen der Apparaturen, alle Angaben in mm

Schirm $x_S$	Dia $x_D$	Linse (a) $a$	Linse (b) $b$	Abstand $d = \bar{b} - \bar{a}$	Schirm-Dia $e = x_D - x_S$	Brennweite $f = \frac{1}{4} \left( e - \frac{d^2}{e} \right)$
100	750	336 335 333	512 512 513	177,7	650	150
100	800	318 317 317	577	260	700	151
100	850	305	649	344	750	148
100	900	299	695	396	800	151
Mittelwert mit statistischem Fehler:						150 ± 1

**Tabelle 4:** Messreihe iii (mit rotem Farbfilter und Scheibenblende): Positionen der Apparaturen, alle Angaben in mm

Messreihe	Farbfilter	Blende	Brennweite
i	blau	Lochblende	151 ± 0
ii	rot	Lochblende	153 ± 1
iii	rot	Scheibenblende	150 ± 1
Mittelwert mit statistischem Fehler:			151 ± 1

**Tabelle 5:** Zusammenfassung der Messreihen, alle Angaben in mm

Somit eignet sich dieses Verfahren wesentlich besser zur Bestimmung der Brennweite, da die gemessenen Werte sehr nahe an der angegebenen Brennweite liegen.

Die auf Kleinwinkelnäherungen basierende sphärische Aberration lässt sich durch Vergleichen der Brennweiten bei Verwendung einer Lochblende bzw. einer Scheibenblende bestimmen. Hier lassen sich dafür die Messreihen ii und iii vergleichen. Daraus wird ersichtlich, dass das Licht bei Verwendung einer Scheibenblende, also im äußeren Linsenbereich, stärker gebrochen wird, als im inneren Bereich.

Da Licht verschiedener Frequenzen im gleichen Medium verschiedene Geschwindigkeiten hat (Dispersion), ergibt sich eine chromatische Aberration. Hier lässt sich diese durch Vergleich der Messreihen i und ii ermitteln. Daraus wird ersichtlich, dass blaues Licht stärker als rotes Licht gebrochen wird.

### 1.3 Brennweitenbestimmung mittels des Abbéschen Verfahrens

Der Versuch wurde wie in der Versuchsvorbereitung beschrieben aufgebaut. Die Positionen der einzelnen Apparaturen sowie die Vergrößerung (über Bild- und Gegenstandsweite) wurden gemessen, wenn ein scharfes Bild zu sehen war. Auf dem Dia befand sich ein 1 cm langer Messstreifen, mit dessen Bild auf dem Schirm (mit Millimeterpapier) die Vergrößerung gemessen werden konnte. Als Marke wurden für die Abstandmessungen die Befestigung des Linsensystemes gewählt. Es wurden Messreihen für zwei verschiedene Zweilinsensysteme, (a) und (b), gemessen.

Anders als in der Vorbereitung beschrieben wurde hier die Apparatur zur Bestimmung von  $h_2$  nicht gedreht. Stattdessen wurde der Abstand Gegenstand-Schirm =  $e$  gemessen. Daher gilt (ähnlich wie in der Vorbereitung):

$$\begin{aligned} \frac{a}{b} &= \frac{a'}{b'} \Leftrightarrow a = a' \frac{b}{b'} \\ a' &= e - k - h_2 \quad (\text{siehe Skizze in Vorbereitung}) \\ \Rightarrow \frac{1}{f} &= \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{a' \frac{b}{b'}} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{a'} \left( \frac{b'}{b} + 1 \right) \\ \Leftrightarrow a' &= f \left( \frac{b'}{b} + 1 \right) = e - k - h_2 \\ \Leftrightarrow k &= -f \left( \frac{b'}{b} + 1 \right) - h_2 + e \\ \Leftrightarrow e - k &= \left( 1 + \frac{b'}{b} \right) f + h_2 = k' \end{aligned}$$

Somit wird zur Bestimmung von  $h_2$  also  $\left( \frac{b'}{b} + 1 \right)$  über  $k' = e - k$  aufgetragen. Der y-Achsenabschnitt entspricht dann der Position  $h_2$  der zweiten Hauptebene und die Steigung entspricht der Brennweite  $f$ .

### 1.3.1 Messergebnisse

Schirm	Marke	Dia	G.-W.	B.-W.	$k$	$1 + \frac{b}{b'}$	$k' = e - k$	$1 + \frac{b'}{b}$
$x_S$	$x_k$	$x_D$	$b$	$b'$	$= x_S - x_k$		$= x_k - x_D$	
900	775	435	8,5	20	125	1,43	340	3,35
910	775	492	9,5	20	135	1,48	283	3,11
915	775	510	5,2	10	140	1,52	265	2,92
920	775	528	5,6	10	145	1,56	247	2,79
925	775	540	6,1	10	150	1,61	235	2,64
930	775	552	6,5	10	155	1,65	223	2,54

**Tabelle 6:** Messreihe Linseneinstellung (a): Positionen der Apparaturen, alle Angaben in mm

Schirm	Marke	Dia	G.-W.	B.-W.	$k$	$1 + \frac{b}{b'}$	$k' = e - k$	$1 + \frac{b'}{b}$
$x_S$	$x_k$	$x_D$	$b$	$b'$	$= x_S - x_k$		$= x_k - x_D$	
900	775	121	9,1	60	125	1,15	654	7,59
905	775	288	10,0	48	130	1,21	487	5,80
910	775	371	9,0	35	135	1,26	404	4,89
915	775	432	7,9	25	140	1,32	343	4,16
920	775	480	10,0	27	145	1,37	295	3,70
925	775	508	8,0	19	150	1,42	267	3,38

**Tabelle 7:** Messreihe Linseneinstellung (b): Positionen der Apparaturen, alle Angaben in mm

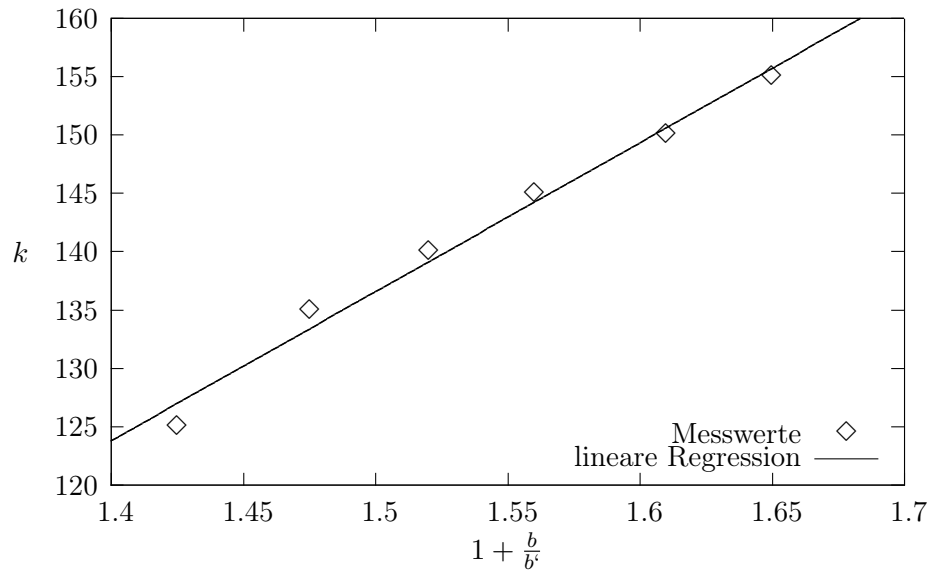
Diagramme: siehe nächste Doppelseite.

Somit hat das Linsensystem in Einstellung (a) eine ungefähre Brennweite von  $(133 \pm 16)$  mm und die Hauptebenenabstände  $h_1$  und  $h_2$  von der Marke von  $h_1 = -(55 \pm 13)$  mm und  $h_2 = -(130 \pm 41)$  mm

Das Linsensystem in Einstellung (b) hat eine Brennweite von  $(92,0 \pm 1,2)$  mm und die Hauptebenenabstände  $h_1$  und  $h_2$  von der Marke von  $h_1 = (18,5 \pm 1,3)$  mm und  $h_2 = -(42,0 \pm 3,6)$  mm

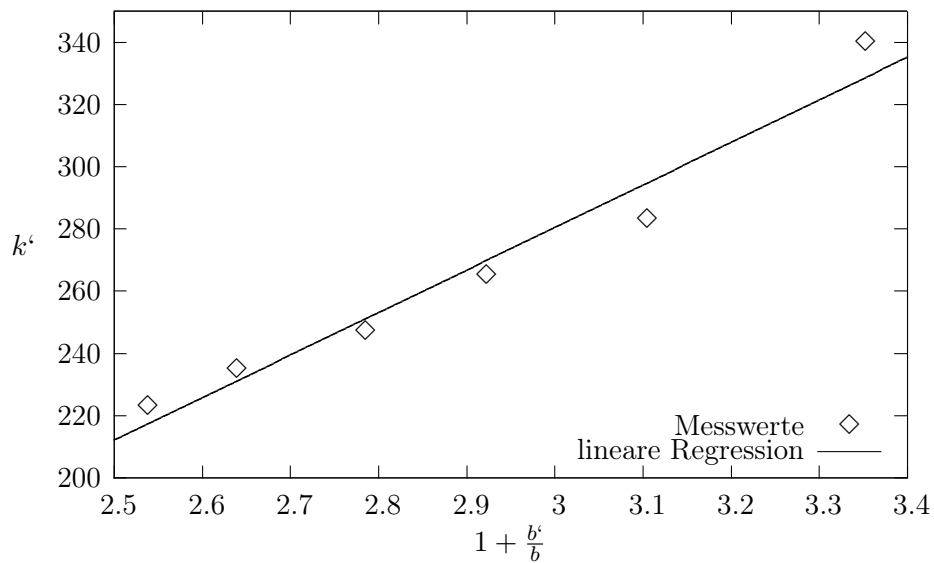
Man sieht deutlich, dass in der Linseneinstellung (b) deutlich genauere Messwerte erzielt wurden. Wahrscheinlich liegt es daran, dass die Vergrößerung dort genauer bestimmt wurde. Wie aus den Messreihen ersichtlich ist, wurde bei (a) gemessen, wieviele Millimeter des Dias einem bzw. zwei Zentimetern auf dem Schirm entsprachen. In der Messreihe (b) wurde gemessen, wie lang ein Millimeter des Dias auf dem Schirm entspricht. Wenn dies nicht genau ablesbar war, wurden die Linien, die direkt übereinander lagen, genommen. Da sich größere Längen (bei konstantem Fehler) genauer messen lassen, wurden für (b) genauere Ergebnisse erzielt.

### 1.3.2 Diagramme



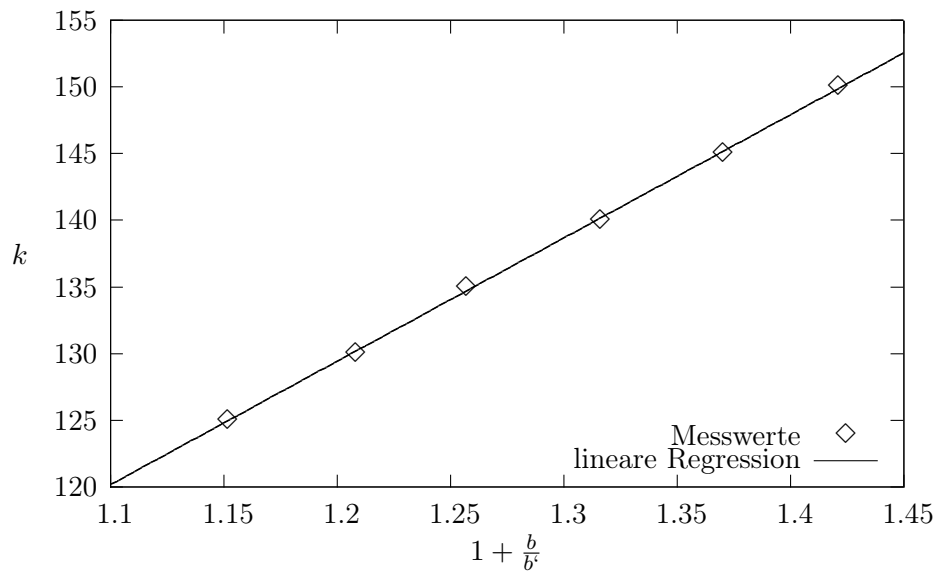
**Abbildung 1:** Messreihe für Aufbau (a)

Regressionsgerade:  $y = f \cdot x + h_1$ , mit  $f = (128 \pm 8)$  mm und  $h_1 = (-55 \pm 13)$  mm



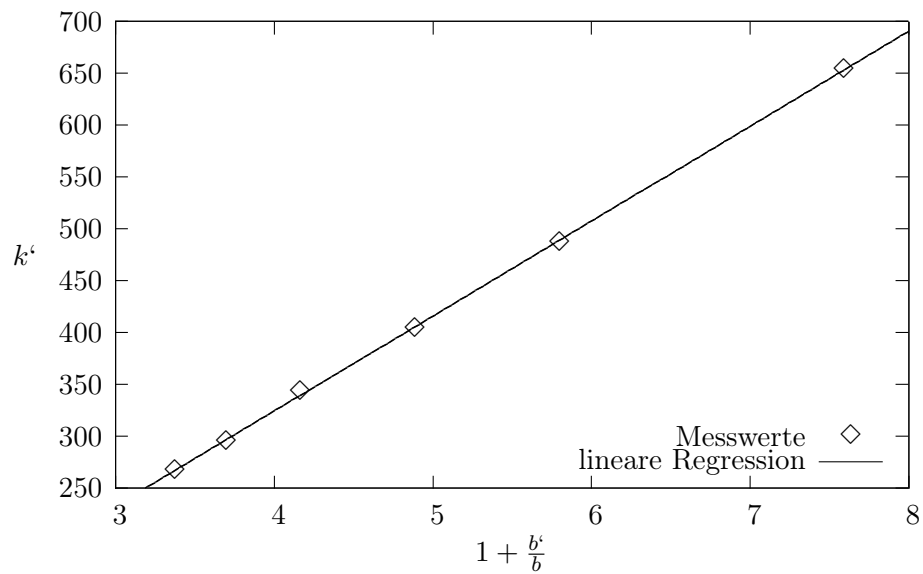
**Abbildung 2:** Messreihe für Aufbau (a)

Regressionsgerade:  $y = f \cdot x + h_2$ , mit  $f = (137 \pm 14)$  mm und  $h_2 = (-130 \pm 41)$  mm



**Abbildung 3:** Messreihe für Aufbau (b)

Regressionsgerade:  $y = f \cdot x + h_1$ , mit  $f = (92 \pm 1)$  mm und  $h_1 = (18,5 \pm 1,3)$  mm



**Abbildung 4:** Messreihe für Aufbau (b)

Regressionsgerade:  $y = f \cdot x + h_2$ , mit  $f = (91,5 \pm 0,7)$  mm und  $h_2 = (-42,0 \pm 3,6)$  mm

### 1.3.3 Hauptebenenabstände

Für den Hauptebenenabstand  $H$  der Linsen gilt:

$$H = |h_1 - h_2|$$

Somit gilt für die Hauptebenenabstände der beiden Linseneinstellungen:

$$H_{(a)} = |(-55 \pm 13) \text{ mm} - (-130 \pm 41) \text{ mm}| = (75 \pm 43) \text{ mm}$$

$$H_{(b)} = |(18,5 \pm 1,3) \text{ mm} - (-42,0 \pm 3,6) \text{ mm}| = (60,5 \pm 3,9) \text{ mm}$$

### 1.3.4 Rückschluss auf die Einzellinsen

Mit der Gleichung

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{H}{f_1 f_2}$$

lässt sich auf die Brennweiten der Einzellinsen schließen:

$$\frac{1}{f} = \underbrace{\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}}_{=A} + \underbrace{\frac{-1}{f_1 f_2}}_{=B} \cdot H = A + BH$$

$$\frac{1}{f_{(a)}} = A + BH_{(a)} \Leftrightarrow A = \frac{1}{f_{(a)}} - BH_{(a)} \Rightarrow A = \frac{1}{f_{(a)}} - BH_{(a)} = \frac{1}{f_{(b)}} - BH_{(b)}$$

$$\Rightarrow B = \frac{f_{(b)} - f_{(a)}}{f_{(a)} f_{(b)} (H_{(a)} - H_{(b)})} = \frac{92 - 133}{133 \cdot 92 \cdot (75 - 60,5)} \frac{1}{\text{mm}^2} = -2,311 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{1}{f_{(a)}} = A + BH_{(a)} \Leftrightarrow B = \frac{\frac{1}{f_{(a)}} - A}{H_{(a)}} \Rightarrow B = \frac{\frac{1}{f_{(a)}} - A}{H_{(a)}} = \frac{\frac{1}{f_{(b)}} - A}{H_{(b)}}$$

$$\Rightarrow A = \frac{f_{(b)} H_{(b)} - f_{(a)} H_{(a)}}{f_{(a)} f_{(b)} (H_{(b)} - H_{(a)})} = \frac{92 \cdot 60,5 - 133 \cdot 75}{133 \cdot 92 \cdot (60,5 - 75)} \frac{1}{\text{mm}} = 2,485 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{mm}}$$

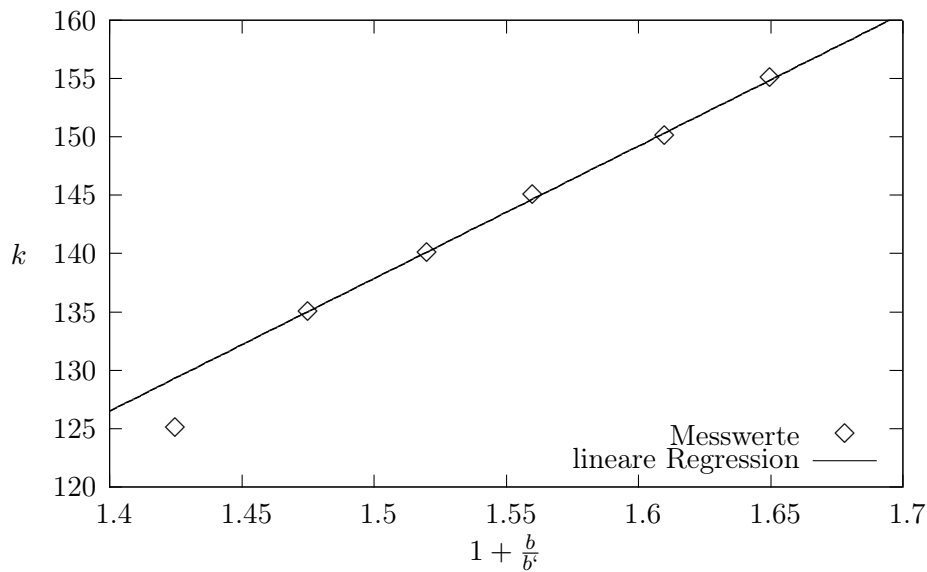
$$B = \frac{-1}{f_1 f_2} \Leftrightarrow f_2 = \frac{-1}{B f_1} \Rightarrow A = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_1} - B f_1 \Leftrightarrow B f_1^2 + A f_1 - 1 = 0$$

$$\Rightarrow f_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4B}}{2B}$$

Leider ist aber  $A^2 + 4B = -3,068 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{mm}^2} < 0$ , weshalb das Ergebnis imaginär wird. Dies liegt höchstwahrscheinlich an der hohen Ungenauigkeit des Hauptebenenabstandes  $H_{(a)}$ . Wenn dieser zum Beispiel nur 10 cm kürzer wäre, was immer noch deutlich innerhalb des Vertrauensintervalls läge, so würden  $f_1$  und  $f_2$  reell werden:  $f_1^{[H_{(a)}=65]} = 29 \text{ mm}$  und  $f_1^{[H_{(a)}=65]} = 46 \text{ mm}$

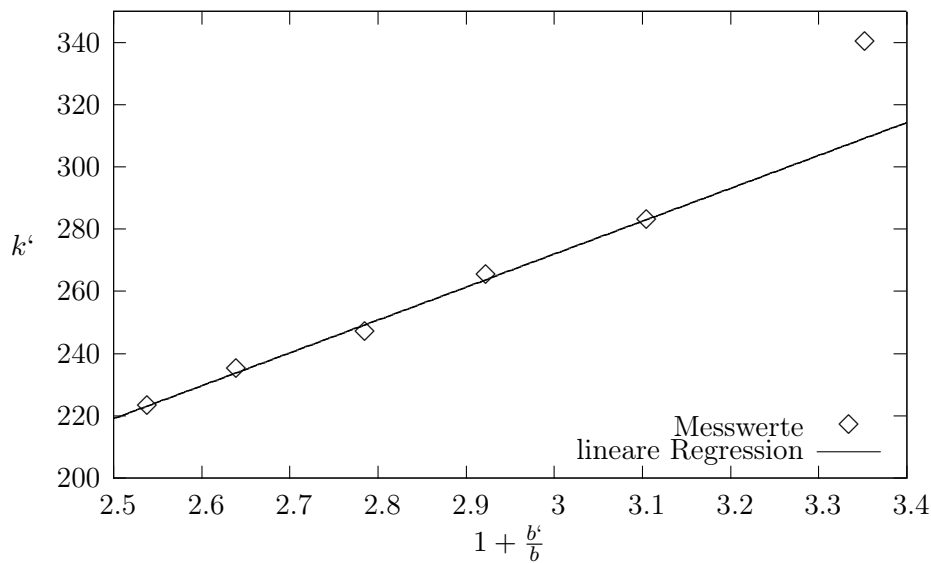
Einen anderen möglichen Fehler erkennt man bei genauer Betrachtung von Abbildung 1 und 2: Der unterste linke bzw. der oberste rechte Punkt, welche beide auf den selben Messwert basieren, weichen deutlich von den anderen ab. Wenn man die Möglichkeit in Betracht zieht, dass dieser Wert von uns nur unzureichend bestimmt wurde, lassen sich  $f_{(a)}$ ,  $h_1$  und  $H_{(a)}$  ohne diesen Wert neu berechnen (Diagramme auf der folgenden Seite).





**Abbildung 5:** Messreihe für Aufbau (a)

Regressionsgerade (ohne linken Punkt):  $y = f \cdot x + h_1$ , mit  $f = (114 \pm 2,1)$  mm und  $h_1 = (-32 \pm 4)$  mm



**Abbildung 6:** Messreihe für Aufbau (a)

Regressionsgerade (ohne rechten Punkt):  $y = f \cdot x + h_2$ , mit  $f = (106 \pm 4)$  mm und  $h_2 = (-45 \pm 11)$  mm

Somit gilt nun:  $f_{(a)} = 110 \pm 4$  mm und  $H_{(a)} = |h_2 - h_1| = 13 \pm 12$  mm.  
Daraus folgt für  $f_1$  und  $f_2$  nach oberiger Gleichung:  $f_1 = 85$  mm und  $f_2 = -315$  mm.  
Andererseits zeigt diese Rechnung auch, dass wir viel zu wenig Werte gemessen haben, um die Einzelbrennweiten damit annähernd genau bestimmen zu können.

## 2 Aufbau optischer Instrumente

### 2.1 Das Keplersche und Galileische Fernrohr

In diesem Versuch sollen ein Keplersches und ein Galileisches Fernrohr mit sechsfacher Vergrößerung  $\Gamma$  aufgebaut werden.

Aus der Vorbereitung ist bekannt, dass für die Vergrößerung  $\Gamma$  beider Fernrohre gilt:

$$\Gamma \approx \left| \frac{f_1}{f_2} \right| \quad (1)$$

wobei  $f_1$  die Brennweite des Objektivs und  $f_2$  die des Okulars ist.

Für die Fernrohre verwendeten wir folgende Linsen:

Fernrohr	$f_1/\text{mm}$	$f_2/\text{mm}$	$\Gamma$
Galilei	500	70	7,14
Kepler	300	-50	6

**Tabelle 8:** Linsen der Fernrohre

Die Linsen wurden entsprechend den Skizzen aus der Vorbereitung positioniert. Das Fernrohr stellten wir auf einen Tisch und betrachteten damit einen am anderen Ende des Raumes aufgehängten Meterstab. Um die Vergrößerung abzuschätzen, schauten wir durch das Fernrohr und maßen den Abstand diverser Markierungen auf dem Meterstab durch das Fernrohr, zwischen je zwei in der Realität jeweils 5 cm Abstand sind. Darüber hinaus stellten wir einen Finger in das Sichtbild und versuchten, den Abstand der Markierungen durch das Fernrohr am Finger abzutragen. Anschließend maßen wir diese Länge.

Diese Methode stellte sich jedoch als schwierig und ungenau heraus, da das Auge zwischen Finger und Fernrohrbild des Meterstabs sehr unterschiedlich akkomodieren muss (ihre Abstände zum Auge sind sehr verschieden), sodass immer mindestens ein Objekt nur unscharf zu erkennen ist. Außerdem maßen wir die abgetragene Länge auf dem Finger mit einem Geodreick nach. Wir nahmen also an, dass wir die Strichabstände auf dem Meterstab unabhängig davon, wie weit wir von ihr entfernt sind, als gleich lang erkennen. Aus der alltäglichen Erfahrung ist aber bekannt, dass Gegenstände in größerer Entfernung kleiner erscheinen als welche, die näher sind.

Unsere Messergebnisse:

Überraschenderweise entsprechen die Messwerte für das Kepler-Fernrohr trotz den eben genannten großen Messungenauigkeiten genau den berechneten.

Die grobe Messmethode macht sich aber beim Galilei-Fernrohr bemerkbar. Dort wurde eine 12,5-fache Vergrößerung gemessen, was mehr als das Doppelte des Berechneten entspricht.

	Messung	$d_{\text{Fernrohr}}/\text{mm}$	$d_{\text{real}}/\text{mm}$	$\Gamma_{\text{exp}}$	$\frac{\Gamma_{\text{exp}}}{\Gamma}$
Galilei-Fernrohr	1	7	50	7,14	1
	2	14	100	7,14	1
Kepler-Fernrohr	1	4	50	12,5	2,08
	2	8	100	12,5	2,08

**Tabelle 9:** Messdaten für die Fernrohrvergrößerung

$d_{\text{Fernrohr}}$ : Abstand der Marken durch das Fernrohr betrachtet

$d_{\text{real}}$ : Abstand der Marken in der Realität

## 2.2 Der Diaprojektor

Um eine 10-fache Vergrößerung in 1,5 m Entfernung vom Dia zu erreichen, hätten wir nach der Rechnung im Vorprotokoll ein Objektiv mit der Brennweite 124 mm benötigt. So eine Linse stand uns nicht zur Verfügung. Um trotzdem eine 10-fache Vergrößerung zu erreichen, benutzen wir ein Objektiv mit 100 mm Brennweite und passten die Abstände an. Es gilt:

$$\beta = 10 = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \Leftrightarrow a' = 10a$$

$$f = \frac{aa'}{a + a'} = \frac{10a^2}{11a} \Leftrightarrow a = 110 \text{ mm} \Rightarrow a' = 1100 \text{ mm}$$

$$e = a + a' = 1210 \text{ mm}$$

Wir stellten den Schirm auf die Position 30 mm der optischen Bank auf, und die Graphik 1210 mm weiter an die Position 1240 mm. Als Graphik wählten wir ein Dia, auf dem sich ein Messstreifen mit einer 1 cm-Skala befindet, und für den Schirm nahmen wir Millimeterpapier, sodass man die Breite des Diabildes gleich ablesen kann.

Leider konnten wir mit diesen berechneten Werten nicht genau die 10-fache Vergrößerung erreichen. Erst nachdem wir die Linse auf die Position 113,7 cm verschoben haben, erschien auf dem Millimeterpapier ein genau 10 cm langer Strich. Dies könnte daran liegen, dass die Abbildungsgleichung eine Näherung ist, und durch das große Bild von 10 cm Breite kleine Abweichungen vorliegen.

## 2.3 Das Mikroskop

Wir bauten hier ein Mikroskop mit einer 20-fachen Vergrößerung auf. Für diese gilt, wie aus der Vorbereitung bekannt:

$$\Gamma_{\text{Mikr}} \stackrel{!}{=} 20 \approx \frac{t}{f_{\text{Obj}}} \cdot \frac{s_0}{f_{\text{Ok}}} \quad (2)$$

Die Brennweiten sowohl von Objektiv als auch Okular sollten also so klein wie möglich sein, um eine möglichst große Vergrößerung zu erreichen. Wir wählten dafür

die Linsen mit den Brennweiten  $f_{\text{Obj}} = 90 \text{ mm}$  und  $f_{\text{Ok}} = 70 \text{ mm}$ .  $s_0$  ist bei jeder Person leicht anders, wir nahmen dafür den in der Versuchsmappe angegebenen Durchschnittswert von  $25 \text{ cm}$  an. Für die Tubuslänge folgt dann  $t = 504 \text{ mm}$ .

Der Abstand von Dia und Objektiv ist bei dieser Näherungsgleichung nicht berücksichtigt. Wir bestimmten sie, indem wir durch die Lampe schauten und den Abstand so veränderten, dass man ein scharfes Bild erkennen konnte. Dies geschah bei einem Abstand von  $10,6 \text{ cm}$ . Da im Gegensatz zum Diaprojektor das Licht nicht auf einen Schirm fällt, sondern direkt in das Auge, verringerten wir die Lichtintensität, indem wir ein Blatt Papier vor das Dia klemmten.

Zur Bestimmung der Vergrößerung haben wir hier dasselbe Problem wie beim Keplerschen und Galileischen Fernrohr. Wir müssten durch das Okular schauen und gleichzeitig eine feste gesehene Länge auf dem Finger abtragen. Wir ersetzten das Dia mit Millimeterpapier. Die Lampe ist stark genug, um durch das Papier durchzuleuchten, sodass man die einzelnen Kästchen des Millimeterpapiers deutlich erkennen konnte.

Wir schauten durch das Mikroskop und trugen eine bestimmte Anzahl an Kästchenlängen des Millimeterpapiers an einem Finger ab. Anschließend beobachteten wir, wieviele Kästchenlängen des Millimeterpapiers die abgetragene Fingerlänge ohne Mikroskop aus derselben Entfernung verdeckten. Der Quotient der Längen bildet die Vergrößerung. Mit dieser Methode verbesserten wir die zur Bestimmung der Vergrößerung der Fernrohre, da wir hier vom gleichen Abstand zum Untersuchungsobjekt darauf schauten und die verschiedenen Längen vergleichen.

Unsere Messergebnisse:

Messung	Länge mit Mikroskop	Länge ohne Mikroskop	$\Gamma_{\text{exp}}$	$\frac{\Gamma_{\text{exp}}}{\Gamma}$
1	4 mm	110 mm	27,5	1,38
2	2 mm	45 mm	22,5	1,13

**Tabelle 10:** Messdaten für die Mikroskopvergrößerung

Die Messwerte sind also relativ gut für die grobe Messmethode. Schwankungen zwischen den Messwerten können neben der ungenauen Messung auch an der Festlegung von  $s_0 = 25 \text{ cm}$  liegen, welche individuell verschieden ist.