

Optik für Astro-Amateure [Fortsetzung]

Autor(en): **Wiedemann, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **13 (1968)**

Heft 108

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-899993>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Optik für Astro-Amateure

VON E. WIEDEMANN, Riehen
2. Mitteilung (Fortsetzung)¹⁾

C) Die chromatischen Fehler auf und in der Nähe der Achse

Bei der Besprechung der chromatischen Fehler können wir uns auf Linsensysteme, in der Hauptsache also auf Fernrohrojektive und Okulare, beschränken, da reine Spiegelsysteme farbfehlerfrei sind. Daneben verdienen aber auch die Farbfehler von Spiegellinsensystemen, die man auch katadioptrische Systeme nennt, Beachtung. Wir werden sehen, dass bei den Fernrohrojektiven die Beseitigung beider Farbfehler wesentlich ist, bei den Okularen besonders der zweite von ihnen (der Farbvergrößerungsfehler). Bei katadioptrischen Systemen sind entweder die Farbfehler so klein, dass ihnen keine besondere Bedeutung zukommt (SCHMIDT-Systeme und kleinere Ausführungen von MAKSUTOV-Systemen) oder aber sie verlangen dieselbe Beachtung wie bei Fernrohrojektiven (Mirotar-Systeme von Zeiss u. a.).

Der berühmte Versuch von I. NEWTON hat gelehrt, dass weisses Licht, das auf ein Prisma fällt, in seine Farben zerlegt wird. Da man sich Linsen durch Schnitte in Prismen zerlegt denken kann, gilt dasselbe auch für Linsen, und zwar liegt der Brennpunkt für langwelliges (rotes) Licht weiter von der Linse fort als der Brennpunkt für kurzwelliges (blaues) Licht. Bei Zerstreuungslinsen ist es umgekehrt. Leider ist durch die unrichtige Annahme von NEWTON, dass die Farbzerstreuung oder Dispersion der Lichtbrechung proportional sei, die Entwicklung der Linsenoptik für mehr als 100 Jahre aufgehalten worden, weil daraus die Unmöglichkeit der Achromatisierung unmittelbar folgen würde.

Seit mehr als 100 Jahren weiss man aber, dass Lichtbrechung und Farbzerstreuung nur in einem losen Zusammenhang stehen, derart, dass mit einer stärkeren Brechung im allgemeinen eine stärkere Zerstreuung einhergeht. Eine Proportionalität besteht aber nicht, und zudem kann die Zerstreuung bei gleichem Brechwert für eine bestimmte Lichtwellenlänge in verschiedenen Spektralbezirken sehr verschieden sein. Wenn heute optische Gläser verfügbar sind, die bei annähernd gleichem Brechungsindex für eine Farbe sehr verschiedene Dispersionen zeigen, oder umgekehrt bei annähernd gleichen Dispersionen im Brechwert für eine Farbe sehr verschieden sind, so ist dies im wesentlichen den Arbeiten von E. ABBE und O. SCHOTT und ihren Nachfolgern zu verdanken, die die Chemie des optischen Glases durch Schmelzflüsse sehr verschiedener Zusammensetzung und unter Einbezug seltener Erden auf den hohen heutigen Stand gebracht haben.

Einem neueren Katalog über optische Gläser sei entnommen, dass der Brechungsindex für die gelbe d-Linie des Spektrums (587.6 nm) von 1.44 (Fluor-

kron) bis 1.95 (Schwerflint), und die Farbzerstreuung von 81.5 bis 20.4, also im Verhältnis 1:4, variieren können. Die letztgenannten Zahlen sind die sogenannten ν_d -Werte nach ABBE

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C},$$

worin n_d der Brechungsindex für die gelbe d-Linie des Spektrums (587.6 nm) und analog n_F und n_C die Brechungsindices für die blaue F-Linie (486.1 nm) bzw. die rote C-Linie (656.3 nm) sind. Die ν -Werte, die sich natürlich auch für die anderen Wellenbereiche aufstellen lassen, sind ein direktes Mass für die Farbzerstreuung oder die Dispersion der optischen Gläser.

Auf eine von H. G. ZIMMER³⁾ neuerdings in Vorschlag gebrachte und für gewisse Rechnungen vorteilhaftere Definition der Dispersion soll in diesem Zusammenhang nur hingewiesen werden.

Der Bereich der Brechwerte und Dispersionen wird durch die Hinzunahme weiterer durchsichtiger und isotroper Stoffe, wie: Flussspat, Quarz, Saphir usw. nochmals vergrössert. Von diesen wird Quarz wegen seiner Durchlässigkeit für ultraviolettes und infrarotes Licht für die Linsen von Sternphotometern u. ä. Zwecke *optisch* verwendet. Als *Bauelement* dient er seines sehr kleinen Ausdehnungskoeffizienten wegen zur Herstellung von Spiegeln, wo ihm allerdings in thermisch bis zur beginnenden Entglasung nachbehandeltem Glas ein ernstlicher Konkurrent erwachsen ist (Ceral).

Um die auf Grund der beschriebenen Verhältnisse mögliche *Beseitigung der Farbfehler bei Linsensystemen* zu erläutern, sei ein Beispiel gegeben. Wir nehmen an, wir hätten zwei Gläser des gleichen Brechungsindex für die gelbe d-Linie des Spektrums zur Verfügung, die sich aber in der Dispersion, also in der ABBESchen Zahl ν , im Verhältnis 1:2 unterscheiden. Wir nehmen weiter an, dass wir aus dem Glas mit der kleineren Dispersion eine Sammellinse und aus jenem mit der grösseren Dispersion eine Zerstreuungslinse herstellen. Dann werden für die Kombination dieser Linsen, wenn wir sie zunächst als unendlich dünn und zusammenfallend annehmen, die Farbfehler kompensiert (beseitigt) sein, wenn die Zerstreuungslinse die halbe Brechkraft (oder die doppelte Brennweite) der Sammellinse besitzt. Wir erhalten also in diesem Fall eine sammelnde achromatische Kombination mit der doppelten Brennweite der positiven Einzellinse.

Gehen wir nun zur Realität der Linsen von endlicher Dicke und mit endlichem Abstand über, so werden Schnitt- und Brennweite verschieden, und nach dem Vorstehenden wissen wir, dass dann eine Achromatisierung der Schnitt- und der Brennweite erforderlich wird, um die chromatische Längsaberration und die chromatische Vergrößerungsdifferenz zu beseitigen. Während die chromatische Längsaberration durch eine geeignete Bemessung der Brechkraft und damit der Dispersion leicht zu beheben ist, erfordert die Beseitigung der chromatischen Vergrößerungsdifferenz eine besondere Verteilung der Scheitelabstände der brechenden Flächen.

Besonders wichtig ist die Beseitigung der chromatischen Vergrößerungsdifferenz bei Okularen, da bei grösseren Bildwinkeln die sonst auftretenden, radial gerichteten Farbsäume sehr stören.

Haben wir in unserem Beispiel eines sammelnden Systems die Achromatisierung der Schnitt- und Brennweite erreicht, so wird dies streng nur für zwei (beliebig wählbare) Farben gelten, da der Dispersionsverlauf der Gläser etwas verschieden sein

wird. Für visuelle Zwecke pflegt man die Schnitt- und Brennweiten der Wellenlängen C (656,3 nm) im Rot und F (486,1 nm) im Blau zusammenzulegen. Für die übrigen Farben des Spektrums bleiben dann noch Rest- oder Zonenfehler übrig, die aber mit modernen Gläsern so klein gehalten werden können, dass sie nur bei langen Brennweiten stören können. Eine derartige Farbkorrektur zeigt die nachfolgende Fig. 7.

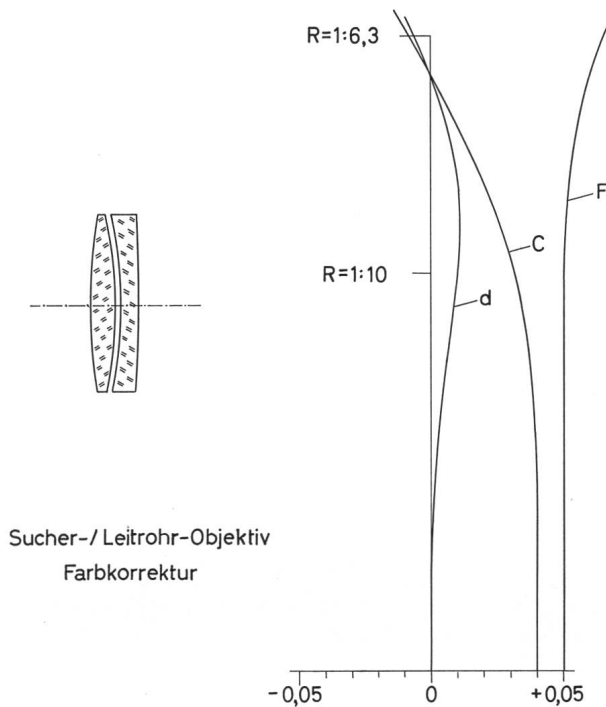


Fig. 7

Farbkorrektur eines zweilinsigen Fernrohrobjektives $R = 1:6,3$. Aus einer Berechnung des Verfassers.

Da die Restfehler eines optischen Systems proportional mit dessen Brennweite anwachsen, wobei die Farbrechfehler als die grössten Fehler zuerst störend werden, genügt die dargestellte Farbkorrektur für Brennweiten von mehr als 1,5 Metern nicht mehr. Astronomische Objektive längerer Brennweite, die einer noch besseren Farbkorrektur bedürfen, werden deshalb unter Verwendung von Gläsern mit anormalem Dispersionsverlauf dreilinsig ausgeführt (Zeiss B- und F-Objektive). Auf diese Weise lassen sich die chromatischen Zonenfehler verkleinern, und in besonderen Fällen können dann die Schnitt- und Brennweiten für drei Farben zusammengelegt werden. Eine grössere Zentrierempfindlichkeit der Linsen und eine geringere relative Öffnung müssen dabei in Kauf genommen werden.

Die Entwicklung ist aber auf diesem Gebiet noch nicht abgeschlossen. Sie wird sowohl von den Fortschritten auf dem Gebiet der optischen Gläser als auch von der rechnerischen Seite her gefördert. In diesem Zusammenhang sei nur auf die mit dem neuen optischen Glas FKS 01 eröffneten Möglichkeiten⁴⁾, sowie auf die Arbeiten von M. HERZBERGER⁵⁾ und H. SCHULZ⁶⁾ hingewiesen, die Superachromate mit fast völlig zonenfreier Korrektur erwarten lassen.

Wir gehen nun zu den ausserachsialen Abbildungsfehlern über und beginnen mit dem Astigmatismus und der Bildfeldwölbung.

D) Der Astigmatismus und die Bildfeldwölbung

Astigmatismus heisst wörtlich Punktlosigkeit und besagt somit, dass beim Vorhandensein von Astigmatismus keine punktförmige Abbildung zustande kommt. Da eine brechende oder reflektierende Fläche ein Kugelabschnitt ist, so kann man sich – wie bei einem Globus – durch diesen Abschnitt einen Meridianschnitt und auch einen Äquatorialschnitt vorstellen. Fällt nun auf unseren Kugelabschnitt ein Strahlenbündel schräg auf, so besteht in den beiden Schnitten (im Gegensatz zu einem achsenparallel einfallenden Bündel) keine Symmetrie mehr: Die Strahlen im Meridianschnitt verlaufen anders als im Äquatorialschnitt, das schräg einfallende Bündel wird «zerspalten» oder, wie man zu sagen pflegt, astigmatisch deformiert. Dies sei an der nachfolgenden Fig. 8 weiter erläutert.

Das von links her geneigt einfallende Strahlenbündel ist in bezug auf die (hier als brechend und sammelnd) angenommene Fläche durch zwei Hauptschnitte ausgezeichnet, nämlich den Meridian- oder Tangentialschnitt, der in Fig. 8 mit der Zeichenebene zusammenfällt, und in den Äquatorial- oder Sagittalschnitt, der darauf senkrecht steht und in der Fig. 8 in der z-Achse liegt. Während im Sagittalschnitt Symmetrie herrscht, besteht diese im Meridianschnitt nicht mehr. Dementsprechend ist die Störung des weiteren Strahlenverlaufs im Meridianschnitt grösser als im Sagittalschnitt. Die Strahlen, die dem Meridianschnitt angehören, vereinigen sich früher als jene des Sagittalschnittes, und man erhält anstelle eines Bildpunktes eine Aufspaltung in zwei hintereinander liegende Bild«linien», zwischen denen der kleinstmögliche Zerstreuungskreis liegt.

Es ist deshalb unmöglich, mit einer astigmatischen Optik ein ausserhalb der optischen Achse befindliches Kreuz scharf abzubilden. Man erhält entweder die senkrechten oder die waagrechteten Arme scharf. Dreht man das Kreuz um 45° , so wird keiner der Arme scharf, da sie dann nicht mehr in die Hauptschnitte fallen.

Der Astigmatismus ist bei Linsen- und Spiegelflächen von der gleichen Grössenordnung. Er ist in beiden Fällen verknüpft mit der Bildfeldwölbung, weshalb diese hier zusammen mit dem Astigmatismus behandelt wird. Die beiden astigmatischen Bildlinien weichen nämlich mit zunehmendem Bildwinkel immer mehr von der durch den GAUSS'schen Bildpunkt bestimmten achsensenkrechten Bildebene ab: Sie liegen auf zwei verschiedenen gewölbten Schalen, der meridionalen und der sagittalen Bildfeldschale, die nur im GAUSS'schen Bildpunkt auf der Systemachse einen gemeinsamen Berührungspunkt haben. Bei unkorrigierten sammelnden Systemen ist die Krümmung der meridionalen Bildfeldschale stärker als jene der sagittalen Bildfeldschale. Selbstverständlich verschlechtert die Bildfeldwölbung die astigmatische Abbildung weiter, wenn die Bildebene eine zur optischen Achse senkrechte Fläche ist.

Für die Behandlung und Korrektur dieser äusserst störenden Bildfeldfehler ist es von grosser Bedeu-

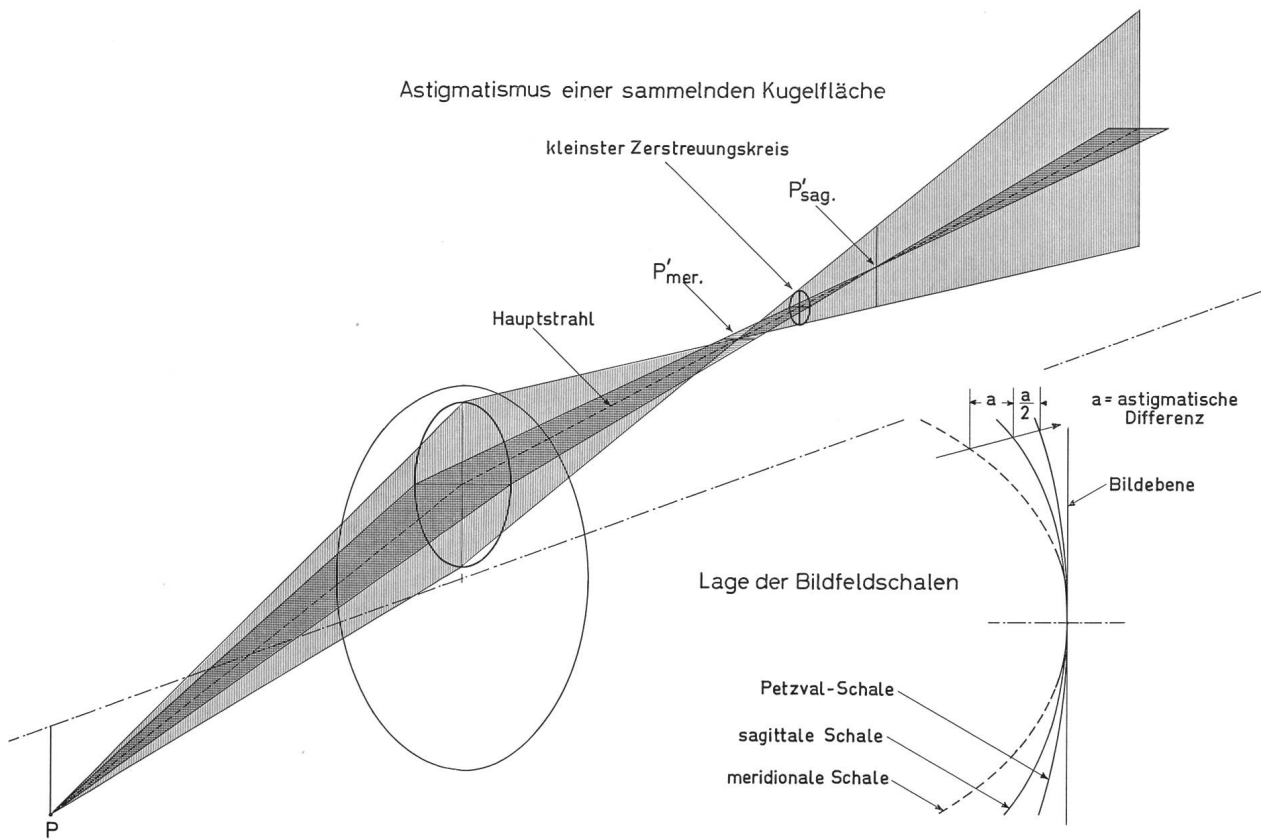


Fig. 8

Darstellung der astigmatischen Aufspaltung eines schräg zur Systemachse einfallenden Strahlenbündels an einer Kugelfläche und graphische Darstellung der meridionalen (---) und äquatorialen (—) Abweichungen eines unkorrigierten sammelnden Linsen- oder Spiegelsystems.

nung, dass sich zu den beiden astigmatischen Bildfeldschalen nach J. PETZVAL (1840) eine dritte Schale sehr leicht (auch für Linsen beliebiger Dicke) berechnen lässt, die zu den beiden reellen Bildfeldschalen in einer einfachen Beziehung steht. Dies ist die sogenannte PETZVAL-Schale, die stets den halben Abstand der astigmatischen Differenz von der sagittalen Schale hat, wenn mit der ganzen astigmatischen Differenz der Abstand der beiden reellen Bildfeldschalen bezeichnet wird. Daraus folgt eine eindeutige Lage der dritten Schale, wenn zwei von ihnen bekannt sind. Man kann nun einerseits die PETZVALsche Summe, also den Scheitelradius der PETZVALschale, und andererseits den *Astigmatismus*, also die ganze astigmatische Differenz im Bereiche der 3. Ordnung, auf einfache Weise berechnen. Zusammen mit dem Vorstehenden folgt daraus, dass damit Krümmung und Lage der beiden reellen Bildfeldschalen im Bereiche der 3. Ordnung eindeutig bestimmbar sind. Man kann dann 4 prinzipielle Fälle unterscheiden:

- Sind PETZVALsumme und Astigmatismus positiv (unkorrigiertes sammelndes Linsensystem), so folgt auf die PETZVALschale im halben Abstand der astigmatischen Differenz die sagittale Schale, und auf diese im Abstand der ganzen astigmatischen Differenz die meridionale Schale in Richtung auf das optische System zu.
- Ist die PETZVALsumme positiv, der Astigmatismus aber negativ (häufigster Fall bei korrigierten sammelnden Linsensystemen, speziell bei Photoobjektiven), so wandert bei der

Korrektur des Astigmatismus die meridionale Schale etwa dreimal schneller als die sagittale Schale in negativer Richtung und überschneidet sie dabei. Dann tritt der Fall ein, dass auf die PETZVALschale in negativer Richtung und im halben Abstand der astigmatischen Differenz die sagittale Schale und auf diese, ebenfalls in negativer Richtung, im Abstand der ganzen astigmatischen Differenz die meridionale Schale folgt. Hierbei kann man es einrichten, dass beide reelle Bildfeldschalen relativ flach werden und in der Nähe der achsensenkrechten Bildebene liegen. Auf diese Weise erklärt sich das bis zu erheblichen Bildwinkeln scharf ausgezeichnete und achsensenkrechte Bild guter Photoanastigmaten.

Sind PETZVALsumme und Astigmatismus gleich Null, so fallen beide Bildfeldschalen mit der achsensenkrechten Bildebene zusammen, doch hat dieser Sonderfall im Hinblick auf die Bildfehler höherer Ordnung bei astronomischen Spezialkonstruktionen (BAKER-Systeme) Bedeutung.

- Ist die PETZVALschale negativ, der Astigmatismus aber positiv (Fall des sammelnden sphärischen Spiegels), so folgt auf die PETZVALschale in positiver Richtung und im Abstand der halben astigmatischen Differenz die sagittale Schale und auf diese in gleicher Richtung und im Abstand der ganzen astigmatischen Differenz die meridionale Schale. Auch in diesem Fall liegen die beiden reellen Bildfeldschalen relativ günstig und bestätigen einmal mehr die guten Eigenschaften des Kugelspiegels.
- Sind PETZVALschale und Astigmatismus negativ, so folgt auf die PETZVALschale in negativer Richtung und im halben Abstand der astigmatischen Differenz die sagittale Schale und auf diese in gleicher Richtung und im Abstand der ganzen astigmatischen Differenz die meridionale Schale.

Diese 4 möglichen Fälle sind in der nachfolgenden Fig. 9 dargestellt.

Der Astigmatismus und die Bildfeldwölbung können, wie auch die nachfolgend beschriebenen Koma- oder Asymmetriefehler, auf verschiedene Weise bis auf unmerkliche Zonenfehler beseitigt werden, wobei ihre Abhängigkeit von der Blendenlage mithilft: Entweder durch eine geeignete Kombination brechender Flächen in zweckmässigen Abständen, wie dies bei Photoobjektiven geschieht, oder dadurch, dass man für ausserachsiale Bündel die gleichen Verhältnisse wie für das achsiale Bündel herstellt, wie dies bei den SCHMIDT- und MAKSTOV-Systemen verwirklicht worden ist. Bei diesen ist allerdings die Bildfeldwölbung nicht beseitigt. Lediglich die noch komplizierteren BAKER-Systeme haben ein anastigmatisch geebnetes Bildfeld.

E) Die Komafehler oder Asymmetriefehler

Die vorstehenden Ausführungen über den Astigmatismus und die Bildfeldwölbung beziehen sich grundsätzlich auf den schräg einfallenden Hauptstrahl und seine nächste Umgebung, in Analogie zum Achsenstrahl und den ihn umgebenden GAUSS'schen fadenförmigen Raum. Vergrössert man die Öffnung des schrägen Büschels, so treten in Analogie zu den Verhältnissen beim achsialen Bündel sphärische Aberrationen und Vergrößerungsfehler der meridionalen und sagittalen Bündel auf, zu denen noch deren chromatische Variationen bei Linsensystemen hinzukommen. Die Mannigfaltigkeit dieser Fehler wird unter dem Begriff der Koma- oder Asymmetriefehler zusammengefasst.

Es wurde bereits erwähnt, dass mit der Beseitigung des achsialen Vergrößerungsfehlers bzw. der Erfüllung der Sinusbedingung die Koma bzw. die Asymmetriefehler zumindest für kleinere Neigungen der schräg einfallenden Bündel beseitigt werden; auch eine symmetrische oder hemisymmetrische Anordnung von Linsengruppen kann dies bewirken, wobei gleichzeitig auch die chromatische Vergrößerungsdifferenz oder der Farbquerfehler verschwindet. Eine weitere prinzipielle Möglichkeit zur Beseitigung der Koma oder der Asymmetriefehler, die besonders für die astronomischen Instrumente von Bedeutung ist, besteht in der Symmetrierung aller, auch der schräg einfallenden Bündel, durch eine Blende im Krümmungszentrum eines sphärischen Spiegels (SCHMIDT- und MAKSTOV-Systeme). Sind diese Möglichkeiten der Korrektur nicht oder nur begrenzt gegeben, so ist zur Behebung der sehr störenden Asymmetriefehler vor allem die Koma im engeren Sinne, nämlich die Strahlenvereinigung im Meridianschnitt durch strenge Erfüllung der Sinusbedingung zu berichtigen.

Bei der Koma im engeren Sinne, die anstelle eines Bildpunktes eine stark unsymmetrische Helligkeitsverteilung von kometenähnlichem Ansehen hervorruft und daher ihren Namen hat, sind zwei Erscheinungsformen möglich, die man als Aussenkoma und Innenkoma bezeichnet und die einer Unter- bzw. Überkorrektur der Abweichungen gegen die Sinusbedingung entsprechen.

F) Die Verzeichnung oder Distorsion

Eingangs dieses Artikels wurde darauf hingewiesen, dass bei der Lochkamera zufolge des geradlinigen Strahlenverlaufs vom Objekt zum Bild dieses dem Objekt in allen Teilen ähnlich, mithin auch verzeichnungsfrei ist. Bei optischen Systemen, bei denen

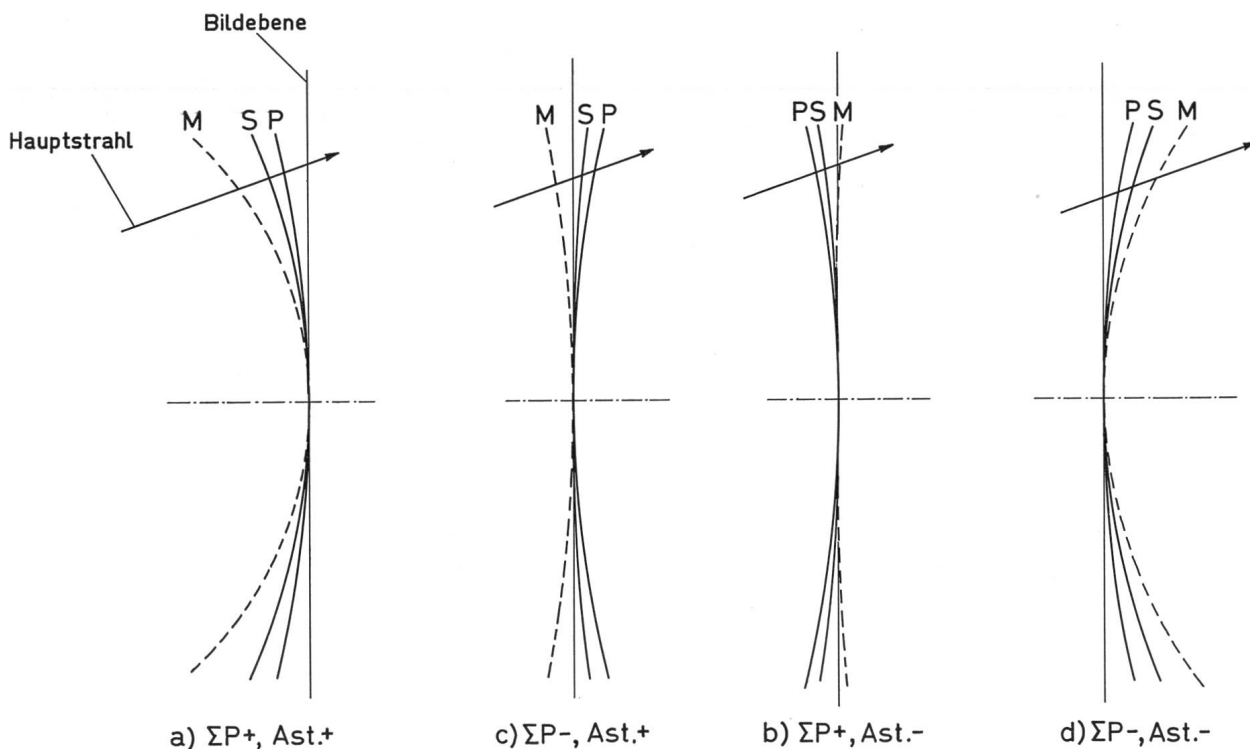
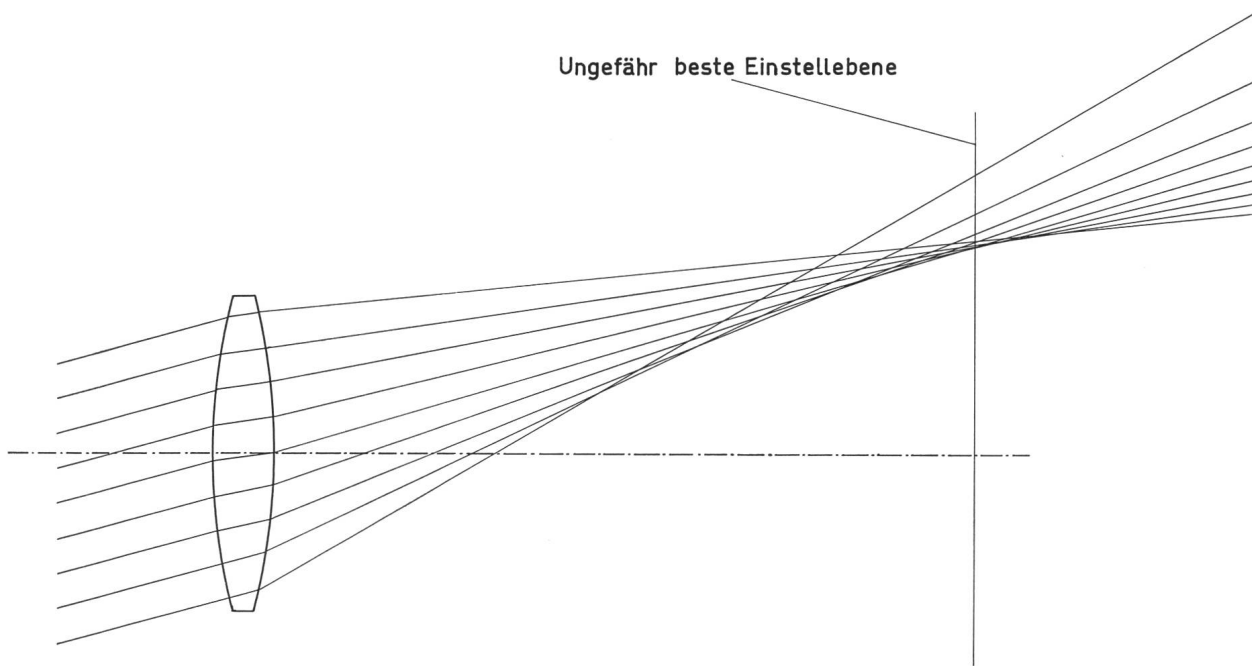


Fig. 9
Die 4 prinzipiell möglichen Lagen der Bildfeldschalen. Nach M. BEREK²⁾.



Aussenkoma einer einfachen Sammellinse (schematisch)

Fig. 10

Schematische Darstellung der Aussenkoma einer unkorrigierten Sammellinse. Nach H. HARTING⁷⁾.

Da nach der Bildfehlertheorie der 3. Ordnung, auf die bei späterer Gelegenheit eingegangen werden soll, die Komafehler im Sagittalschnitt, der Rinnenfehler und der Dreistrahlfehler, nur $\frac{1}{3}$ des Komafehlers im Meridianschnitt betragen, ist es verständlich, dass mit der Beseitigung des Komafehlers im Meridianschnitt auch der Komafehler im Sagittalschnitt verschwindet.

Brechungen und Reflexionen auftreten, fallen aber Eintrittspupille und Austrittspupille i. a. nicht mehr zusammen, und es ist dann nach R. H. BOW und TH. SUTTON zu fordern, dass der Reduktionsmassstab vom Objekt zum Bild für alle Einfallswinkel konstant bleibt, wenn Verzeichnungsfreiheit bestehen soll. Die mathematische Bedingung dafür lautet:

$$\frac{\operatorname{tg} \omega}{\operatorname{tg} \omega'} = m = \text{constans},$$

worin ω den Einfallswinkel, ω' den Austrittswinkel des geneigten Hauptstrahls und m den Reduktionsfaktor von Objekt zu Bild bedeuten. Nimmt dieser Faktor mit zunehmendem Winkel zu, so wird ein reguläres Viereck kissenförmig abgebildet, nimmt er mit zunehmendem Winkel ab, so besteht tonnenförmige Verzeichnung. Dieser Fehler, der als einziger durch Abblenden nicht vermindert werden kann, ist bei Linsensystemen durch symmetrische oder halb-symmetrische Anordnung von Linsengruppen zu beseitigen. Astronomische Objektive oder Spiegel von Kugelform sind im allgemeinen frei von Verzeichnung, haben aber dafür Bildfeldwölbung. Bei Zweispiegelsystemen, auch bei aplanatischen Formen, ist die Verzeichnung i. a. nicht völlig korrigiert, dafür ist aber die Bildfeldwölbung geringer. Für astronomische Zwecke ist natürlich nur verzeichnungsfreie Optik verwendbar.

Schlussbemerkung

In dieser Mitteilung sind die verschiedenen bei optischen Systemen auftretenden Bildfehler, soweit sie für den Astro-Amateur von Interesse sein können, behandelt worden. Hinweise für die besondere Eignung von Linsen- und Spiegelsystemen für bestimmte Zwecke wurden beigefügt. In weiteren Mitteilungen soll auf die Berechnungsgrundlagen der Optik und anschließend auf die einzelnen optischen Systeme, die für die Astronomie, insbesondere die Amateur-Astronomie, Bedeutung haben, eingegangen werden. Dabei soll auch die Entwicklung dieser Systeme, ihre Herstellung und ihre Prüfung Beachtung finden.

Literatur

- 1) E. WIEDEMANN, ORION 13 (1968) Nr. 106, 75–78, ORION 13 (1968) Nr. 107, 103–106.
- 2) M. BEREK: Grundlagen der praktischen Optik, Berlin und Leipzig 1930.
- 3) H. G. ZIMMER: Geometrische Optik, Berlin, Heidelberg, New York 1967.
- 4) E. WIEDEMANN, ORION 10 (1965) Nr. 92, 224.
- 5) M. HERZBERGER, Optica Acta b, 1959, S. 198 ff.
- 6) H. SCHULZ, Optik 25, 203 und 208 (1967).
- 7) H. HARTING: Die photographische Optik, Berlin 1925.

Der Verfasser möchte auch an dieser Stelle Herrn Dr. K. WIEDEMANN für die Ausarbeitung von Rechenprogrammen und der Direktion der SANDOZ AG für die Bewilligung der Benützung ihres Computers danken.

Adresse des Autors: Dr.-Ing. ERWIN J. TH. WIEDEMANN, Gartenstrasse 5, 4125 Riehen.