

O4 - Abbildungsfehler von Linsen

Julia Mariella Wiest

Gruppe A06

04.07.2025

Mit der Abgabe dieses Protokolls wird bestätigt, dass es kein Plagiat ist. Falls es dennoch eindeutig als Plagiat erkannt werden sollte, ist bekannt, dass das einen Punktabzug von 20 Punkten zur Folge, ohne Möglichkeit der Nachbearbeitung, hat. Diese Bewertung wird ausnahmslos zur Gesamtnote im Anfängerpraktikum beitragen.

1 Physikalische Grundlagen

Der nachstehende Versuch wurde mit dem Ziel durchgeführt, verschiedene Abbildungsfehler von Linsen zu untersuchen.

Ein Abbildungsfehler tritt in einem optischen System auf, wenn Strahlen, welche achsenfern oder in einer Neigung zur Achse verlaufen, zur Bildentstehung beitragen. Hierbei laufen die Strahlen, welche von einem Gegenstandspunkt ausgehen, nicht mehr in einem einzigen Bildpunkt zusammen, sondern treffen in einer nahen Umgebung des tatsächlichen Bildpunktes zueinander. Resultierend daraus entsteht ein unscharfes Bild. Im Weiteren soll nun auf verschiedene Abbildungsfehler näher eingegangen werden (Pfeiler, 2017, S. 196).

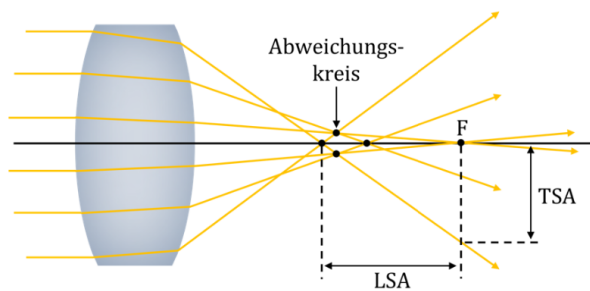


Abb. 1.1: Entstehung der longitudinalen und transversalen sphärischen Aberration (Universität Augsburg, SoSe 2025).

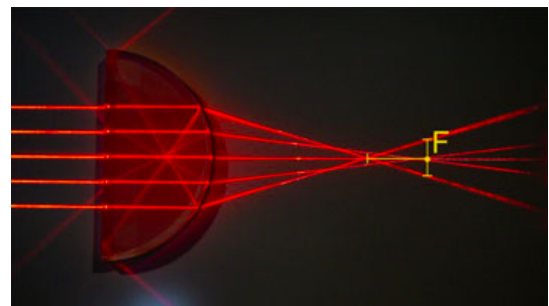


Abb. 1.2: Sphärische Aberration durch eine stark gekrümmte Linse (Roth und Stahl, 2019, S. 167).

Normalerweise treffen sich achsenparallele Strahlen in einem Brennpunkt. Bei der sogenannten **sphärischen Aberration**, auch Zonenfehler genannt, fallen achsennahe beziehungsweise -ferne Strahlen eines zur optischen Achse parallel einfallenden Lichtbündels unter verschiedenen Einfallswinkeln und Linsenzonen ein. Dadurch werden die Randstrahlen stärker gebrochen als die paraxialen Strahlen und bilden einen Brennpunkt näher an der Linse. Dieser Effekt ist vor allem bei kugelförmigen oder sphärischen Linsen mit größerem Durchmesser oder einer stärkeren Krümmung wie in Abbildung 1.2 zu beobachten. Wie in Abbildung 1.1 zu sehen, wird der Abstand zwischen dem paraxialen Fokus F und dem Randstrahlenfokus als longitudinale sphärische Aberration der Linse bezeichnet. Der Abstand des Durchstoßpunktes der äußersten Randstrahlen durch eine Ebene senkrecht zur optischen Achse an der Stelle des paraxialen Fokus wird als transversale sphärische Aberration bezeichnet (Nienhaus, 2019, S. 343), (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Der Abbildungsfehler **Koma** tritt dann auf, wenn Punkte, welche stark seitlich von der optischen Achse liegen, auf einen Schirm abgebildet werden. Durch den schrägen Einfall der Strahlen entsteht kein scharfes punktförmiges Bild, sondern eine einseitig verzerrte Figur. Dabei bilden die paraxialen Strahlen den Kern der Figur, während die Randstrahlen ihren Brennpunkt, wie in Abbildung 1.3 beobachtbar wird, bereits früher bilden und dadurch eine verzerrte schweifartige Aufhellung entsteht. Die Koma kann positiv sowie negativ sein, wobei dies von der Form der Linse abhängig ist (Nienhaus, 2019, S. 344), (Universität Augsburg, SoSe 2025).

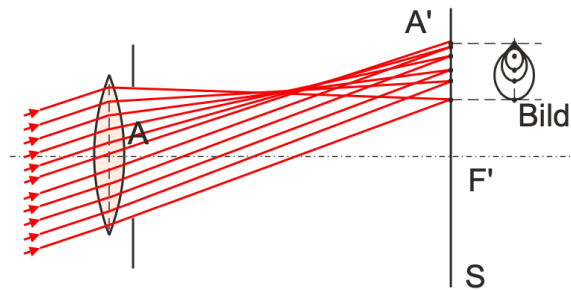


Abb. 1.3: Entstehung des kometenartigen Schweifs der Koma (Eichler, Kronfeldt und Sahm, 2016, S. 282).

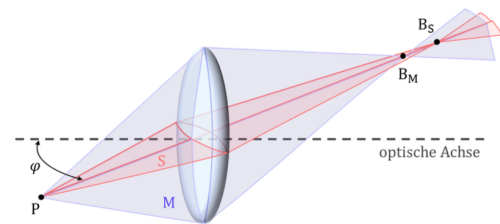


Abb. 1.4: Astigmatische Abbildung eines seitlich der optischen Achse gelegenen Punktes P , wobei die Meridional-Ebene M in Blau und die Sagittal-Ebene in Rot dargestellt ist (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Trifft ein Strahlenbündel nicht zentral, sondern windschief auf eine Linse, oder wird ein Punkt, welcher seitlich der optischen Achse liegt, nur durch Randstrahlen abgebildet, entsteht der sogenannte **Astigmatismus**, auch Punktlosigkeit genannt. Für jenes Strahlenbündel können zwei Hauptkrümmungslinien auf der Linse festgelegt werden: die Meridional-Ebene und die Sagittal-Ebene (Nienhaus, 2019, S. 344). Dabei enthält die Meridional-Ebene die optische Achse und den Objektpunkt. Wie in Abbildung 1.4 zu sehen, vereinigen sich die Strahlen der Meridional-Ebene näher an der Linse, als die der Sagittal-Ebene, welche senkrecht auf der Meridional-Ebene steht. Das heißt, die Strahlen der Meridional-Ebene fallen unter einem größeren Winkel auf die Linse und werden daher stärker gebrochen (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Der Abbildungsfehler, welcher zum Astigmatismus gehört, ist die sogenannte **Bildfeldwölbung**. Liegen die Objektpunkte eines realen Objektes in einer Ebene, so können die einzelnen Punkte in der Meridional- und der Sagittal-Ebene betrachtet werden. Wie bereits erwähnt, vereinigen sich die Strahlen der Meridional-Ebene früher und bilden dadurch die meridionale Bildschale. Die sich später vereinigenden Strahlen der Sagittalen-Ebene bilden die sagittale Bildschale. Nun wird der Gegenstand auf beide Bildschalen gleichzeitig abgebildet. Jedoch befindet sich der Schirm niemals auf beiden parabelförmigen Bildschalen gleichzeitig, wie in Abbildung 1.5 visualisiert. Dadurch erscheint das Bild entweder im äußeren oder inneren Bereich unscharf (Roth und Stahl, 2019, S. 171), (Universität Augsburg, SoSe 2025).

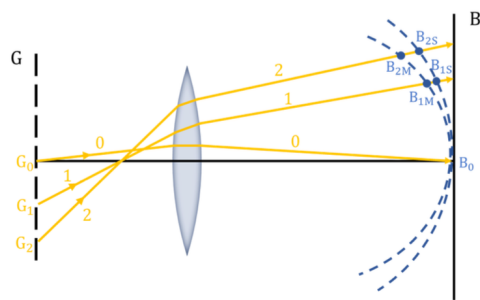


Abb. 1.5: Darstellung der Bildfeldwölbung eines ebenen, realen Gegenstandes (Universität Augsburg, SoSe 2025).

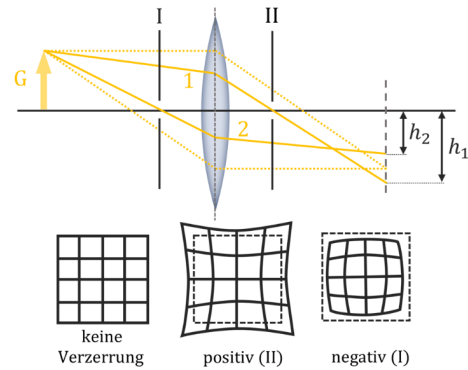


Abb. 1.6: Entstehung von Verzeichnung durch eine Blende vor (I) oder nach (II) der Linse (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Werden durch die Anwendung von Blenden Mittelpunktstrahlen abgeschnitten, so werden übriggebliebene Randstrahlen stärker gebrochen und es kommt zum dem Effekt der **Verzeichnung**. Das heißt, dass jede gerade Linie, welche die optische Achse nicht schneidet, letztendlich gekrümmt abgebildet wird, da das Abbild nicht mehr durch das Bildzentrum verläuft. Vereinigen sich die verbleibenden Randstrahlen weiter außen, so ergibt sich eine positive, kissenförmige Verzeichnung des Bildes. Diese Verzeichnung entsteht, wenn eine Blende hinter der Linse montiert wird. Wird dagegen eine Blende vor der Linse installiert, vereinigen sich die Randstrahlen weiter innen und es entsteht eine negative, tonnenförmige Verzeichnung. Der Strahlengang sowie die resultierenden Verzeichnung sind in Abbildung 1.6 visualisiert (Pfeiler, 2017, S. 200), (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Bisher wurde bei den obigen Abbildungsfehlern von monochromatischem Licht ausgegangen. Trifft nun buntes Licht auf eine Linse, so muss die **chromatische Aberration**, welche durch Dispersion entsteht, berücksichtigt werden. Der Brechungsindex eines optischen Materials ist von der Wellenlänge des Lichts abhängig und damit auch die Lage der Brennpunkte. Materialien im Bereich des sichtbaren Lichts weisen eine normale Dispersion auf, das heißt, im Farbspektrum ist der Brechungsindex für blaues Licht höher als für rotes, da blaue Strahlen deutlich stärker gebrochen werden. Damit liegt aufgrund der unterschiedlichen Brennweite die Bildebene des blauen Lichts dichter an der Linse, als die des roten Lichts. Dies ist in Abbildung 1.7 zu sehen. Der Abstand zwischen dem roten und dem blauen Brennpunkt wird als axiale chromatische Aberration bezeichnet (Roth und Stahl, 2019, S. 174), (Universität Augsburg, SoSe 2025).

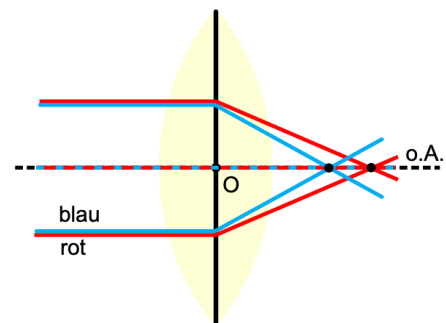


Abb. 1.7: Chromatische Aberration von rotem und blauem Licht (Nienhaus, 2019, S. 347).

2 Abbildungsfehler von Linsen

2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Formulierungen für den Versuchsaufbau, beziehungsweise die Anwendung des Bessel-Verfahrens wurden teilweise aus dem Protokoll O1 - Brennweiten von Linsen und Linsensystemen vom 15.01.2025 entnommen.

Zur Durchführung aller Teilversuche wurden die benötigten Instrumente über einen Schraubmechanismus auf einer optischen Bank in der erforderlichen Reihenfolge installiert. Die optische Bank selbst weist ein integriertes Lineal auf, sodass ganz einfach abgelesen werden konnte, auf welcher Position sich die jeweiligen Instrumente befinden. Hierbei war zudem jeweils auf dem Fuß der Schraubmechanismen der Instrumente ein Ausrichtungsstrich aufgemalt, um das exakte Ablesen des genauen Zentimeterwertes zu ermöglichen. Die Lampe wurde für alle vier Teilversuche gleichermaßen am linken Ende der optischen Bank auf der Höhe von 2,6 cm montiert.

Vor der eigentlichen Durchführung des Versuches muss die Beleuchtungseinrichtung, bestehend aus einem Heizwendel, einer Kondensorlinse und einer Blende, eingestellt werden. Hierfür werden die Beleuchtungsquelle, eine Linse und ein Schirm auf der optischen Bank montiert. Durch das Bewegen des an der Lampe angebrachten Lampenvorschubs, mit welchem der Abstand zwischen Wendel und Kondensorlinse variiert werden kann, kann ein scharfes Bild der Glühwendel am Schirm erzeugt werden. Durch diese Justierung strahlt die benutzte Lichtquelle paralleles Licht aus, da nun die Wendel exakt im Brennpunkt des Kondensors der Beleuchtungseinheit sitzt.

Als erstes soll die longitudinale sphärische Aberration einer Linse untersucht werden. Dafür werden auf der optischen Bank die kalibrierte Lampe, ein Dia als Objekt, eine Linse mit der Brennweite $f = 150 \text{ mm}$ und ein Schirm montiert. Um nun die longitudinale sphärische Aberration experimentell bestimmen zu können, werden die Brennweiten für paraxiale und für Randstrahlen näher untersucht. Um die nicht benötigten Strahlen ausblenden zu können, werden verschiedene Blenden auf die Linse aufgesteckt. So wird der Versuch zur näheren Beleuchtung der paraxialen Strahlen mit einer Lochblende und zur Untersuchung der Randstrahlen mit einer Ringblende durchgeführt.

Für die Brennweitenbestimmung selbst wird das Bessel-Verfahren angewandt. Die Position des hierfür installierten Dias bei 20,0 cm wird im Laufe des Versuches nicht mehr verändert. Für die erste Messung wurde der Schirm am hintersten rechten Ende der optischen Bank auf der Höhe 99,0 cm montiert. Nun wird durch das Verschieben der Linse im Raum zwischen

Dia und Schirm eine Linsenposition gesucht, sodass auf dem Schirm ein großes scharfes Bild entsteht. Dies ist Linsenposition 1, welche im Protokoll notiert wird. Nun wird die Linse weiter in Richtung Schirm geschoben, bis abermals ein kleines scharfes Bild entsteht. Dort befindet sich Linsenposition 2, welche ebenfalls im Protokoll notiert wird. Für die nächste Messung wird der Schirm um ein paar Zentimeter nach links auf 96,0 cm verschoben und wiederum beide Linsenpositionen für das kleine und große scharfe Bild des Dias auf dem Schirm aufgenommen. Dieses Vorgehen wird für insgesamt fünf Messungen pro Blende wiederholt. Während der Variation des Schirmes ist dabei darauf zu achten, dass der Abstand zwischen dem Dia und dem Schirm immer größer als $4f = 60\text{ cm}$ ist. Deswegen befand sich die letzte Position des Schirmes bei 87,0 cm. Der gesamte Aufbau ist zusätzlich in Abbildung 2.1 visualisiert.

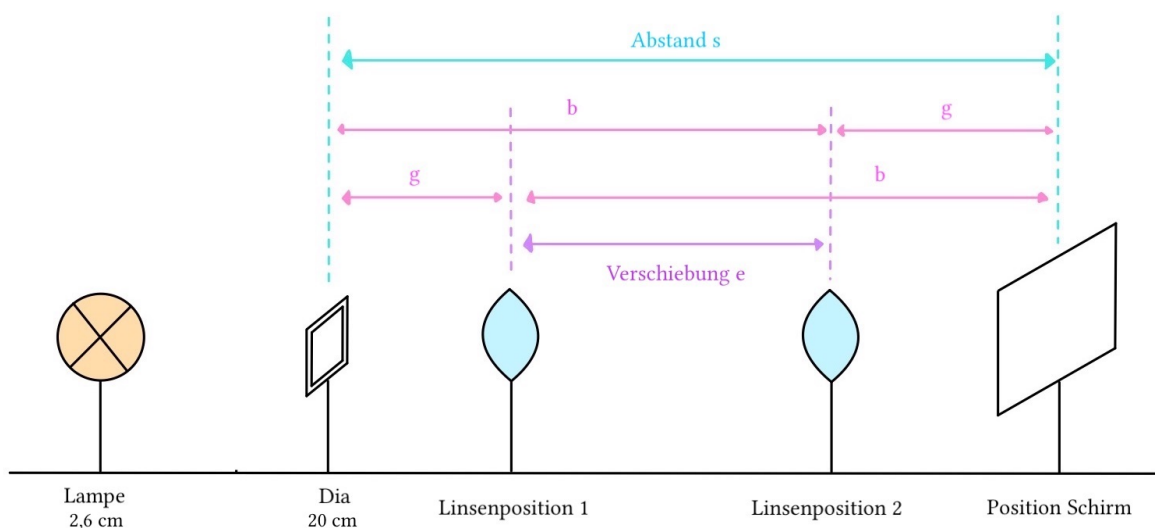


Abb. 2.1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Brennweite f nach dem Bessel-Verfahren (in Anlehnung an Universität Augsburg, WiSe 2024).

Anschließend soll die chromatische Aberration derselben Linse untersucht werden. Der Versuchsaufbau aus dem ersten Versuchsteil wird nun um einen Farbfilter bei 20,0 cm ergänzt. Das Dia befindet sich jetzt auf der Position 25,1 cm. Sowohl der Farbfilter als auch das Dia werden während des Versuches nicht mehr bewegt. Die zuvor verwendete Ring- und Lochblende wird aus dem Aufbau entfernt. Wie bereits in Teilversuch 1 werden die Brennweiten der Linse durch verschieden Farbfilter in Rot, Blau und Grün über das Bessel-Verfahren bestimmt. Hierfür werden jeweils für fünf verschiedene Schirmabstände pro Farbfilter Messungen vorgenommen.

Im dritten Teilversuch soll der Abbildungsfehler Koma, also eine einseitig verzerrte Figur, nachgestellt werden. Hierfür werden die Lampe, eine Blende, die Linse und der Schirm auf der optischen Bank installiert. Dabei ist der Abstand zwischen der Blende und dem Schirm größer als 75 cm. Als erstes wird eine Viellochblende, welche ein Dia mit Lochmuster darstellt, vor der Lampe im Objekthalter montiert. Dann wird die Linse so verschoben, dass ein scharfes Bild auf dem Schirm zu sehen ist. Von dieser Ausgangsstellung wurde ein Foto für die Auswertung gemacht. Anschließend wird die Linse nach und nach gedreht, sodass auf dem Schirm die

Entwicklung der Komae beobachtet werden kann. Auch dies wurde fotografiert. Dasselbe Vorgehen wurde für eine Irisblende wiederholt, indem diese statt der Viellochblende in den Aufbau gesetzt wurde.

Der letzte Teilversuch dient der Untersuchung der Abbildungsfehler der Verzeichnung und der Bildfeldwölbung. Der Aufbau aus Teilversuch 3 wird übernommen mit der Anpassung, dass die Irisblende durch ein Dia, welches ein quadratisches Kreuzgitter zeigt, ersetzt wird. Das Dia wird abermals am Schirm scharf gestellt und die Ausgangsposition fotografiert. Um nun die Verzeichnung des Abbilds auf dem Schirm herstellen zu können, wird die Irisblende einmal zwischen der Linse und dem Schirm und einmal zwischen der Linse und dem Dia montiert. Durch das Positionieren der Irisblende zwischen der Linse und dem Schirm entsteht eine negative Verzeichnung. Wird hingegen die Blende zwischen der Linse und dem Dia montiert, entsteht eine positive Verzeichnung.

Durch das Ersetzen des Kreuzgitter-Dias durch ein Dia, welches ein Wagenrad abbildet, kann über dasselbe Vorgehen wie mit dem Kreuzgitter beziehungsweise über die Variation des Schirmabstandes die Bildfeldwölbung untersucht werden. Der letztgenannte Aufbau, mit einem zusätzlichen Farbfilter, welcher im tatsächlichen Aufbau in Teil 2 verwendet wurde, ist nochmals in Abbildung 2.2 visualisiert.

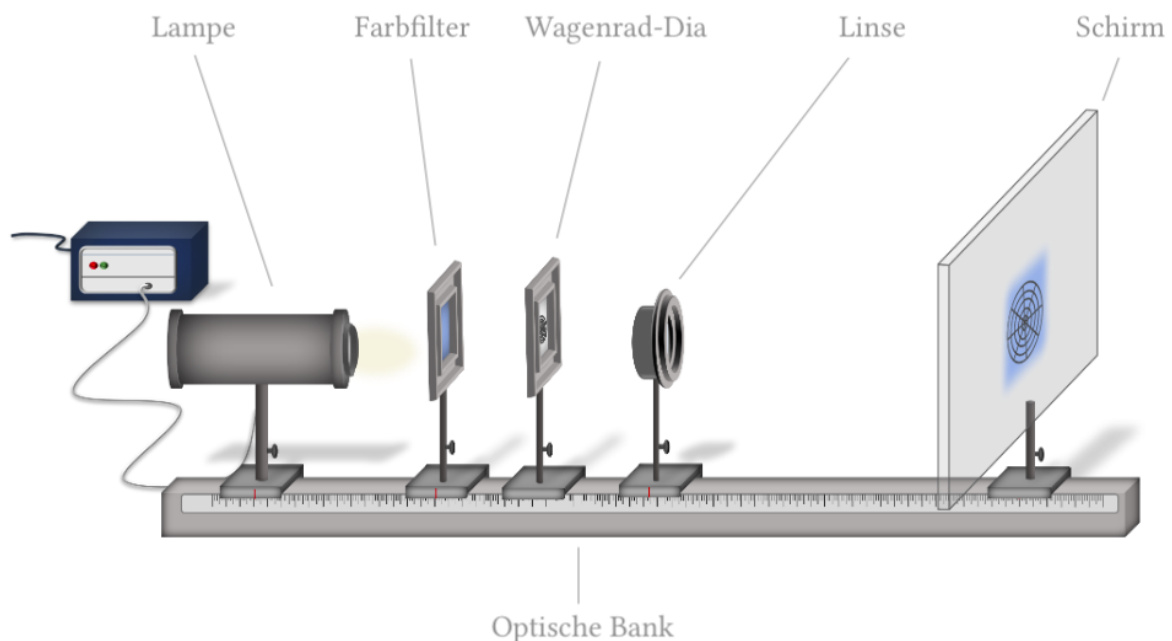


Abb. 2.2: Versuchsaufbau (mit Farbfilter) zur Untersuchung der Bildfeldwölbung mit dem Wagenrad-Dia (Universität Augsburg, [SoSe 2025](#)).

2.2 Auswertung der Messergebnisse

Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Versuchsdurchführung werden die damit erlangten Messergebnisse nun ausgewertet.

Longitudinale sphärische Aberration

Die longitudinale sphärische Aberration der verwendeten Linse wird über den Unterschied der verschiedenen Brennweiten der paraxialen Strahlen und der Randstrahlen ermittelt. Hierfür werden zunächst aus den einzelnen aufgenommenen Werten die resultierenden Brennweiten gemäß dem Bessel-Verfahren bestimmt. Hierzu wird die Tatsache ausgenutzt, dass der Gegenstand und das Bild, in diesem Fall das Dia und der Schirm, vertauschbar sind. Das heißt, wie im Aufbau in Abbildung 2.1 zu sehen, gibt es genau zwei verschiedene Linsenpositionen, unter welchen ein scharfes Bild auf dem Schirm erkennbar wird.

Beim Bessel-Verfahren ergibt sich der Abstand s über die Summe der Gegenstandsweite g und die Bildweite b und die Verschiebung e über die Subtraktion der Gegenstandsweite g von der Bildweite b :

$$\begin{aligned} s &= g + b & e &= b - g \\ \Rightarrow g &= \frac{s - e}{2} & \Rightarrow b &= \frac{s + e}{2} \end{aligned}$$

Durch das Gleichsetzen von g und b ergibt sich für die Brennweite

$$f = \frac{s^2 - e^2}{4s}.$$

Im Falle des durchgeführten Versuches lässt sich die Verschiebung e und der Abstand s folgendermaßen berechnen:

$$e = \text{Linsenposition 2} - \text{Linsenposition 1}, \quad s = \text{Position Schirm} - \text{Position Dia}.$$

Dabei befand sich das Dia für alle Messungen auf der Position 20,0 cm.

Für den Messfehler wird von $\Delta e = \Delta s = 0,2$ cm ausgegangen. Mit diesen Werten ergibt sich der Gesamtfehler

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial e} \cdot \Delta e + \frac{\partial f}{\partial s} \cdot \Delta s = \left| \frac{e}{2s} \right| \cdot \Delta e + \left| \frac{s^2 + e^2}{4s^2} \right| \cdot \Delta s.$$

Für die mit der **Ringblende** aufgenommenen Messwerte in Tabelle 2.1 ergeben sich die in derselben Tabelle aufgetragenen Ergebnisse durch das Anwenden der oben stehenden Formeln. Alle Werte in der Tabelle sind in der Einheit [cm] angegeben.

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	s	e	f	Δf
20,0	38,8	81,5	99,0	79,0	42,7	13,98	0,12
20,0	38,9	78,5	96,0	76,0	39,6	13,84	0,12
20,0	39,4	75,9	93,0	73,0	36,5	13,69	0,11
20,0	39,8	70,7	90,0	70,0	30,9	14,09	0,10
20,0	40,4	67,9	87,0	67,0	27,5	13,93	0,10

Tabelle 2.1: Messergebnisse und Auswertung der Ringblende mit dem Bessel-Verfahren.

Nachdem für jede Messung i die Brennweite f beziehungsweise der Fehler Δf berechnet wurde, wird über diese Werte der Mittelwert

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i, \quad \Delta \bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_i$$

gebildet.

Somit ergeben sich für die Randstrahlen, aufgenommen mit der Ringblende, eine Brennweite von

$$f_{\text{Ringblende}} = (13,91 \pm 0,11) \text{ cm}$$

für die Linse mit dem tatsächlichen Brennwert von $f_{\text{tatsächlich}} = 15,0 \text{ cm}$.

Für die mit der **Lochblende** aufgenommenen Messwerte in Tabelle 2.2 ergeben sich die in derselben Tabelle aufgetragenen Ergebnisse durch das Anwenden der oben stehenden Formeln. Alle Werte in der Tabelle sind in der Einheit [cm] angegeben.

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	s	e	f	Δf
20,0	39,8	77,9	99,0	79,0	38,1	15,16	0,11
20,0	40,2	74,3	96,0	76,0	34,1	15,17	0,10
20,0	41,1	70,6	93,0	73,0	29,5	15,27	0,10
20,0	42,1	66,7	90,0	70,0	24,6	15,34	0,09
20,0	42,5	63,4	87,0	67,0	20,9	15,12	0,09

Tabelle 2.2: Messergebnisse und Auswertung der Lochblende mit dem Bessel-Verfahren.

Somit ergeben sich für die paraxialen Strahlen, aufgenommen mit der Lochblende, nach der Bildung des Mittelwerts eine Brennweite von

$$f_{\text{Lochblende}} = (15,21 \pm 0,10) \text{ cm}$$

für die Linse mit dem tatsächlichen Brennwert von $f_{\text{tatsächlich}} = 15,0 \text{ cm}$.

Mit den nun berechneten Brennweiten für die paraxialen Strahlen und die Randstrahlen kann die longitudinale sphärische Aberration, kurz LSA, ermittelt werden:

$$LSA = f_{\text{Lochblende}} - f_{\text{Ringblende}} = 15,21 \text{ cm} - 13,91 \text{ cm} = 1,30 \text{ cm}$$

Der Größfehler ergibt sich über die Formel

$$\Delta LSA = \Delta f_{\text{Lochblende}} + \Delta f_{\text{Ringblende}} = 0,11 \text{ cm} + 0,10 \text{ cm} = 0,21 \text{ cm}.$$

Damit ist die longitudinale sphärische Abberation für die untersuchte Linse

$$LSA = (1,30 \pm 0,21) \text{ cm}.$$

Sowohl die Strahlen durch die Ringblende als auch durch die Lochblende weichen von der Herstellerangabe $f = 150 \text{ mm}$ ab. Die paraxialen Strahlen weisen eine sehr geringe Abweichung von der tatsächlichen Brennweite auf, sodass diese bereits fast im Fehlerbereich liegt. Im Gegensatz dazu ergibt sich für die Randstrahlen eine klare Abweichung von der tatsächlichen Brennweite, indem die Brechung der Strahlen durch die Ringblende deutlich stärker ausfällt. Dies entspricht den theoretischen Erwartungen. Insgesamt lässt die ermittelte longitudinale sphärische Aberration der Linse darauf schließen, dass zwischen den Rand- und den paraxialen Strahlen durchaus eine Diskrepanz im sichtbaren Bereich ersichtlich wird.

Mögliche systematische Fehler, welche während des Versuches auftreten können, sind beim Bessel-Verfahren beispielsweise auf Ablesefehler zurückzuführen. Dadurch, dass der Schirm und die Linse für jeden Messvorgang verschoben werden und jedes Mal deren Position auf der optischen Bank abgelesen wird, kann es zu Verfälschungen kommen. Dieser Fehler wird über mehrere Messdurchgänge und das Berücksichtigen eines Fehlerwertes in der Fehlerrechnung etwas kompensiert. Zudem wird für das Bessel-Verfahren für zwei Linsenpositionen ein scharfes Bild auf dem Schirm eingestellt. Jedoch erfolgt die Beurteilung der Schärfe des Bildes subjektiv, sodass vor allem bei der Einstellung des kleinen Bildes auf dem Schirm für die zweite Linsenposition schwer abzuschätzen war, wann das Bild tatsächlich scharf gestellt war.

Insgesamt ist die Streuung der Messwerte gering. Dementsprechend ist die Qualität der Ergebnisse als gut zu beurteilen.

Chromatische Aberration

Die chromatische Aberration der Linse wird für drei verschiedene Farbfilter ebenfalls mit dem Bessel-Verfahren bestimmt. Hierfür werden die Formeln auf dem oberen Teilkapitel auf die jeweiligen Messergebnisse des zweiten Versuchsaufbaus angewendet.

Die Messergebnisse und Auswertungen zur Bestimmung der Brennweite für den **blauen Filter** sind in Tabelle 2.3, für den **grünen Filter** in Tabelle 2.4 und für den **roten Filter** in 2.5 zu finden. Alle Werte in den Tabellen sind wiederum in der Einheit [cm] angegeben.

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	s	e	f	Δf
25,1	47,3	78,0	99,0	73,9	30,7	15,29	0,10
25,1	47,2	74,3	96,0	70,9	27,1	15,14	0,10
25,1	48,7	70,3	93,0	67,9	21,6	15,26	0,09
25,1	50,2	66,4	90,0	64,9	16,2	15,21	0,08
25,1	52,2	61,4	87,0	61,9	9,2	15,13	0,07

Tabelle 2.3: Messergebnisse und Auswertung der chromatischen Aberration des blauen Filters mit dem Bessel-Verfahren.

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	s	e	f	Δf
25,1	46,2	78,9	99,0	73,9	32,7	14,86	0,10
25,1	46,6	75,2	96,0	70,9	28,6	14,84	0,10
25,1	47,3	71,0	93,0	67,9	23,7	14,91	0,09
25,1	49,0	67,0	90,0	64,9	18,0	14,98	0,08
25,1	51,5	62,5	87,0	61,9	11,0	14,99	0,07

Tabelle 2.4: Messergebnisse und Auswertung der chromatischen Aberration des grünen Filters mit dem Bessel-Verfahren.

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	s	e	f	Δf
25,1	47,0	77,8	99,0	73,9	30,8	15,27	0,10
25,1	48,0	74,2	96,0	70,9	26,2	15,30	0,09
25,1	48,2	71,6	93,0	67,9	23,4	14,96	0,09
25,1	49,6	66,5	90,0	64,9	16,9	15,12	0,08
25,1	52,0	62,0	87,0	61,9	10,0	15,07	0,07

Tabelle 2.5: Messergebnisse und Auswertung der chromatischen Aberration des roten Filters mit dem Bessel-Verfahren.

Über die aufgenommenen Brennweiten f und Δf wird wiederum der Mittelwert gebildet, sodass sich folgende kumulierten Brennweiten für die unterschiedlichen Farbfilter ergeben:

$$f_{\text{blau}} = (15,21 \pm 0,09) \text{ cm}, \quad f_{\text{grün}} = (14,91 \pm 0,09) \text{ cm}, \quad f_{\text{rot}} = (15,15 \pm 0,09) \text{ cm}.$$

Anhand der unterschiedlichen Brennweiten, welche aus der Anwendung der verschiedenen Farbfiltern resultieren, trifft die theoretische Erwartung, dass sich der Brechungsindex der Linse mit der Wellenlänge ändert, zu. Zudem kann die Erwartung bestätigt werden, dass blaues Licht am stärksten abgelenkt wird. Da der Fehler für alle Farben derselbe ist, lässt sich die Dispersion für die Wellenlängen aufsteigend für Grün, Rot und Blau ordnen.

Die axialen chromatischen Aberrationen, also die Brennweitenunterschiede der verschiedenen Farbfilter, ergeben sich folgendermaßen

$$\begin{aligned} f_{\text{blau-rot}} &= 15,21 \text{ cm} - 15,15 \text{ cm} = 0,06 \text{ cm}, \\ f_{\text{blau-grün}} &= 15,21 \text{ cm} - 14,91 \text{ cm} = 0,29 \text{ cm}, \\ f_{\text{rot-grün}} &= 15,15 \text{ cm} - 14,91 \text{ cm} = 0,23 \text{ cm}. \end{aligned}$$

Der Fehler aller Brennweitenunterschiede beläuft sich aufgrund desselben Fehlerwertes von $\Delta f = 0,09 \text{ cm}$ auf

$$\Delta f_{\text{chromatische Aberration}} = 0,09 \text{ cm} + 0,09 \text{ cm} = 0,18 \text{ cm}.$$

Bei genauerer Betrachtung der Wellenlängen des Farbspektrums ist es verwunderlich, dass die axiale chromatische Aberration zwischen dem blauen und dem grünen Farbfilter am größten ausfällt. Erwartbar wäre gewesen, dass die größte Abweichung zwischen dem roten und dem blauen Filter entsteht, da deren Wellenlängen im Farbspektrum am weitesten voneinander entfernt liegen (vgl. Abb. 2.3).

Mögliche auftretende systematische Fehler wurden bereits im obigen Teilkapitel diskutiert.

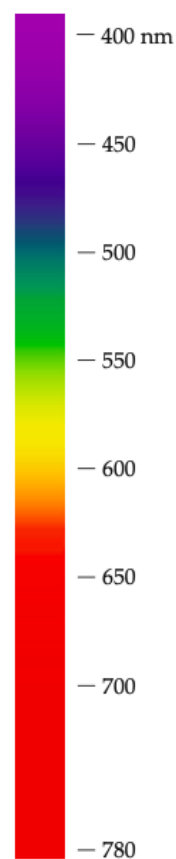


Abb. 2.3:
Farbspektrum
von sichtbarem
Licht (Tipler und
Mosca, 2024,
S. 989).

Koma

Zur näheren Untersuchung des Abbildungsfehlers Koma wird zunächst eine scharfe Abbildung einer Viellochblende am Schirm erzeugt, indem die Linse senkrecht zu den eintreffenden Lichtstrahlen ausgerichtet wird. In Abbildung 2.4 ist zu sehen, dass bei einer senkrechten Ausrichtung der Linse nahezu alle Punkte klar definiert sind. Dadurch, dass die Linse von Hand ausgerichtet wurde und damit vermutlich nicht exakt senkrecht zur Lichtquelle ausgerichtet war, erscheinen ein paar Punkte am Rand leicht verschwommen und weisen bereits einen leichten Schweif auf.

Durch das Auslenken der Linse wird am linken Rand der Abbildung am Schirm, welche in Abbildung 2.5 zu sehen ist, ein Kometenschweif ersichtlich. Dabei gehen die Strahlen des Schweifes nach links, sodass sich die Strahlen von der optischen Achse wegbewegen und dadurch ein negatives Koma entsteht.

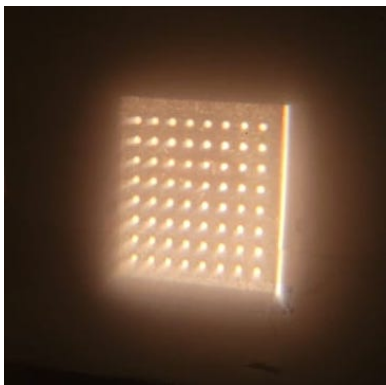


Abb. 2.4: Scharfes Bild des Lochdias auf dem Schirm.

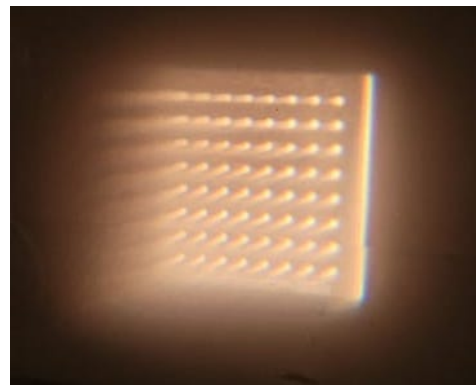


Abb. 2.5: Koma des Lochdias auf dem Schirm durch Auslenkung der Linse.

Dasselbe Experiment mit der Viellochblende wurde nun nochmals mit einer einfachen Irisblende wiederholt. In Abbildung 2.6 ist eine scharfe Abbildung des Lichtkreises am Schirm zu sehen.

Durch das Verdrehen der Linse wird auch hier der typische Kometenschweif ersichtlich, sodass der anfänglich zu sehende Kreis zu einem Oval wird, welches nach rechts außen hin etwas weniger stark beleuchtet erscheint. Die Linse wurde in Blickrichtung des Schirms nach links ausgelenkt. Infolgedessen neigt sich der Schweif nach rechts (vgl. Abb. 2.7).



Abb. 2.6: Scharfes Bild der Irisblende auf dem Schirm.



Abb. 2.7: Koma der Irisblende auf dem Schirm durch Auslenkung der Linse.

Verzeichnung und Bildfeldwölbung

Um den Bildfehler der **Verzeichnung** experimentell nachzustellen, wird zunächst ein Dia, welches ein Kreuzgitter zeigt, ohne Blende auf der optischen Bank platziert und durch eine Linse scharf auf dem Schirm abgebildet (vgl. Abb. 2.8).

Durch das Platzieren einer Irisblende zwischen dem Dia und der Linse lässt sich in Abbildung 2.9 beobachten, dass durch die Blende nun die Mittelpunktstrahlen abgeschnitten und dadurch die übrigbleibenden Randstrahlen deutlich stärker gebrochen werden. Dadurch vereinigen sich jene Randstrahlen weiter außen und es entsteht die beobachtbare kissenförmige Verzeichnung, indem sich die Bildpunkte radial nach außen verschieben und sich das Gitter nach innen zu wölben scheint. Dies wird als positive Verzeichnung bezeichnet.

Die Platzierung der Irisblende zwischen der Linse und dem Schirm hingegen scheint das Gegenteil zu bewirken. Von der Blende werden weiterhin die Mittelpunktstrahlen abgeschnitten, jedoch vereinigen sich die übriggebliebenen Randstrahlen nun weiter innen, sodass in Abbildung 2.10 eine tonnenförmige Verzeichnung, auch negative Verzeichnung genannt, auftritt. Das heißt, die Bildpunkte werden radial nach innen verschoben, sodass das Gitter nach außen gewölbt erscheint.

Insgesamt war der Effekt der Verzeichnung sowohl in die positive, als auch in die negative Richtung gut nachzustellen und entspricht genau den theoretischen Erwartungen wie in den angefertigten Bildern zu sehen.

Zur Beobachtung der **Bildfeldwölbung** wurde das Kreuzgitter-Dia durch ein Wagenrad-Dia ersetzt. Auch für dieses Dia wurde zunächst ein scharfes Bild ohne Blende auf den Schirm projiziert (vgl. Abb. 2.11). Das Dia des Wagenrades weist die nötigen Voraussetzungen, dass mehrere Objektpunkte eines realen Objektes in einer Ebene liegen, auf, sodass daran der Abbildungsfehler der Bildfeldwölbung hergestellt werden kann. An der scharfen Abbildung des Wagenrades fällt auf, dass die Kreislinien an den Rändern bereits leicht verschwommen sind.

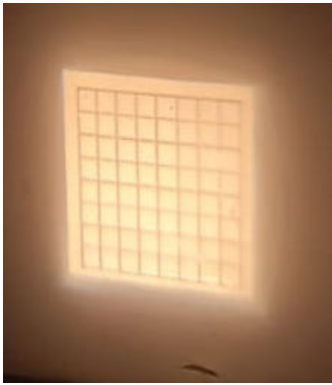


Abb. 2.8: Scharfe Abbildung des Kreuzgitters auf dem Schirm.

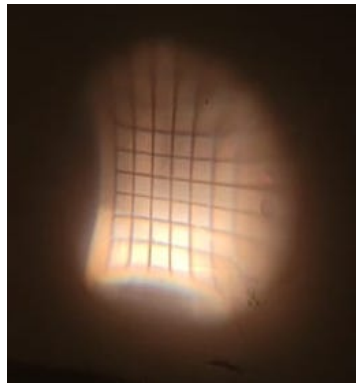


Abb. 2.9: Positive Verzeichnung des Kreuzgitters auf dem Schirm.

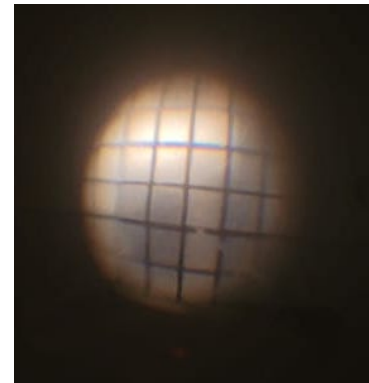


Abb. 2.10: Negative Verzeichnung des Kreuzgitters auf dem Schirm.

Durch das Variieren der Schirmposition beziehungsweise, um den Effekt noch mehr zu verstärken, durch das Zwischenschalten einer Blende, lässt sich ein deutliches Verschwimmen der Ränder in Abbildung 2.12 beobachten.



Abb. 2.11: Scharfe Abbildung des Wagenrades auf dem Schirm.



Abb. 2.12: Unscharfe Abbildung des Wagenrades auf dem Schirm.

Sowohl bei der Untersuchung der Koma, als auch bei der Nachstellung der Verzeichnung und Bildfeldwölbung, kommt es bei der Versuchsdurchführung zu subjektiven Verzerrungen. Wie bereits beschrieben, ist die Empfindung, wann ein Bild scharf am Schirm abgebildet wird, für jeden Menschen persönlich unterschiedlich. Zudem geben die angefertigten Bilder mit der Handykamera nicht exakt das Bild wieder, welches tatsächlich im Labor auf dem Schirm beobachtbar war. Dies kommt daher, dass das Anfertigen von Bildern in einem dunklen Raum ohne Stativ oft dazu führt, dass das Bild leichter „verwackelt“ erscheint und dadurch mögliche Unschärfen der Fotos auch darauf zurückzuführen sind. Generell wurden für die Versuchsteile mehrere Bilder angefertigt und die subjektiv am besten zum den untersuchenden Phänomenen passenden Fotografien ausgewertet. Die Versuchsdurchführung selbst erfolgte darüber, die optischen Instrumente so zu verschieben, dass die gewünschten Effekte am Schirm auftreten, indem beispielsweise für das Koma die Linse verdreht wurde. In welchem Winkel zur optischen Achse letztendlich die Linse für das in Abbildung 2.5 zu sehende Koma ausgelenkt wurde, lässt sich, zumindest in dem vorliegenden Versuchsaufbau, nicht nachvollziehen und kann somit nur

schwer nochmals genau in dieser Konfiguration nachgestellt werden. Gleichmaßen verhält es sich mit dem Effekt der Verzeichnung. Durch das Verdrehen oder Verschieben der Irisblende erscheint die Verzeichnung stärker oder schwächer, sodass die exakte Replizierbarkeit des Versuchsaufbaus sich schwierig gestaltet.

Literatur

- Eichler, Hans Joachim, Heinz-Detlef Kronfeldt und Jürgen Sahm (2016). *Das Neue Physikalische Grundpraktikum*. 3. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Nienhaus, Hermann (2019). *Physik Für Das Lehramt - Elektrodynamik Und Optik*. Bd. 2. Berlin: De Gruyter.
- Pfeiler, Wolfgang (2017). *Experimentalphysik - Optik, Strahlung*. Bd. 4. Berlin: De Gruyter.
- Roth, Stefan und Achim Stahl (2019). *Optik - Experimentalphysik Anschaulich Erklärt*. Aachen: Springer Spektrum.
- Tipler, Paul und Gene Mosca (2024). *Tipler Physik*. 9. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Universität Augsburg (WiSe 2024). *Versuchsanleitung O1 - Brennweiten von Linsen Und Linsensystemen*.
- (SoSe 2025). *Versuchsanleitung O4 - Abbildungsfehler von Linsen*.

3 Anhang

Ringblende

$$f = 150 \text{ mm}$$

Position Lampe 2,6 cm

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	in cm
20,0	38,8	81,5	99,0	
20,0	38,9	78,5	96,0	
20,0	39,4	75,9	93,0	
20,0	39,8	70,7	90,0	
20,0	40,4	67,9	87,0	

Lochblende

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	in cm
20,0	42,5	63,4	87,0	
20,0	42,1	66,7	90,0	
20,0	41,1	70,6	93,0	
20,0	40,2	74,3	96,0	
20,0	39,8	77,9	99,0	

Filter: Blau

Farbfilter: 20,0 cm

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	in cm
25,1	47,3	78,0	93,0	
25,1	47,2	74,3	96,0	
25,1	48,7	70,3	93,0	
25,1	50,2	66,4	90,0	
25,1	52,2	61,4	87,0	

Filter: Grün

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	in cm
25,1	61,5	62,5	87,0	
25,1	49,0	67,0	90,0	
25,1	47,3	71,0	93,0	
25,1	46,6	75,2	96,0	
25,1	46,2	78,9	99,0	

Filter: Rot

Dia	Linse Pos. 1	Linse Pos. 2	Schirm	in cm
25,1	47,0	77,8	93,0	
25,1	48,0	74,2	96,0	
25,1	48,2	71,6	93,0	
25,1	49,6	66,5	90,0	
25,1	52,0	62,0	87,0	

04/4.7.25/R

Versuch 1
Gruppe A06
04.07.2025

Versuch 2