

Aufgaben 9 Mehrlinen- und Mehrspiegelsysteme Mehrspiegelsysteme, Abbildungsfehler

Lernziele

- sich aus dem Studium eines schriftlichen Dokumentes neue Kenntnisse und Fähigkeiten erarbeiten können.
- einen bekannten oder neuen Sachverhalt analysieren und beurteilen können.
- eine neue Problemstellung selbstständig bearbeiten und in einer Gruppe diskutieren können.
- die Bildentstehung bei einem System aus Planspiegeln und einem System aus sphärischen Spiegeln kennen und verstehen.
- die Abbildungsgleichung für sphärische Spiegel zur Berechnung von Bildweiten bei einem System aus sphärischen Spiegeln anwenden können.
- die Abbildungsfehler Chromatische Aberration, Sphärische Aberration, Koma und Astigmatismus kennen und verstehen.
- Methoden zur Korrektur von Abbildungsfehlern kennen und verstehen.

Aufgaben

Mehrspiegelsysteme

- 9.1 Analog zur Bildentstehung für ein System aus zwei dünnen sphärischen Linsen (vgl. Aufgaben 8) kann auch ein System aus zwei sphärischen Spiegeln Bilder erzeugen.

Skizzieren Sie (analog zur Aufgabe 8.2) die Bildentstehung/-konstruktion für ein System aus zwei sphärischen Spiegeln.

Nehmen Sie an, dass sich der Gegenstand zwischen den beiden Spiegeln befindet. Konstruieren Sie zuerst das Bild des Gegenstandes an einem der beiden Spiegel. Betrachten Sie dieses Zwischenbild als Gegenstand für die Bildentstehung am anderen Spiegel. Konstruieren Sie dann das Bild am anderen Spiegel.

Betrachten Sie jeweils alle möglichen Fälle für die Vorzeichen der Bildweite b_1 , der Gegenstandsweite g_2 und der Bildweite $b_2 =: b$.

- a) 2 Hohlspiegel
- b) 2 Wölbspiegel
- c) Hohlspiegel – Wölbspiegel
- d) Wölbspiegel – Hohlspiegel

Hinweis:

- Weitere mögliche Bilder (Zwischenbild am zweiten Spiegel, Bilder durch mehrfache Reflexion an den Spiegeln) sollen hier nicht betrachtet werden.

- 9.2 Betrachten Sie ein System aus zwei sphärischen Hohlspiegeln im Abstand 12.0 cm mit Brennweiten 12.0 cm und 6.0 cm. Vor dem ersten Spiegel befindet sich ein Gegenstand mit Gegenstandsweite 4.0 cm.

- a) Konstruieren Sie das Bild, welches das System vom Gegenstand erzeugt.
- b) Berechnen Sie die Bildweite des erzeugten Bildes.

Hinweise:

- Beachten Sie die Analogie zwischen einem sphärischen Hohlspiegel und einer dünnen sphärischen Sammellinse.
- Diese Aufgabe ist daher analog zur Aufgabe 8.7.

- 9.3 (siehe nächste Seite)

9.3 Betrachten Sie ein System aus einem sphärischen Hohlspiegel und einem sphärischen Wölbspiegel im Abstand 13.0 cm mit Brennweiten 6.0 cm und -11.0 cm. Vor dem ersten Spiegel befindet sich ein Gegenstand mit Gegenstandsweite 9.0 cm.

- a) Konstruieren Sie das Bild, welches das System vom Gegenstand erzeugt.
- b) Berechnen Sie die Bildweite des erzeugten Bildes.

Hinweise:

- Beachten Sie die Analogie zwischen einem sphärischen Hohl- bzw. Wölbspiegel und einer dünnen sphärischen Sammell- bzw. Zerstreuungslinse.
- Diese Aufgabe ist daher analog zur Aufgabe 8.8.

9.4 Der Berner Liedermacher Mani Matter (*1936, †1972) beschreibt in seinem Lied „[Bim Coiffeur](#)“ (1:25), wie er als Kunde beim Coiffeur auf dem Sessel sitzt. Er schaut in den Spiegel vor sich. Im Spiegel sieht er nicht nur sich, sondern auch den Spiegel hinter sich und darin wiederum den Spiegel vor sich usw.. Gleichzeitig sieht er auch unzählige Spiegelbilder von sich selbst, alle aufgereiht wie in einem unendlich langen Korridor.

Erklären Sie die Bildentstehung für einen Gegenstand, der sich zwischen zwei Planspiegeln befindet. Konstruieren Sie einige der Bilder, die durch Mehrfachreflexion an den beiden Spiegeln entstehen.

Abbildungsfehler

9.5 Studieren Sie im Lehrbuch Tipler/Mosca den folgenden Abschnitt:
- 29.3 Abbildungsfehler (Seiten 1083 und 1084)

9.6 Studieren Sie die folgenden Ausschnitte aus den Abschnitten „Linsenfehler“ und „Asphärische Linsen“ aus dem Lehrbuch Demtröder (Demtröder, Experimentalphysik 2, Seiten 277 bis 286, ISBN 978-3-642-29943-8):

9.5.6 Linsenfehler

Die bisherigen Überlegungen und die daraus hergeleiteten Formeln sind Näherungen, die für achsennahe Strahlen gelten (paraxiale Näherung).

Für Strahlen, deren Abstand von der Achse nicht mehr klein genug ist oder welche die Linse asymmetrisch zur Achse durchlaufen, treten Abbildungsfehler auf, die dazu führen, dass Strahlen, die von einem Punkte ausgehen, nicht mehr in einen Punkt, sondern nur noch in die Umgebung des Bildpunktes abgebildet werden. Dies führt zu einer Unschärfe des Bildes, aber in vielen Fällen auch zu einer Verzerrung, die im Allgemeinen für die verschiedenen Bereiche des Bildes unterschiedlich groß ist. Für alle Anwendungen, bei denen besonders kleine Strukturen abgebildet werden sollen, müssen alle Linsenfehler möglichst klein gehalten werden. Beispiele sind die lithographische Herstellung von integrierten elektronischen Schaltungen, bei denen eine räumliche Auflösung von etwa 100 nm verlangt wird, oder die Abbildung von Details im Inneren biologischer Zellen. Deshalb werden große Anstrengungen gemacht, um Abbildungssysteme mit minimalen Abbildungsfehlern zu realisieren. Wir wollen die wichtigsten Abbildungsfehler von Linsen und Maßnahmen zu ihrer Korrektur kurz behandeln [9.3, 9.6].

9.5.6.1 Chromatische Aberration

Da die Brechzahl $n(\lambda)$ des Linsenmaterials von der Wellenlänge λ des Lichtes abhängt, ist nach (9.25) die Brennweite $f(\lambda)$ der Linse für die verschiedenen Farben unterschiedlich groß. Für Glas z.B. nimmt n im sichtbaren Bereich von rot nach blau zu (normale Dispersion, siehe Abschn. 8.2), sodass beim Einstrahlen eines parallelen Bündels von weißem Licht (das alle Farben enthält) der Brennpunkt $F(\lambda_b)$ der blauen Komponente vor dem Brennpunkt $F(\lambda_r)$ der roten Komponente liegt (Abb. 9.36). Man kann dies demonstrieren, indem man konzentrische Kreisringe, die in eine schwarz beschichtete Platte geritzt sind, mit einer Kohlenbogenlampe beleuchtet und mit einer Linse auf einen Schirm abbildet. Je nach Stellung des Schirms in der Position 1 oder 2 sieht

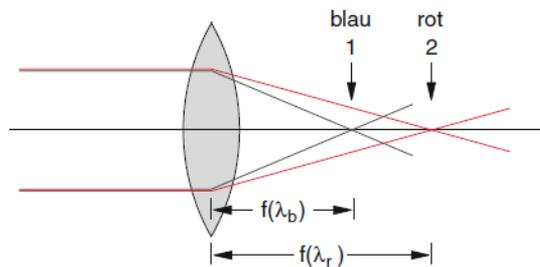


Abbildung 9.36 Chromatische Aberration

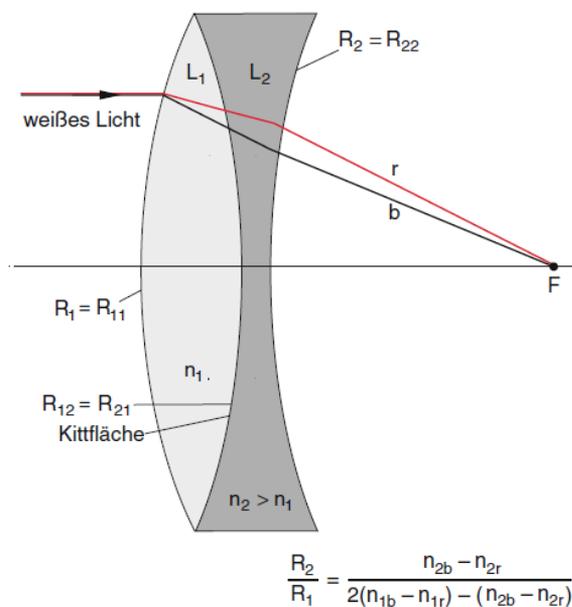


Abbildung 9.37 Verkitteter Achromat

man blaue Ringe mit roten Rändern bzw. rote Ringe mit blauen Rändern.

Man kann die chromatische Aberration wenigstens teilweise verringern durch ein System aus zwei Linsen mit verschiedenen Brechzahlen $n_1(\lambda)$ und $n_2(\lambda)$. Ein solcher *Achromat* (Abb. 9.37) besteht aus einer bikonvexen Sammellinse L_1 mit Brechzahl n_1 und einer Zerstreuungslinse L_2 mit Brechzahl n_2 , die miteinander verkittet sind.

(...)

9.5.6.2 Sphärische Aberration

Auch für monochromatisches Licht treten bei der Lin- senabbildung Abweichungen von der Punkt-zu-Punkt- Abbildung auf. So hängt z. B. die Brennweite einer Linse mit sphärischen Grenzflächen vom Abstand der Strahlen von der Achse ab (Abb. 9.39). Diese *sphärische Aber- ration*, die wir in Abschn. 9.3 bereits beim Hohlspiegel diskutiert haben, wird sowohl bei dünnen als auch bei di- cken Linsen beobachtet.

(...)

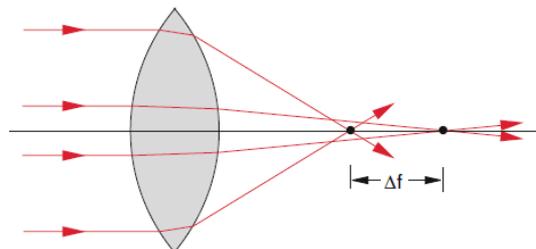


Abbildung 9.39 Sphärische Aberration bei der Abbildung durch eine sphärische Bikonvexlinse

(...)

Die etwas längere Rechnung ergibt für eine dünne Linse mit Radien R_1 und R_2 [9.7] für die Abweichung

$$\Delta_s = \frac{1}{f(h)} - \frac{1}{f(h=0)}$$

der reziproken Brennweiten $f(h)$ für achsenparallele Strahlen im Abstand h von der Achse und $f_0 = f(h=0)$ für paraxiale Strahlen:

$$\Delta_s = \frac{h^2}{8f_0^3 n (n-1)^2} [n^3 + (3n+2)(n-1)^2 p^2 + 4(n^2-1)pq + (n+2)q^2] \quad (9.38)$$

mit $q = (R_1 + R_2)/(R_2 - R_1)$ und

$$p = \frac{b-a}{b+a}$$

wobei a und b Gegenstandsweite bzw. Bildweite sind.

Man erhält ein Minimum der sphärischen Aberration für

$$q = -\frac{2(n^2-1)p}{n+2}. \quad (9.39)$$

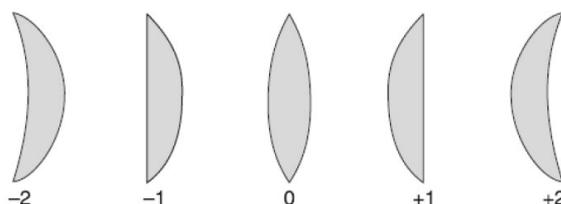


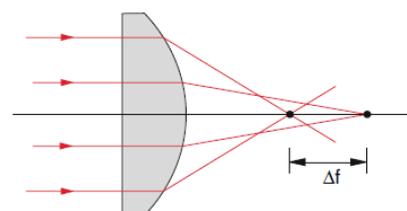
Abbildung 9.41 Werte von $q = (R_1 + R_2)/(R_1 - R_2)$ für einige Lin- senformen

In Abb. 9.41 sind die Werte von q für einige Linsenformen angegeben. Man sieht, dass z. B. für die Abbildung eines weit entfernten Gegenstandes ($a = \infty \rightarrow p = -1$) durch eine plankonvexe Linse aus Glas mit $n = 1,5$ mit der gekrümmten Fläche zum Gegenstand Gl. (9.39) einen optimalen Wert $q = 0,7$ ergibt, was nahe an dem Wert $q = 1$ der Linse liegt, sodass damit eine Minimierung der sphärischen Aberration möglich ist.

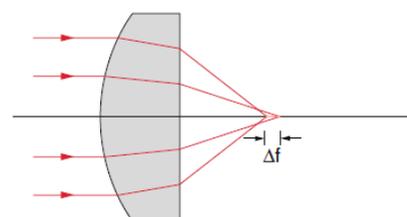
Es gibt bei vorgegebener Brechzahl n eine günstigste Linsenform, für die Δ_s minimal wird. So ist es z. B. besser, bei Abbildung eines Parallellichtbündels durch eine plan-konvexe Linse die gekrümmte Fläche zur Gegenstandsseite hin zu orientieren (Abb. 9.42), weil dann die achsenfernen Strahlen die Linse bei Winkeln nahe dem Minimum der Ablenkung (siehe Abschn. 9.4) durchlaufen. Ganz allgemein gilt für eine Abbildung mit Gegenstandsweite a und Bildweite b : Um minimale sphärische Aberration zu erreichen, muss die gekrümmte Fläche dem Strahlenbündel mit dem kleineren Öffnungswinkel zugekehrt sein, d. h. für $a > b$ muss die gekrümmte Fläche auf der Gegenstandsseite, die plane Fläche auf der Bildseite liegen. Für große Bildweiten hat eine bikonvexe Linse mit $R_1 \neq R_2$ bei der die stärker gekrümmte Fläche dem Gegenstand zugewandt ist, die geringste sphärische Aberration.

Man kann die sphärische Aberration verringern,

- wenn man durch eine Blende die achsenfernen Strahlen unterdrückt. Dabei verliert man natürlich an Intensität;
- durch Verwenden einer Plan-Konvex-Linse, wobei die konvexe Seite dem parallel einfallenden Lichtbündel zugewandt ist (Abb. 9.42);
- durch Kombination verschiedener Sammel- und Zerstreuungslinsen zu einem sphärisch korrigierten Linsensystem;
- durch speziell optimierte, nichtsphärische Linsen, die zwar sehr schwer zu schleifen sind, was aber mit heutiger Technologie beherrschbar ist. Wesentlich einfacher herzustellen sind asphärische Linsen aus gepresstem durchsichtigen Kunststoff (z. B. Acrylglas), die für viele Zwecke ausreichende Oberflächenqualität haben [9.8].



a)



b)

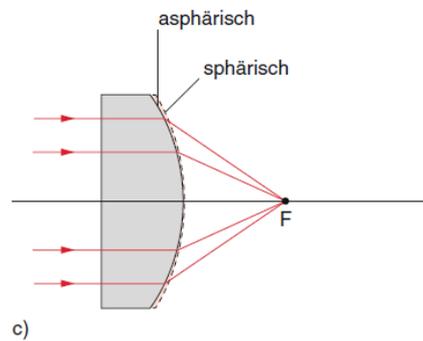


Abbildung 9.42 Unterschiedliche sphärische Aberration bei den zwei verschiedenen Orientierungen einer plan-konvexen Linse. **c** Sphärische Korrektur durch eine asphärische Linienfläche

9.5.6.3 Koma

Bei der in Abschn. 9.5.6.2 behandelten sphärischen Aberration war das auf die Linse einfallende Lichtbündel symmetrisch zur Symmetrieachse der Linse. Läuft hingegen ein paralleles Lichtbündel durch eine schief stehende Linse (Abb. 9.43a), so hängen die Brechwinkel der einzelnen Strahlen nicht mehr nur vom Abstand h von der Achse ab, sondern sie unterscheiden sich auch bei gleichem Betrag $|h|$ für Strahlen oberhalb bzw. unterhalb des Mittenstrahls. Die Fokalfpunkte der einzelnen Teilbündel (definiert als die Schnittpunkte benachbarter Teilstrahlen) liegen nicht mehr auf dem Mittenstrahl, der hier als x -Achse gewählt ist.

Bei der Abbildung eines Punktes A schneiden sich die Strahlen der verschiedenen Teilbündel in Punkten, die in verschiedenen Ebenen $x = x_{B_i}$ liegen und die auch unterschiedliche Abstände von der x -Achse haben (Abb. 9.43b). Das Bild von A , das wegen der sphärischen Aberration ein Kreis in der Ebene $x = x_B$ wäre, wenn A

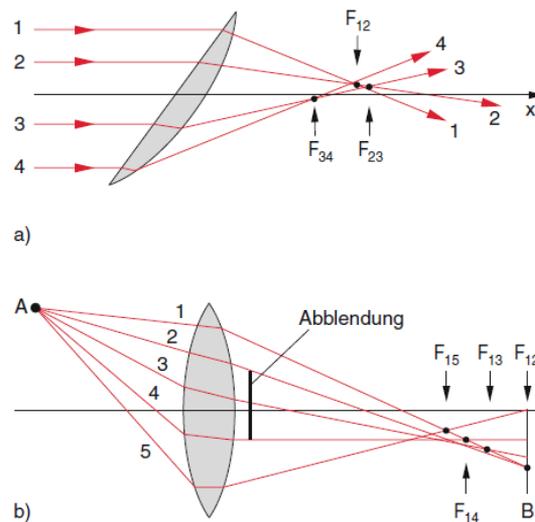


Abbildung 9.43 **a** Koma beim Durchlaufen eines Parallellichtbündels durch eine schiefe Linse. Die einzelnen Teilbündel führen zu räumlich verschiedenen Brennpunkten F_i . **b** Bei der Abbildung eines Punktes A außerhalb der Symmetrieachse führen die verschiedenen Teilbündel zu unterschiedlichen Bildpunkten B_i

auf der x -Achse läge, wird jetzt eine ungleichmäßig beleuchtete komplizierte Fläche, deren Form von der Lage der Bildebene B abhängt.

Der Effekt wird besonders deutlich, wenn man den Mittelteil der Linse abdeckt, sodass nur Strahlen durch die äußeren Ränder der Linse zur Abbildung beitragen. Man erhält dann in der Bildebene B statt eines Bildpunktes bei fehlerfreier Abbildung eine verwaschene Bildkurve, deren Form vom Abstand x_B der Bildebene von der Linse abhängt. In Abb. 9.44 sind zur Illustration solche Bildkurven gezeigt, die man bei der Position 3 der Bildebene in Abb. 9.43b ohne und mit Abdeckung der zentralen Linsenfläche erhält. Man nennt diese Bildverzerrung Koma (vom griechischen $\kappa\acute{o}\mu\eta$ = Haar).

9.5.6.4 Astigmatismus

Die Abbildung von Gegenstandspunkten A weit entfernt von der Achse, die in der photographischen Praxis häufig notwendig ist, führt noch zu einer weiteren Verzerrung des Bildes eines Gegenstandes, dem Astigmatismus. Wir wollen ihn hier kurz erläutern, weil er auch bei der Abbildung durch unser Auge häufig auftritt. Dazu betrachten wir in Abb. 9.45a eine horizontale und eine vertikale Schnittebene durch ein schräges Lichtbündel, das von einem Punkt A außerhalb der Symmetrieachse der Linse ausgeht und von der Linse in den Bildraum abgebildet wird. Alle Strahlen in der horizontalen Schnittebene (*Sagittalebene* AS_1S_2) werden innerhalb eines eng be-

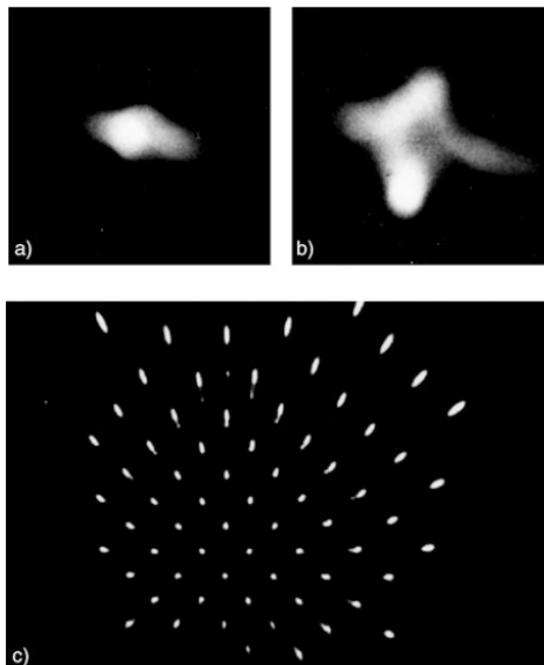


Abbildung 9.44 Durch Koma verzerrte Abbildungen des Punktes A aufgenommen mit der Anordnung in Abb. 9.43b. **a** Ohne Abdeckung der Linse; **b** bei Abdeckung des zentralen Teils der Linsenfläche; **c** durch Koma verzerrte Abbildung eines gleichmäßig gelochten Bleches

grenzten Lichtbündels in einen Bildpunkt B_S mit der Bildweite b_S abgebildet. Die Strahlen in der senkrechten Schnittebene (*Meridionalebene* AM_1M_2) werden hingegen in einen anderen Bildpunkt B_M in der Bildweite $b_M < b_S$ abgebildet, weil z. B. die Strahlen AM_1 wegen des größeren Einfallswinkels auf die brechende Linsenfläche stärker gebrochen werden als die Strahlen AS_1 .

Man erhält daher durch die Abbildung aller Teilstrahlen des gesamten Lichtbündels durch die Linse statt eines Bildpunktes B eine horizontale Bildlinie B_M in der Ebene $x = b_M$ und eine vertikale Bildlinie B_S bei $x = b_S > b_M$ (*astigmatische Verzerrung*). Zur Illustration ist in Abb. 9.45b der Lichtbündelquerschnitt in verschiedenen Abständen x der Bildebene dargestellt.

(Hinweis: In der Abb. 9.45a sind die Punkte B_M und B falsch beschriftet: B sollte B_M sein und umgekehrt.)

Der Abstand $\Delta x = b_S - b_M$ (*astigmatische Differenz*) wird umso größer, je schief der Lichtbündel die Linse durchläuft.

Eine solche astigmatische Verzerrung tritt nicht nur bei Linsen auf, sondern auch, wenn ein Lichtbündel schräg durch eine planparallele Platte läuft. Wird z. B. in den Strahlengang bei der Abbildung eines Achsenpunktes A durch eine Linse eine schräge planparallele Glasplatte gestellt (Abb. 9.46), so ist das Bild von A kein Punkt mehr, sondern je nach dem Abstand x_B der Bildebene ein vertikaler oder horizontaler Strich bei $x = x_M$ bzw. $x = x_S$ oder

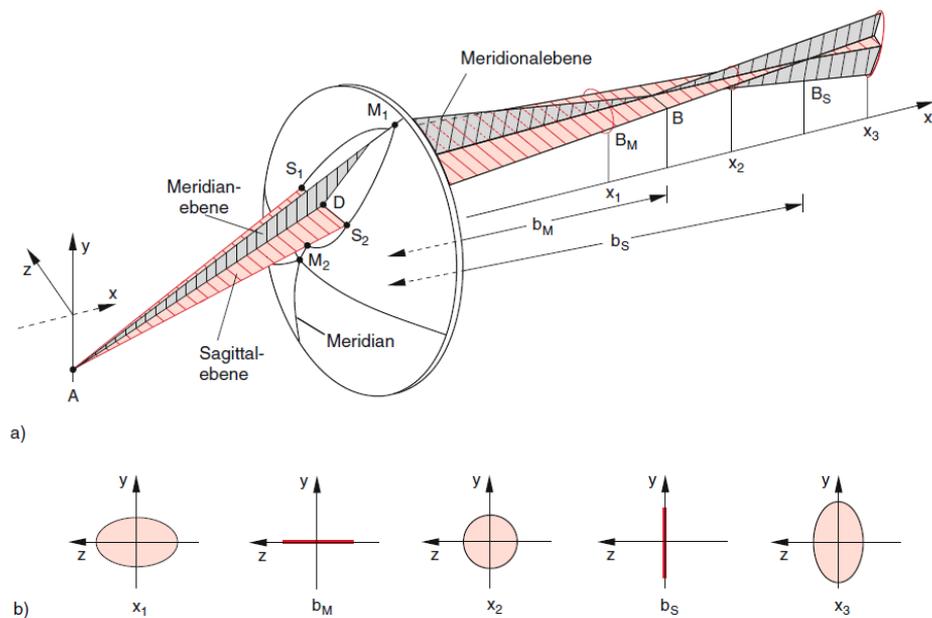


Abbildung 9.45 Astigmatismus bei der Abbildung eines schrägen Lichtbündels. **a** Perspektivische Ansicht; **b** Lichtbündelquerschnitt in den Ebenen im Abstand x_1, b_M, x_2, b_S, x_3

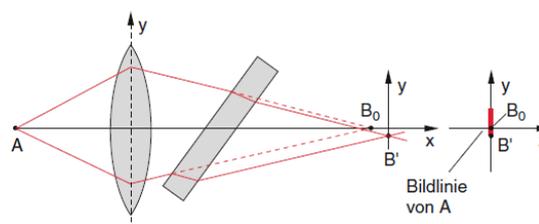


Abbildung 9.46 Astigmatismus beim schrägen Durchgang eines Lichtbündels durch eine planparallele Platte. Ohne Platte läge das Bild von A in B_0 . Die Strahlen in einer horizontalen Schnittfläche des Lichtbündels schneiden sich in B'

eine elliptische Fläche bei anderen Abständen, wie in Abb. 9.45b gezeigt.

Besonders ausgeprägt sind astigmatische Verzerrungen bei der Abbildung durch eine Zylinderlinse (Abb. 9.47), die nur in einer Richtung fokussiert, d. h. alle Strahlen von einem Punkt A , die in einer Ebene senkrecht zur Zylinderachse (rote Ebene) verlaufen, werden in einem Punkt B in dieser Ebene abgebildet. Alle Strahlen von A in einer Ebene parallel zur Zylinderachse formen einen *virtuellen* Bildpunkt B' .

Insgesamt bildet die Zylinderlinse daher den Punkt A in einem Strich parallel zur Zylinderachse ab.

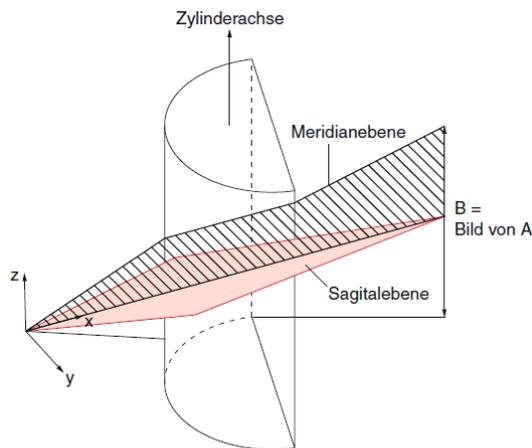


Abbildung 9.47 Astigmatische Abbildung durch eine Zylinderlinse

Zur Korrektur des Astigmatismus kann man Zylinderlinsen mit sphärischen Linsen kombinieren. Dies kann z. B. dadurch realisiert werden, dass eine sphärische Linse zusätzlich eine zylindrische Krümmung erhält, was bei Brillen zur Korrektur astigmatischer Augenfehler benutzt wird.

(...)

9.5.8 Asphärische Linsen

Man kann viele der oben diskutierten Linsenfehler durch die Verwendung asphärischer (= nichtsphärischer) Linsen vermeiden (siehe Abb. 9.54). Das Problem war lange Zeit, dass es kein Schleifverfahren gab, um asphärische Oberflächen genügend hoher Qualität (Rauigkeit $< \lambda/10$) herzustellen. Durch die Entwicklung hochpräziser Diamantschneidewerkzeuge lassen sich inzwischen aber rotationssymmetrische asphärische Oberflächen auf einer computergesteuerten Drehbank nach einem Computerprogramm, das die Form der Oberfläche bestimmt, mit genügend guter Qualität realisieren. Eine andere Methode benutzt Polymere als Linsenmaterial, das geschmolzen werden kann und in vorgegebene Formen gepresst wird. Dieses Material (z. B. Plexiglas) lässt sich wegen seiner geringeren Härte auch leichter bearbeiten.

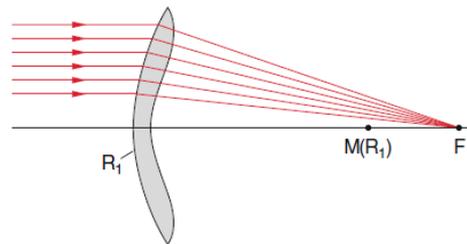


Abbildung 9.54 Asphärische Linse zur Vermeidung der sphärischen Aberration. Man vergleiche mit Abb. 9.39

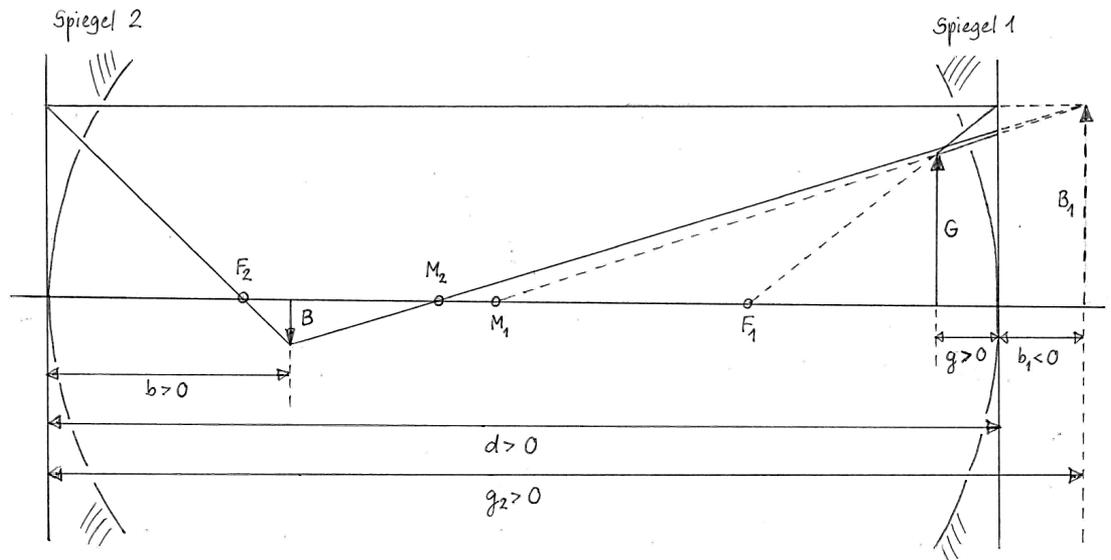
- 9.7 Studieren Sie das folgende **YouTube-Video**:
- [Astigmatismus, Koma und sphärische Aberration einer optischen Abbildung](#) (9:38)
- 9.8 Mit einer dünnen sphärischen Sammellinse soll von einem Gegenstand ein reelles Bild erzeugt werden. Der Gegenstand soll sich vor der Linse, das reelle Bild hinter der Linse befinden.
Die Linse soll so dimensioniert werden, dass die sphärische Aberration minimiert wird.
Bekannt seien die Gegenstandsweite g ($g > 0$), die Lateralvergrößerung V ($V < 0$, verkehrtes Bild) und die Brechzahl n ($n > 1$) des Linsenmaterials.
- a) Bestimmen Sie die Bildweite b (ausgedrückt durch g und V).
- b) Bestimmen Sie die Brennweite f der Linse (ausgedrückt durch g und V).
- Hinweise:
- Verwenden Sie die Abbildungsgleichung für dünne sphärische Linsen.
- Verwenden Sie das Ergebnis aus a).
- c) Bestimmen Sie die Grösse q (Formel 9.39 im Text Demtröder, siehe Aufgabe 9.6), so dass die sphärische Aberration minimiert wird (ausgedrückt durch g , V und n).
- Hinweis:
- Verwenden Sie das Ergebnis aus a).
- d) Bestimmen Sie die Krümmungsradien r_1 und r_2 der Linse (ausgedrückt durch g , V und n).
- Hinweise:
- Verwenden Sie die Linsenmachergleichung für dünne sphärische Linsen.
- Verwenden Sie die Ergebnisse aus b) und c).
- e) Wählen Sie Zahlenwerte für g , V und n .
Berechnen Sie damit die numerischen Resultate von a) bis d).
- 9.9 Bearbeiten Sie im Arbeitsbuch Mills zu Tipler/Mosca die folgende Aufgabe:
29.24
- 9.10 (siehe nächste Seite)

9.10 Beurteilen Sie, ob die folgenden Aussagen wahr oder falsch sind.
Kreuzen Sie das entsprechende Kästchen an.

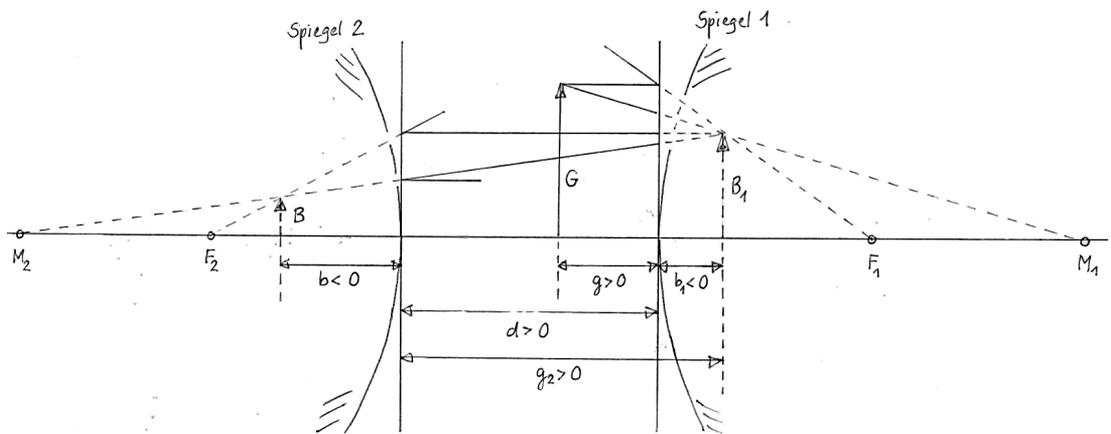
	wahr	falsch
a) Die bei einer Linse auftretende sphärische Aberration könnte vermieden werden, wenn statt der Linse ein Spiegel verwendet würde.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) Die bei einer Linse auftretende chromatische Aberration könnte vermieden werden, wenn statt der Linse ein Spiegel verwendet würde.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c) Abbildungsfehler von Linsen werden in praktischen Anwendungen häufig durch den Einsatz von Linsensystemen minimiert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d) Die Abbildungsfehler bei sphärischen Linsen sind darin begründet, dass es praktisch nicht möglich ist, eine Linse mit idealen sphärischen Oberflächen zu fertigen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e) Bei einer bikonvexen Sammellinse tritt Astigmatismus genau dann auf, wenn der Krümmungsradius der Oberflächen nicht über die ganze Oberfläche konstant ist.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Lösungen

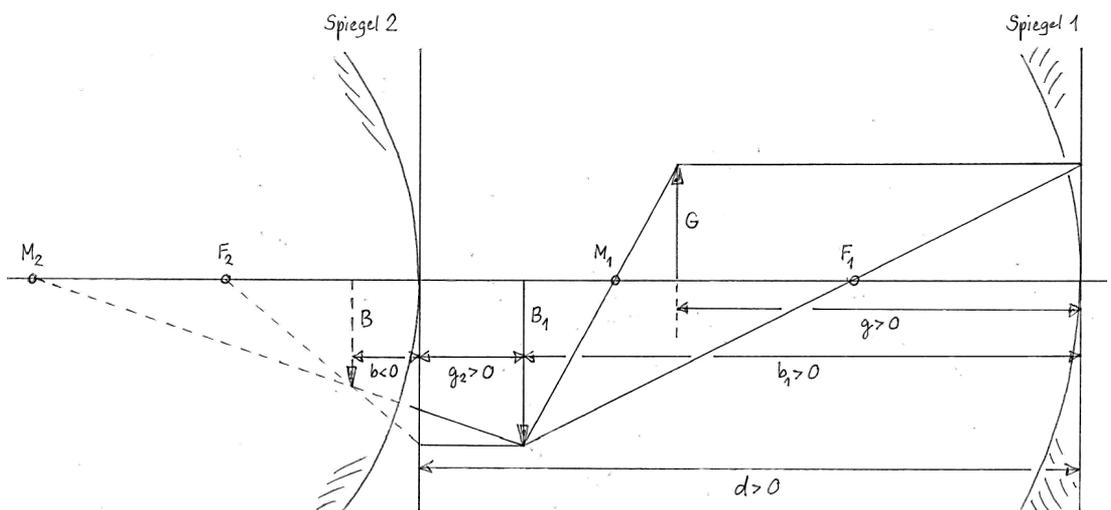
9.1 a) Beispiel für $b_1 < 0, g_2 > 0, b_2 =: b > 0$:



b) Beispiel für $b_1 < 0, g_2 > 0, b_2 =: b < 0$:



c) Beispiel für $b_1 > 0, g_2 > 0, b_2 =: b < 0$:



d) ...

- 9.2 a) ...
 b) Wegen der Analogie zwischen einem sphärischen Hohlspiegel und einer dünnen sphärischen Sammellinse ergeben sich die gleichen Gleichungen und die gleiche Lösung wie in der Aufgabe 8.7:
 $b = 9.0 \text{ cm}$
- 9.3 a) ...
 b) Wegen der Analogie zwischen einem sphärischen Hohl- bzw. Wölbspiegel und einer dünnen sphärischen Sammel- bzw. Zerstreuungslinse ergeben sich die gleichen Gleichungen und die gleiche Lösung wie in der Aufgabe 8.8:
 $b = 9.2 \text{ cm}$
- 9.4 ...
- 9.5 ...
- 9.6 ...
- 9.7 ...
- 9.8 a) $V = -\frac{b}{g}$

 $\Rightarrow b = -V \cdot g$
- b) $\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$
 $b = -V \cdot g$ (aus a))

 $\Rightarrow f = \frac{V}{V-1} g$
- c) $q = -\frac{2(n^2-1)p}{n+2}$ (Formel 9.39 im Text Demtröder, siehe Aufgabe 9.6)
 $p = \frac{b-g}{b+g}$ (Text Demtröder, siehe Aufgabe 9.6)
 $b = -V \cdot g$ (aus a))

 $\Rightarrow q = \frac{2(n^2-1)}{n+2} \frac{1+V}{1-V}$
- d) $\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$
 $f = \frac{V}{V-1} g$ (aus b))
 $q = \frac{r_1+r_2}{r_2-r_1}$ (Text Demtröder, siehe Aufgabe 9.6)
 $q = \frac{2(n^2-1)}{n+2} \frac{1+V}{1-V}$ (aus c))

 $\Rightarrow r_1 = \frac{2(n-1)}{q+1} \frac{V}{V-1} g$ mit $q = \frac{2(n^2-1)}{n+2} \frac{1+V}{1-V}$
 $r_2 = \frac{2(n-1)}{q-1} \frac{V}{V-1} g$ mit $q = \frac{2(n^2-1)}{n+2} \frac{1+V}{1-V}$
- e) ...
- 9.9 ...

- 9.10 a) falsch
b) wahr
c) wahr
d) falsch
e) falsch