



Technische Optik
Praktikum Linsenfehler

Hans Herrmann Felix Kayser Hermann Pommerenke Tino Steinmetz

4. Juni 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Versuchsaufbau	3
3 Durchführung und Auswertung	5
3.1 Sphärische Aberration	5
3.2 Koma	5
3.3 Astigmatismus	5
3.4 Bildfeldwölbung	6
3.5 Verzeichnung	7
3.6 Chromatische Aberration	8

1 Einleitung

Die Ausbreitung eines Lichtstrahls lässt sich prinzipiell durch folgende Geradengleichung beschreiben:

$$y(z) = y_1 + z \cdot \tan \theta.$$

Für kleine Winkel gilt $\tan \theta \approx \theta$ bzw. $\sin \theta \approx \theta$. Dies lässt sich leicht durch die Reihenentwicklung der Winkelfunktionen zeigen:

$$\begin{aligned}\sin \theta &= \theta - \frac{1}{3!} \theta^3 + \frac{1}{5!} \theta^5 - \dots \\ \tan \theta &= \theta + \frac{1}{3} \theta^3 + \frac{2}{15} \theta^5 + \dots\end{aligned}$$

Die Geradengleichung kann folglich für viele optische Systeme, deren Strahlen sich nahe der optischen Achse ausbreiten, durch eine paraxiale Näherung

$$y(z) = y_1 + z \cdot \theta$$

ausgedrückt werden (Theorie 1. Ordnung).

Berücksichtigt man zusätzlich noch den 2. Summanden der Reihenentwicklung (kubische Abhängigkeit vom Winkel), ergibt sich die Theorie 3. Ordnung:

$$y(z) = y_1 + z \cdot \left(\theta + \frac{1}{3} \theta^3 \right)$$

Im Vergleich zur paraxialen Näherung können hierbei 6 einfache Aberrationen unterschieden werden; 5 davon sind achromatisch:

Sphärische Aberration bezeichnet den Abstand zwischen dem axialen Schnittpunkt eines gebrochenen Strahls und dem paraxialen Brennpunkt F' eines optischen Systems. Durch diesen Abstand, innerhalb dessen die gebrochenen Strahlen die optische Achse schneiden, lässt sich mit der betreffenden Optik keine absolut scharfe Abbildung erzeugen. Der Fehler entsteht durch die Verwendung einfach herzustellender sphärischer Linsen. Er kann vollständig vermieden werden, wenn asphärische Komponenten eingesetzt werden. Eine Linse, die keinerlei sphärische Aberration erzeugt, d.h. sämtliche achsenparallele Strahlen in F' brechen, hat eine durch ein Polynom 4. Grades beschriebene Oberfläche, die nur schwer zu fertigen ist. [Hec14, 416ff.], [FLS11, Vol. 1, 27-2ff.]

Astigmatismus tritt bei Objektpunkten auf, die nicht auf der optischen Achse liegen. Diese Erscheinung basiert darauf, dass sich die Geometrie der schräg auf das optische System einfallenden Strahlen in zwei senkrecht aufeinander stehende Ebenen aufteilen lässt, die unterschiedliche Brennweiten besitzen. Die Meridionalebene ist als die Ebene definiert, die sowohl den Hauptstrahl als auch die optische Achse enthält. Die Sagittalebene ist demzufolge die Ebene, die den Hauptstrahl enthält und senkrecht auf der

Meridionalebene steht. Ein mit dem Astigmatismus behaftetes optisches System besitzt keine einzelnen Brennpunkt, sondern zwei senkrecht zueinander stehende Brennlinien. [Hec14, 428ff.]

Koma bezeichnet einen Abbildungsfehler der bei der Abbildung von Objektpunkten, die sich nicht auf der optischen Achse befinden, zu einem zum Außenrand der Optik gerichteten „Schweif“ führt. Sie resultiert daraus, dass die Hauptebenen eines optischen Systems nur in achsennaher Umgebung ebene Flächen sind. Dadurch unterscheiden sich die Äquivalentbrennweiten und Transversalvergrößerungen für Strahlen, die die außeraxiale Bereiche einer Linse durchlaufen. [Hec14, 423ff.]

Bildfeldwölbung (auch petzval'sche Bildfeldwölbung) bezeichnet die Erscheinung, dass sich bei endlich großen Blendenöffnungen eine gekrümmte, stigmatische Bildfläche ausbildet. Die Abbildung wird also nicht, wie beispielsweise bei der sphärischen Aberration, so diffus, dass eine genaue Fokussierung unmöglich ist, sondern sie wird scharf auf eine gekrümmte Fläche projiziert. [Hec14, 432ff.]

Verzeichnung ist ein monochromatischer Abbildungsfehler, der Auftritt, wenn die Transversalvergrößerung M_T eine Funktion des außeraxialen Abstandes y' des Bildes ist. Dadurch unterscheidet sich y' von dem durch die Theorie achsnaher Strahlen, in der M_T als konstant angenommen wird, vorhergesagten Abstand. Die Verzeichnung lässt sich gut an Gittern zeigen, die durch den Fehler tonnen- bzw. kissenförmig abgebildet werden. [Hec14, 435ff.]

Chromatische Aberration beschreibt einen Abbildungsfehler, der nur in polychromatischem Licht sichtbar wird. Da der Brechungsindex einer Linse eine Funktion der Wellenlänge ist, werden die Komponenten unterschiedlicher Wellenlänge unterschiedlich stark gebrochen. Dadurch ergeben sich verschiedene Brennweiten für die einzelnen Komponenten, was zu Farbsäumen und Unschärfen an den Kanten der Abbildung führt. [Hec14, 438ff.]

Ziel des Praktikums war, diese Fehler zu erzeugen, zu dokumentieren und nach Möglichkeit zu korrigieren.

2 Versuchsaufbau

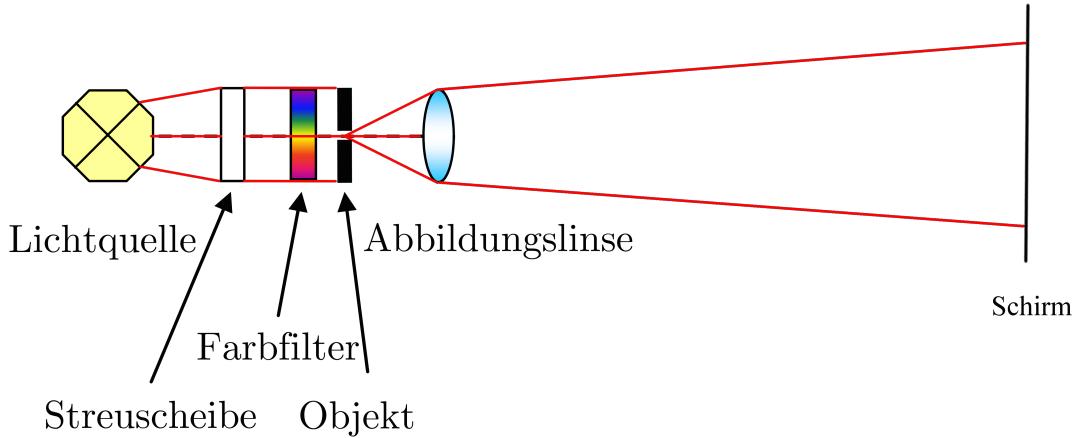


Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau wurde mithilfe des Mikro-Bank-Systems Linos realisiert. Der lineare Aufbau bestand aus einer Lichtquelle (Weißlicht), einer Streuscheibe, einem Farbfilter, einem Objekt und einer zu untersuchenden Linse.

Das Licht der Quelle wurde zuerst in der Streuscheibe gebrochen, um diffuses Licht zu erhalten. Der darauf folgende Farbfilter war einstellbar: Es war sowohl möglich das Licht ungefiltert passieren zu lassen, als auch einen roten, blauen oder grünen Filter anzuwenden. Direkt hinter dem Filter war das Beobachtungsobjekt angebracht. Hierfür eigneten sich beispielsweise ein Siemensstern, eine Skala oder ein grobes Gitter. Hinter dem Objekt wurden Linsen auf das Mikro-Bank-System gesteckt. Diese Linsen zeigten jeweils einen der zu untersuchenden Abbildungsfehler besonders deutlich. Um diesen Fehler sichtbar zu machen, wurde der Fokus über die Position der Linsen eingestellt.

Die Abbildungen wurden auf einen weißen Papierschirm projiziert, was gegenüber der Verwendung eines CCD-Sensors den Vorteil bot, dass die Abbildungsfehler mit den Augen beobachtet werden konnten. Somit wurde das Auswählen der für den gewünschten Fehler geeigneten Linse und das Fokussieren vereinfacht.

Nachdem eine für das Protokoll geeignete Abbildung auf dem Schirm realisiert werden konnte, wurde dieser mit einer Spiegelreflexkamera fotografiert. Hierbei war ein manueller Fokus und Weißabgleich zu benutzen.

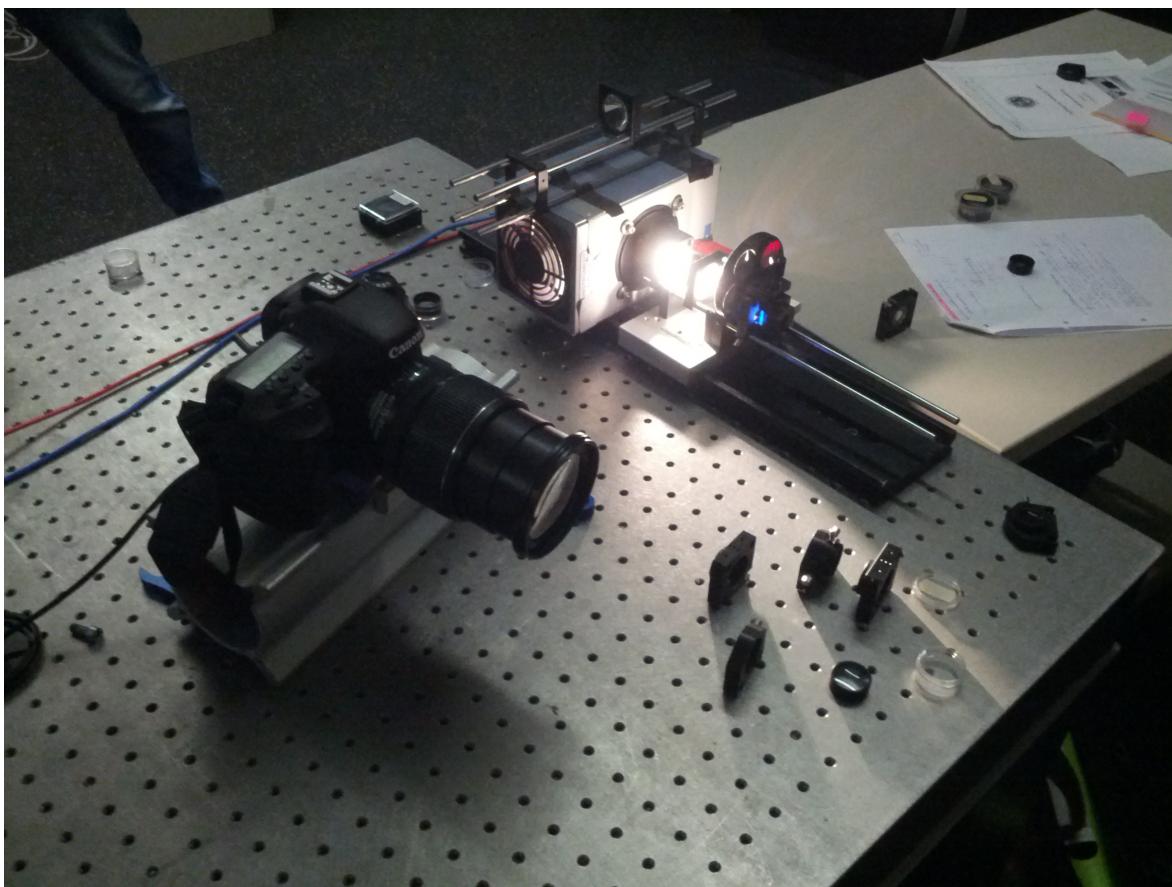


Abbildung 2: Der Versuchsaufbau

3 Durchführung und Auswertung

3.1 Sphärische Aberration

Da sich die sphärische Aberration in allgemeiner Unschärfe des Bildes zeigt, wurde auf eine separate Abbildung verzichtet. Ihre Auswirkung ist jedoch auf den meisten Abbildungen zu erkennen; insbesondere äußert sie sich als Koma in Kombination mit dem Astigmatismus.

3.2 Koma

Zur Erzeugung der Koma wurde eine handelsübliche Linse mit einer Brennweite von 60 mm in schräger Befestigung verwendet. Das Objekt war ein Pinhole mit variablem Abstand zur optischen Achse. An den Abb. 3 und 4 wird deutlich, dass die Koma mit dem Abstand zur optischen Achse zunimmt.

Da die Koma als Kombination von sphärischer Aberration und Astigmatismus angesehen werden kann, kann sie durch Abblenden der Randstrahlen kompensiert werden. Dies wurde bei Abb. 5 erreicht.



Abbildung 3: Starkes Koma am Außenrand der Linse

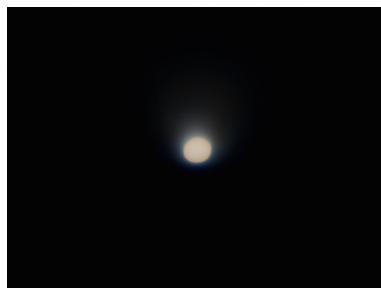


Abbildung 4: Schwaches Koma nahe der optischen Achse

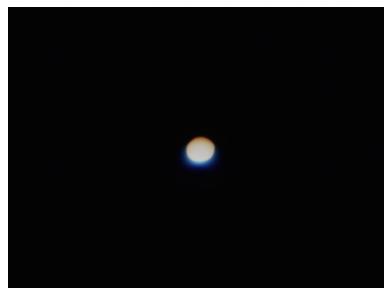


Abbildung 5: Abbildung mit Korrektur der Koma

3.3 Astigmatismus

Der Nachweis des Astigmatismus erfolgte durch eine Linse, die sowohl gerade achsennormal (Abb. 6) als auch schräg zur optischen Achse (Abb. 7 bis 9) befestigt wurde. Als Objekt diente ein Pinhole auf der optischen Achse.

Durch den so erreichten schrägen Einfall der Strahlenbündel werden diese abhängig von ihrer Zugehörigkeit zur Meridional- bzw. Sagittalebene in unterschiedlichen Brennweiten fokussiert, die separat abgebildet werden können. Bei Platzierung der Bildebene zwischen den Brennweiten ergibt sich eine Superposition der Einzelbrennpunkte (Abb. 9).



Abbildung 6: Abbildung ohne Astigmatismus



Abbildung 7: Abbildung der Meridionalebene



Abbildung 8: Abbildung der Sagittalebene

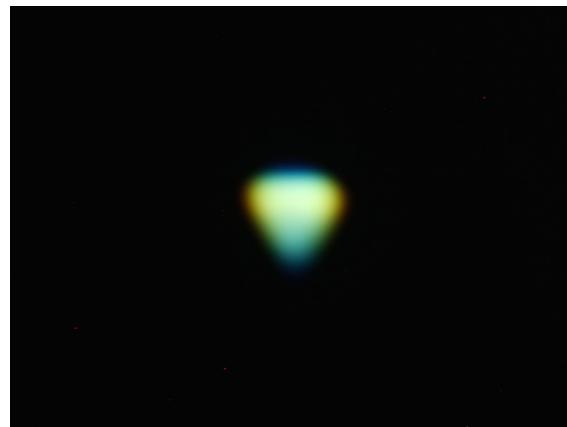


Abbildung 9: Fokus zwischen meridionaler und sagittaler Abbildung

3.4 Bildfeldwölbung

Um die Bildfeldwölbung zu veranschaulichen, wurde ein Raster durch einen 60 mm-Achromaten abgebildet. Anhand des in Abb. 10 und 11 verwendeten planaren Schirms wird deutlich, dass die Schärfebereiche jeweils konzentrische Kreise sind, da die fokussierte Abbildung auf einer Kugeloberfläche erfolgt (die Schnittkurve von Kugel und Ebene ist ein Kreis).

In Abb. 12 wurde manuell eine Korrekturmöglichkeit in Form eines vertikal gekrümmten Schirms (Zylindermantelfläche) nachgebildet. Es ist zu erkennen, dass das Bild dadurch in vertikaler Richtung scharf bleibt, in horizontaler jedoch nicht.

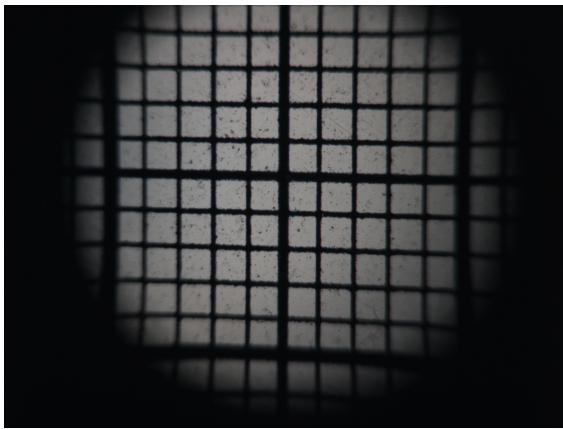


Abbildung 10: Unschärfe am Außenrand des Gitters

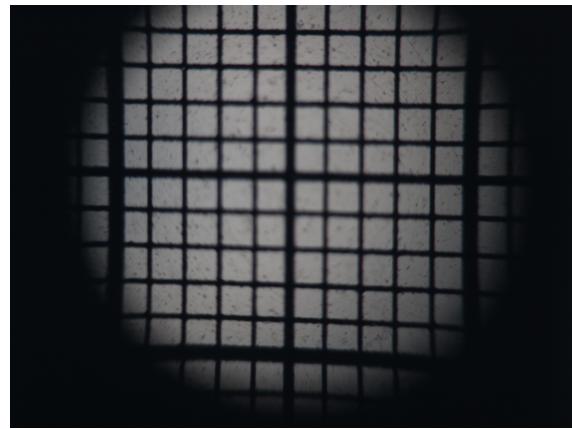


Abbildung 11: Unschärfe in der Mitte des Gitters

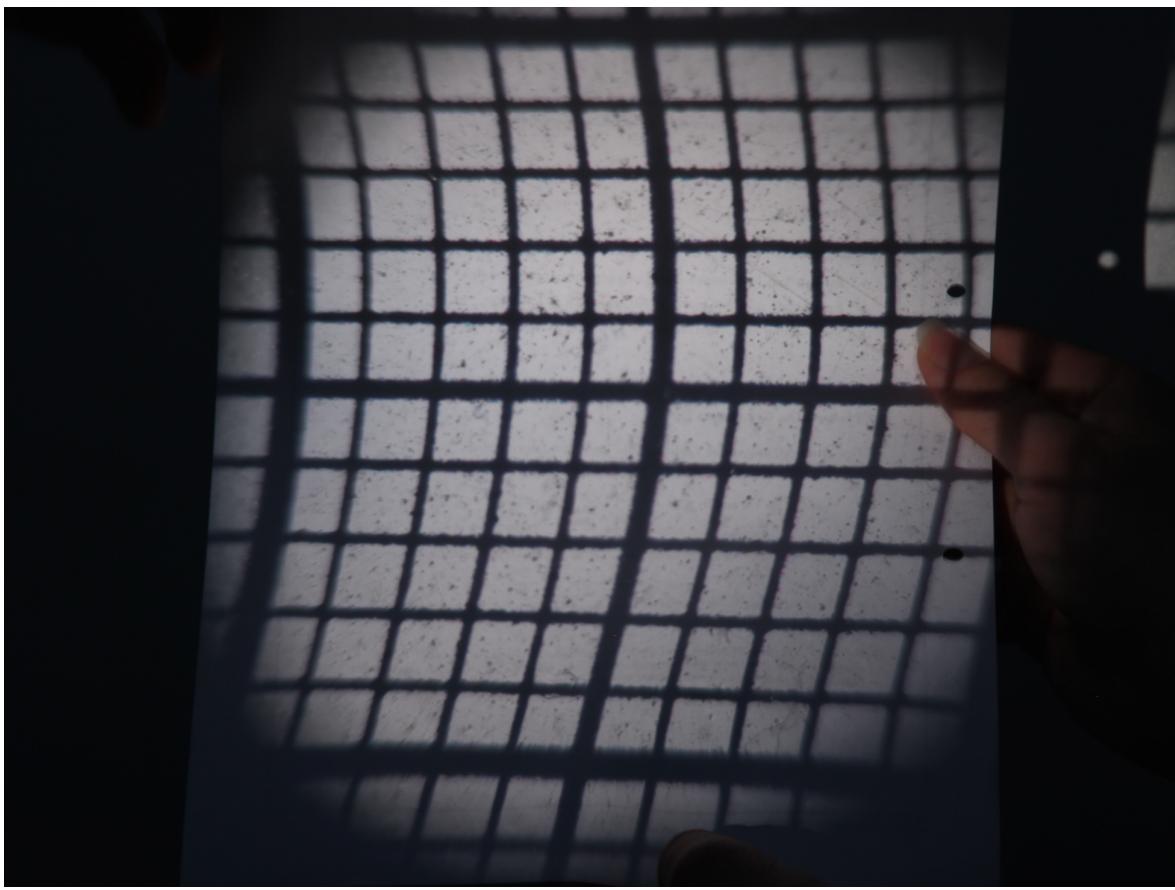


Abbildung 12: Korrektur der Bildfeldwölbung durch gekrümmten Projektionsschirm

3.5 Verzeichnung

Die Verzeichnung, zu erkennen an der Kissenförmigen Verzerrung des Gitters in Abbildung 13, wurde durch das Einsetzen einer 25 mm-Linse in den Versuchsaufbau hervorgerufen.

Die Korrektur der Verzeichnung erfolgte durch Einsetzen eines 40 mm-Achromaten. Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, wurden die Verzerrungen nahezu vollständig ausgelöscht.



Abbildung 13: Am Rand des Gitters erkennbare Krümmung



Abbildung 14: Korrektur der Verzeichnung

3.6 Chromatische Aberration

Zur Demonstration der chromatischen Aberration wurden eine gewöhnliche 60 mm-Linse und ein Achromat gleicher Brennweite eingesetzt. Als Objekt diente wiederum das Raster. Mittels eines Farbilters wurden jeweils die kurzwelligeren Strahlen der blauen Anteile fokussiert. Anschließend folgte durch Umschalten des Farbfilters bei unveränderter Anordnung der optischen Elemente ein Vergleich mit den Strahlen des grünen bzw. roten Lichts.

Es ist, insbesondere an der Verschmutzung des Rasters, zu erkennen, dass bei Verwendung der gewöhnlichen Linse die Schärfe mit zunehmender spektraler Entfernung der fokussierten Wellenlänge abnimmt (Abb. 15 bis 17). Das rote Licht ist gegenüber dem blauen deutlich defokussiert. Beim Achromaten ist das nicht der Fall (Abb. 18 bis 20).

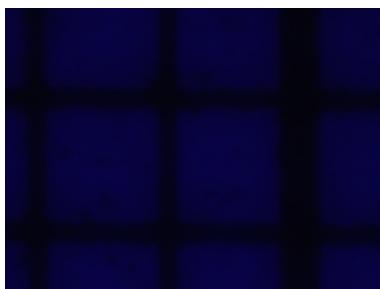


Abbildung 15: Fokussierte Abbildung der blauen Wellenlängen (gewöhnliche Linse)



Abbildung 16: Leicht defokussierte Abbildung der grünen Wellenlängen (gewöhnliche Linse)

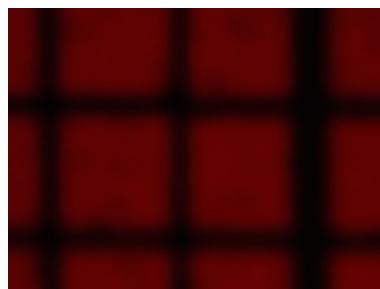


Abbildung 17: Defokussierte Abbildung der roten Wellenlängen (gewöhnliche Linse)



Abbildung 18: Fokussierte Abbildung der blauen Wellenlängen (Achromat)

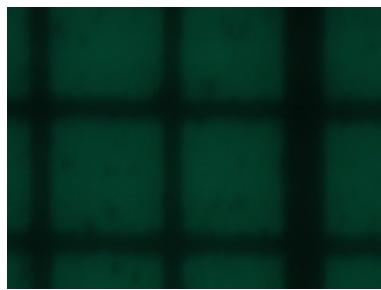


Abbildung 19: Fokussierte Abbildung der grünen Wellenlängen (Achromat)



Abbildung 20: Fokussierte Abbildung der roten Wellenlängen (Achromat)

Literatur

- [FLS11] R.P. Feynman, R.B. Leighton und M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics: The New Millennium Edition*. Basic Books. Perseus Books Group, 2011. ISBN: 9780465023820. URL: <https://books.google.de/books?id=kz-51AEACAAJ>.
- [Hec14] E. Hecht. *Optik*. De Gruyter Studium. Oldenbourg Wissensch.Vlg, 2014. ISBN: 9783110347968. URL: <https://books.google.de/books?id=X3W8oAEACAAJ>.