

Grundlagen der praktischen Optik

Analyse und Synthese optischer Systeme

Von

Dr. M. Berek

Honorarprofessor in der philosophischen Fakultät
der Universität Marburg

wissenschaftl. Mitarbeiter in den optischen Werken
E. Leitz, Wetzlar

**Nahezu unveränderter Nachdruck
der 1. Auflage 1930**

mit einem Nachwort von Prof. Dr. H. Marx, Wetzlar

Mit 58 Figuren im Text und auf einer Tafel



Walter de Gruyter & Co.

vormals G. J. Götschen'sche Verlagsbuchhandlung — J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung
Georg Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp.

Berlin 1970



Copyright 1930 und 1970 by Walter de Gruyter & Co.,
vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung,
J. Guttentag Verlagsbuchhandlung,
Georg Reimer, Karl J. Trübner, Veit & Comp., Berlin 30.
Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks,
der photomechanischen Wiedergabe,
der Herstellung von Mikrofilmen
und der Übersetzung vorbehalten. — Archiv-Nr. 5204701
Printed in Germany —
Satz und Druck: Walter de Gruyter & Co., Berlin 30
Einband U. Hanisch, Berlin-Zehlendorf

Vorwort.

Geometrische Optik ist, je nachdem wie man sie betreibt, angewandte Mathematik oder technische Physik. Lediglich der letztere Standpunkt ist für das vorliegende Büchlein als in Frage kommend gewählt worden; nicht als ob es der Zweck dieses Büchleins sein sollte, Konstrukteure optischer Systeme heranzubilden, sondern vielmehr aus der Überzeugung heraus, daß das Verständnis für die Wesenheiten der technisch realisierbaren abbildenden Systeme am besten an den Problemen der Praxis vermittelt und gefördert werden kann. Bei dem geringen Umfang kann das vorliegende Büchlein zwar vieles nicht enthalten, worüber die zahlreichen großen Lehr- und Handbücher auf diesem Wissensgebiet unterrichten; insonderheit ist alles, was lediglich »akademisches« Interesse bietet, übergangen. Aber andererseits sind trotz des geringen Buchumfanges gerade die praktisch wichtigen Probleme ausführlicher behandelt und tiefer verfolgt als in den bisher vorhandenen Werken. Maßgebend für gerade diese Verarbeitung des Stoffes wurde eine Anregung, die der Verfasser aus einer englischen Kritik entnommen hat, die sich auf die Übersetzung des bekannten Buches M. von Rohr, Die Bilderzeugung in optischen Instrumenten vom Standpunkt der geometrischen Optik, bezieht. »Das Buch über geometrische Optik muß erst noch geschrieben werden«, heißt es in dieser Kritik dem Sinne nach. Der Verfasser maßt sich nicht an, mit dem vorliegenden Büchlein jenen Wunsch erfüllt zu haben, sondern denkt sich die vorliegende Darstellung der geometrischen Optik als einen Versuch auf einem neuen Wege.

Wetzlar, im Juni 1930.

M. Berek.

Inhalt.

	Seite
1. Einführung	
a) Geltungsbereich der Strahlenoptik	1
b) Die Kaustik. Symmetrieeigenschaften von Strahlenbündeln	1
c) Die Bildfehler eines optischen Systems als Folge mangelnder Symmetrieeigenschaften des Systems in bezug auf ursprünglich homozentrische Strahlenbündel	4
2. Die Abbildung im paraxialen Gebiet und die idealisierte Ab- bildung	
a) Der ideale Bildort auf der Achse	12
b) Der paraxiale Abbildungsmaßstab.....	14
c) Die Brennweite	15
d) Der allgemeine Helmholtz-Lagrangesche Satz für wenig geöffnete Büschel in einem Meridianschnitt	15
e) Folgerungen für das paraxiale Gebiet. Das reziproke Ebenenpaar	16
f) Die Kardinalpunkte eines Systems	18
g) Die Konstruktion des Bildes mit Hilfe der Kardinalpunkte. Die auf die Brennpunkte bezogenen Abbildungsgleichungen.....	21
h) Darstellung des Strahlenganges mit Hilfe der Pupillen. Die auf die Pupillen bezogenen Abbildungsgleichungen	22
i) Die auf ein beliebiges konjugiertes Punktepaar bezogenen Abbil- dungsgleichungen. Die allgemeinste Darstellung der Kardinal- elemente eines Systems	25
3. Die Ermittlung des Korrektionszustandes eines optischen Systems auf der Grundlage der trigonometrischen Durch- rechnung von Strahlenbündeln durch das System	
a) Allgemeine Gesichtspunkte für die Auswahl der Strahlen zur Durch- rechnung	29
b) Die Formeln für die Durchrechnung von Strahlen in einem Meri- dianschnitt eines zentrierten optischen Systems von Kugelflächen	30
c) Bestimmung der Anfangskoordinaten der Strahlen im Objektraum	31
d) Die Berechnung der Aberrationsbeträge	32
e) Die graphische Darstellung des Korrektionszustandes	33
4. Zerlegung der resultierenden Aberrationen nach den Anteilen der einzelnen Flächen des Systems	38
5. Die Seidelsche Theorie der Aberrationen dritter Ordnung	
a) Allgemeines über die praktische Bedeutung analytischer Entwicke- lungen der Bildfehler	41

	Seite
b) Die Seidelschen Terme für die monochromatischen Bildfehler dritter Ordnung	42
c) Deutung der Terme	45
d) Die Bildfehler von höherer als dritter Ordnung und ihr Einfluß ..	50
e) Die Flächen-Teilkoeffizienten der Seidelschen Theorie.....	51
f) Bedeutung der Blendenstellung für die Korrektur einzelner oder aller Bildfehler im Seidelschen Bereich	55
g) Die Berechnung der Teilkoeffizienten	61
h) Tabellarische Darstellungen	62
6. Kriterien für das Nichtvorhandensein von Asymmetriefehlern in weit geöffneten Strahlenbündeln	
a) Die Isoplanasiebedingung	71
b) Der Spezialfall der Sinusbedingung	76
c) Die Proportionalitätsbedingung	76
d) Das Koinzidenzkriterium.....	77
e) Das vereinfachte Koinzidenzkriterium	79
7. Theorie der chromatischen Aberrationen	
a) Die chromatische Variation des paraxialen Bildortes	80
b) Die chromatische Variation der Bildgröße	82
8. Das optische System als Kombination von Einzellinsen	
a) Die Kardinalpunkte einer in Luft befindlichen dicken Einzellinse	85
b) Umwandlung dicker Einzellinsen in Äquivalentlinsen der Dicke Null	86
c) Das optische System aus Äquivalentlinsen in Luft	89
9. Synthese optischer Systeme auf der Grundlage der Theorie	
a) Die allgemeinen Bedingungen für den Ansatz eines Systems	94
b) Die Glasarten.....	96
c) Aplanatische und isoplanatische Einzellinsen	97
d) Anastigmatische und verzeichnungsfreie Einzellinsen	102
e) Das Simplet	103
a) Die allgemeinen Bedingungen	103
β) Die positive Einzellinse	104
γ) Das achromatisierte Simplet	108
f) Das Duplet	112
a) Die allgemeinen Bedingungen	112
β) Das Petzvalsche Porträtobjektiv	114
γ) Weitwinkel-Duplets	116
δ) Das Teleobjektiv	117
ε) Das teleskopische System	118
ζ) Das Okular	118
g) Das Triplet.....	121
a) Die allgemeinen Bedingungen	121
β) Das einfache Triplet	123
γ) Tripletvarianten	130
h) Das Quadruplet.....	131
i) Das Mikroobjektiv	132

	Seite
Zusammenstellung benutzter Formelzeichen	134
Nachwort zur zweiten, nahezu unveränderten Auflage.....	137
Alphabetisches Sachregister	140

1. Einführung.

a) Geltungsbereich der Strahlenoptik.

Das Wissensgebiet der Strahlenoptik ist aus dem Bedürfnis nach möglichst ideal abbildenden optischen Instrumenten entstanden und insbesondere im Zusammenhang mit dieser praktischen Aufgabe entwickelt worden. Die Strahlenoptik wird zumeist als »geometrische« Optik bezeichnet, im Gegensatz zur »Wellenoptik«. Doch ist diese Gegenüberstellung recht unzutreffend, da das, was man mit »geometrischer« Optik bezeichnen will, ebenfalls Wellenoptik ist, sogar so weit gehend, daß die Vorstellung von ungestörter Ausbreitung der Wellen auch da aufrecht erhalten wird, wo dies wegen der statthabenden Diffraktionsvorgänge nicht mehr zulässig ist, nämlich im Bildraum. Es ist deshalb wohl richtiger, einerseits von Strahlenoptik, andererseits von Diffraktionsoptik zu sprechen. Die Strahlenoptik vernachlässigt die Diffraktionsvorgänge. Die auf der Grundlage der Strahlenoptik basierende Theorie abbildender Systeme ist daher nur eine angenäherte, aber deshalb keineswegs minderwertig; denn auch die Diffraktionsoptik kommt in ihrer Anwendung auf optische Instrumente ohne die Begriffe der Strahlenoptik nicht aus und ist andererseits so kompliziert, daß es ziemlich aussichtslos erscheint, sie werde sich jemals bei der Berechnung optischer Systeme in größerer Allgemeinheit verwenden lassen, wiewohl Ansätze ihrer Benutzung für spezielle Fälle in Arbeiten von K. Strehl vorliegen. Die Strahlenoptik als ein spezieller Teil der Optik findet ihre Rechtfertigung in ihren praktischen Erfolgen wie auch durch die Tatsache, daß sie uns bereits bei Anwendung einfacher Hilfsmittel tiefgehende Einsicht in typische Wesenheiten der Wirkung optischer Systeme vermittelt. Die Gesetze der Strahlenoptik ergeben sich als derjenige Grenzfall aus den strengen Darstellungen der Diffraktionsoptik, in dem die Wellenlänge der Strahlung gleich Null wird.

b) Die Kaustik. Symmetrieeigenschaften von Strahlenbündeln.

Diejenige Fläche, welche die Hüllfläche sämtlicher Strahlen eines räumlichen Bündels ist, zu der also alle Strahlen des Bündels tangierend

verlaufen, nennt man die Kaustik¹⁾ oder Brennfläche des Strahlenbündels. Ein Strahlenbündel, das nach einem Punkt konvergiert, heißt homozentrisch²⁾. In diesem Falle degeneriert die Kaustik ebenfalls in einen Punkt, den Konvergenzpunkt des Bündels. Ein solches Strahlenbündel ist rotationssymmetrisch mit einem mittleren Strahl, dem Hauptstrahl, als Rotationsachse und hat außerdem eine durch den Konvergenzpunkt gehende, auf dem Hauptstrahl senkrecht stehende Symmetrieebene (Fig. 1). Fehlt diese Symmetrieebene, so ist das Bündel

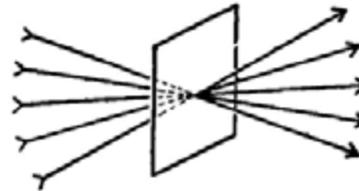


Fig. 1.

nicht mehr homozentrisch: Strahlen verschiedener Öffnung gegen den Hauptstrahl schneiden sich dann an verschiedener Stelle; ist das Bündel dabei aber noch rotationssymmetrisch, so wird die Kaustik eine Rotationsfläche, die an der Vereinigungsstelle der dem Hauptstrahl unendlich benachbarten Strahlen eine Spitze hat (Fig. 2). Den

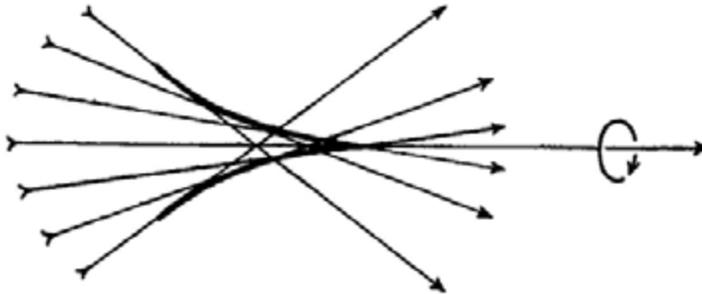


Fig. 2. Strahlenbündel mit positivem Öffnungsfehler und zugehöriger Kaustik.

Durchschnitt der Kaustik mit einer beliebigen Ebene bezeichnet man als die kaustische Kurve in dieser Ebene. Eine solche ist für die durch die Achse des Bündels gehende Ebene in Fig. 2 stark ausgezogen. Den Fehler, den ein solches Strahlenbündel gegenüber einem homozentrischen hat, nennt man den Öffnungsfehler. Wenn die mehr geöffneten Strahlen die Achse früher schneiden als die dem Hauptstrahl unmittelbar benachbarten Strahlen, heißt der Öffnungsfehler positiv, im anderen Falle negativ. Man nennt ein Strahlenbündel für eine bestimmte Öffnung korrigiert, wenn der dieser Öffnung entsprechende Strahl gleichfalls durch die Spitze der Kaustik hindurchgeht, und bezeichnet dann die Abweichungen der anderen

¹⁾ καύειν = brennen.

²⁾ ὁμοῦς = gemeinsam.

Strahlschnittpunkte von der kaustischen Spitze, auf dem Hauptstrahl gemessen, als Zonen des Öffnungsfehlers. In einem solchen korrigierten Strahlenbündel treten für einen Zwischenwert der Öffnung Rückkehrpunkte in der kaustischen Kurve auf (Fig. 3). Die durch optische Systeme realisierte Strahlenvereinigung hat unter Umständen mehrere solcher Rückkehrpunkte in der kaustischen Kurve.

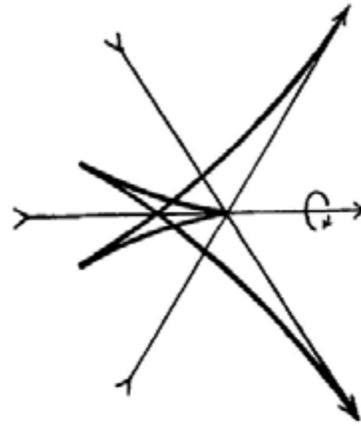


Fig. 3. Kaustik mit Rückkehrpunkten für ein bei voller Öffnung korrigiertes Strahlenbündel.

Der nächst niedere Grad in den Symmetrieeigenschaften eines Strahlenbündels tritt ein, wenn an Stelle der Rotationssymmetrie nur noch zwei aufeinander senkrechte Symmetrieebenen vorhanden sind. Die Durchschnittsgerade der beiden Symmetrieebenen bildet dann den Hauptstrahl des Bündels, jede Symmetrieebene selbst heißt ein Hauptschnitt des Bündels. Das Strahlenbündel selbst heißt astigmatisch¹⁾; es hat in jedem der Hauptschnitte eine besondere kau-

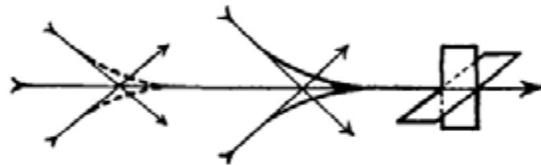


Fig. 4. Strahlenbündel mit zwei aufeinander senkrechten Symmetrieebenen. In jeder Symmetrieebene eine gesonderte kaustische Spitze auf dem Hauptstrahl.

stische Kurve (Fig. 4) mit je einer Spitze an anderer Stelle des Hauptstrahls. Den Abstand beider kaustischer Spitzen nennt man die astigmatische Differenz, ihren halben Betrag den Astigmatismus des Bündels. Innerhalb jedes der Hauptschnitte kann das ebene Bündel homozentrisch sein oder Öffnungsfehler besitzen.

Der nächst niedere Grad des Symmetriecharakters ist das Vorhandensein nur einer Symmetrieebene. Die Strahlenvereinigung ist dann nur in Schnitten senkrecht zu dieser Symmetrieebene symmetrisch, und zwar symmetrisch zu dem gleichzeitig in der Symmetrieebene verlaufenden Strahl. Innerhalb der Symmetrieebene dagegen herrscht Asymmetrie der Strahlenvereinigung (Fig. 5). Dieser Fehler heißt Koma²⁾. In Grenzfällen hat die kaustische Kurve in der Sym-

¹⁾ α = nicht; $\sigma\tau\gamma\mu\alpha$ = Punkt.

²⁾ $\kappa\acute{o}\mu\eta$ = Haarschweif.

metrieebene noch eine oder mehrere Spitzen, aber ihre Ausdehnung zu beiden Seiten solcher Singularitäten ist asymmetrisch.

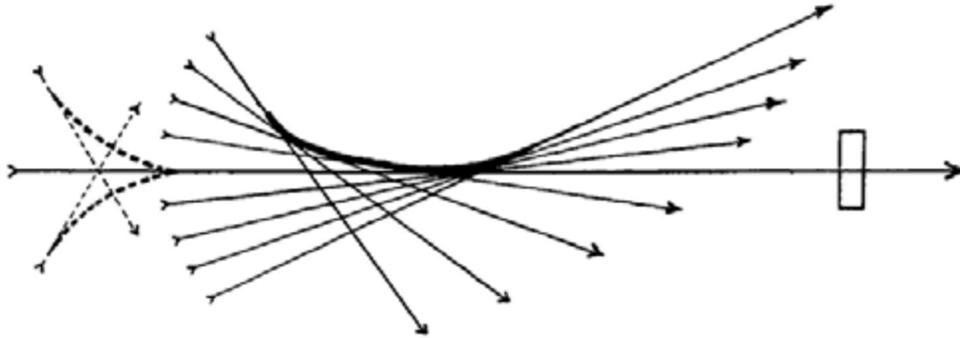


Fig. 5. Strahlenbündel mit nur einer Symmetrieebene: Nur in Schnitten senkrecht zur Symmetrieebene eine symmetrische Kaustik, in der Symmetrieebene eine asymmetrische Kaustik.

Hat schließlich das Strahlenbündel gar keine Symmetrieeigenschaften, so ist die kaustische Kurve in jedem Schnitt asymmetrisch und mit Koma behaftet.

c) Die Bildfehler eines optischen Systems als Folge mangelnder Symmetrieeigenschaften des Systems in bezug auf ursprünglich homozentrische Strahlenbündel.

Von allen optischen Systemen haben die weitaus größte praktische Bedeutung diejenigen, welche aus einer Folge brechender Kugelflächen bestehen und bei denen die Krümmungsmittelpunkte sämtlicher Flächen auf einer Geraden liegen. Diese Gerade heißt die Achse des Systems, und das System selbst heißt achsenzentriert. Wird ein räumliches Strahlenbündel, das von einem Punkte P des Objektraumes ausgeht, beim Durchgang durch das optische System so gebrochen, daß es im Bildraum homozentrisch nach einem Punkte P' ist, so heißt P im Sinne der Strahlenoptik stigmatisch nach P' abgebildet. Damit eine achsensenkrechte Ebene ideal abgebildet wird, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. jeder Punkt der Ebene muß stigmatisch abgebildet werden;
2. die Gesamtheit der Bildpunkte muß wieder eine achsensenkrechte Ebene erfüllen;
3. das Verhältnis des Abstandes zweier beliebigen Bildpunkte zu dem Abstand der zugehörigen Objektpunkte, der Abbildungsmaßstab, muß innerhalb der ganzen Bildebene konstant sein.

Nur wenn auch die dritte Bedingung erfüllt ist, ist das Bild dem Objekt in allen Teilen ähnlich. Den Fehler, der bei Nichterfüllung dieser Bedingung in Erscheinung tritt, nennt man Verzeichnung. Dann wird

eine objektseitig geradlinige, in einer achsenkrechten Ebene liegende, aber nicht durch die Achse hindurchgehende Punktfolge auch bei stigmatischer Abbildung i. a. als Kurve, z. B. ein zur Achse zentriertes Quadrat als kissenförmig oder tonnenförmig verzerrtes Vierseit, abgebildet (Fig. 14, Tafel I).

Eine nähere Klassifikation erfordern die Schärfenfehler, die bei Nichterfüllung der Bedingungen 1 und 2 in einer achsenkrechten Auffangebene des Bildraumes in Erscheinung treten. Da die Achse eines zentrierten optischen Systems eine unendlichzählige Symmetrieachse des Systems ist, d. h. bei jeder beliebigen Drehung um diese Achse das System mit sich in Deckung bleibt, so ist die Abbildung einer achsenkrechten Ebene \mathcal{E} (Fig. 6)

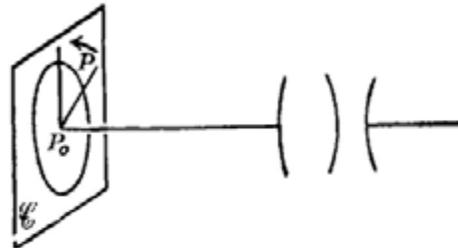


Fig. 6. Rotationsymmetrie eines zentrierten optischen Systems um die Achse.

durch das System vollständig definiert, wenn die Abbildung einer beliebigen gradlinigen Punktfolge $P_0 \rightarrow P$ bekannt ist, die innerhalb der Ebene \mathcal{E} liegt und im Achsenpunkte P_0 beginnt. Man kann daher, ohne der Allgemeinheit der Betrachtungen irgendwie Abbruch zu tun, diese Punktfolge als in der Zeichenebene liegend annehmen. Das Verständnis für die typischen Eigenschaften der Schärfenfehler wird dann wesentlich gefördert, wenn man sich die Symmetrieeigenschaften klar macht, die das optische System in bezug auf ein von einem Punkte P ausgehendes räumliches Strahlenbündel hat. Zu diesem Zwecke denken wir uns unser Auge zunächst in den Punkt P_0 auf der Achse gebracht, den Blick nach dem optischen System zu gerichtet. Der wirksame Teil des Objektivs erscheint dann (Fig. 7) als eine helle Kreisfläche; man bezeichnet sie als die Eintrittspupille des Objektivs für den Objektpunkt P_0 , und ihren scheinbaren Durchmesser nennt man die wirksame Öffnung des Objektivs für den Punkt P_0 . Es ist nun evident, daß zufolge der Symmetrieeigenschaften der Achse in bezug auf das von P_0 ausgehende Strahlenbündel die Abbildung des Achsenpunktes P_0 vollständig bestimmt ist, wenn man den bildseitigen Strahlenverlauf für ein flächenhaftes Büschel kennt, das, von P_0 ausgehend, einen Radius der wirksamen Öffnung zur Basis hat. Der Fehler, den gegebenenfalls dieses flächenhafte Büschel bildseitig gegenüber einer homozentrischen Strahlenvereinigung aufweist, ist der Öff-



Fig. 7. Eintrittspupille eines Objektivs für den Bildwinkel $w = 0$.

nungsfehler; er wiederholt sich also innerhalb des ganzen, durch die Eintrittspupille hindurchgehenden räumlichen Bündels rotations-symmetrisch. Die Unterscheidung des Vorzeichens des Öffnungsfehlers ist bereits in Abschnitt b gegeben. In der Literatur wird der Öffnungsfehler gewöhnlich als sphärische Längsaberration bezeichnet. Diese Benennung ist aber schlecht, da dieser Fehler keinesfalls nur eine spezifische Eigenart von Kugelflächen ist.

Bewegen wir jetzt unser Auge von P_0 nach einem außerachsialen Punkte P oder, was im Effekt dasselbe ist, belassen wir unser Auge an



Fig. 8. Vignettierung für Bildwinkel $w > 0$.

seiner Stelle im Raum und neigen dafür das optische System um einen Winkel w , den wir als den zu P gehörigen Bildwinkel bezeichnen, so weist nunmehr die Eintrittspupille des Objektivs (Fig. 8) ganz andere Merkmale auf als im Falle des Bildwinkels $w = 0$. Zunächst, nebenbei bemerkt, ist ihre Fläche sichtlich kleiner geworden, woraus eine Abnahme der Bildhelligkeit bei größeren Bildwinkeln resultieren muß. Diese Erscheinung bezeichnet man als Vignettierung. Was aber den

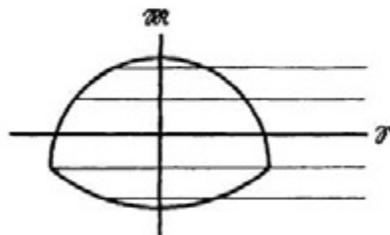


Fig. 9. Symmetrieeigenschaften im Meridian- und Sagittalschnitt der wirksamen Öffnung.

uns hier mehr interessierenden Typus der Schärfenfehler anbetrifft, so ist wesentlich, daß nunmehr die Eintrittspupille gegenüber dem Falle $w = 0$ nur noch verminderte Symmetrieeigenschaften aufweist: die Blickrichtung des Auges ist nicht mehr die Achse des Systems; die Eintrittspupille des Objektivs hat daher jetzt nur noch ein Symmetrieelement, nämlich diejenige Symmetrieebene, welche durch

den Augenort und die Systemachse bestimmt ist. Diese Ebene — sie ist in Fig. 9 durch die Schnittgerade \mathfrak{M} angedeutet — heißt der Meridianschnitt, auch wohl Tangentialschnitt, und diejenigen Strahlen, welche in dem von P ausgehenden Strahlenbündel innerhalb dieses Schnittes verlaufen, heißen Meridianstrahlen oder meridionale

Strahlen, auch wohl tangentielle Strahlen. Die in einer Ebene gezeichneten Strahlen sind also sämtlich Meridianstrahlen, wenn diese Ebene die Achse des optischen Systems enthält. Der scheinbare Durchmesser der Eintrittspupille im Meridianschnitt heißt die meridionale Öffnung des Systems für den Bildwinkel w . Innerhalb des meridionalen Büschels gibt es keinen Strahl, der durch irgendwelche Symmetrieeigenschaften des Büschels gegenüber den anderen Strahlen bevorzugt wäre; daher ist die Abbildung des Punktes P mittels der im Meridianschnitt verlaufenden Strahlen erst bestimmt, wenn der bildseitige Verlauf aller Strahlen innerhalb der ganzen wirksamen Öffnung des Systems im Meridianschnitt bekannt ist, im Gegensatz zu den schon besprochenen

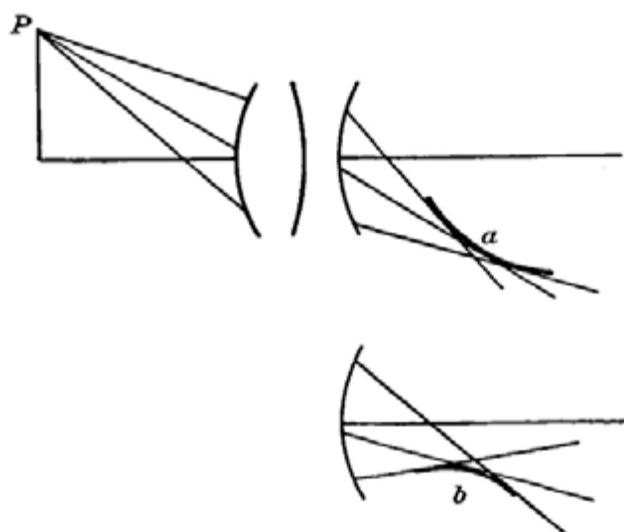


Fig. 10. Asymmetriefehler im Meridianschnitt. a) Äußere Koma. b) Innere Koma.

Verhältnissen für den Punkt P_0 , wo zufolge der Rotationssymmetrie um die Systemachse die Kenntnis des bildseitigen Strahlenverlaufs über die halbe wirksame Öffnung genügt. Zuzufolge dieses Symmetriemangels im Meridianschnitt für einen von $w = 0$ verschiedenen Bildwinkel, besitzt das meridionale Büschel bildseitig i. a. nicht nur den Öffnungsfehler, sondern außerdem noch eine Asymmetrie des Öffnungsfehlers, die schon in Abschnitt b erwähnte Koma. Man unterscheidet je nach der Ausbildung der Asymmetrie (Fig. 10) Außenkoma oder Innenkoma. Ist die Koma behoben, so zeigt das meridionale Büschel einen Öffnungsfehler symmetrischen Charakters wie das von P_0 ausgehende Büschel.

Jede durch P hindurchgehende und zum Meridianschnitt senkrechte Ebene bildet einen sog. Sagittalschnitt durch das von P ausgehende räumliche Strahlenbündel. Jede auf der Papierebene senkrechte, durch P hindurchgehende Ebene ist also in bezug auf das

von P ausgehende räumliche Strahlenbündel ein solcher Sagittalschnitt, wenn die Papierebene die Systemachse enthält. In Fig. 9 kennzeichnen die mit \mathcal{S} bezeichneten Richtungen sämtlich die Durchschnitte solcher Sagittalschnitte mit der Eintrittspupille des Objektivs. Da der Meridianschnitt \mathcal{M} auf allen Sagittalschnitten \mathcal{S} senkrecht steht und zugleich eine Symmetrieebene des optischen Systems ist, besitzen die in jedem Sagittalschnitt verlaufenden Strahlen, die Sagittalstrahlen, Symmetrieeigenschaften in bezug auf den Schnitt \mathcal{M} . Innerhalb der flächenhaften Strahlenbüschel der Sagittalschnitte kann es also keine Asymmetriefehler in bezug auf die Ebene \mathcal{M} geben, und der Öffnungsfehler in solchen Büscheln ist daher symmetrisch zu \mathcal{M} (Fig. 5). Da aber andererseits keiner der Sagittalschnitte eine Symmetrieebene

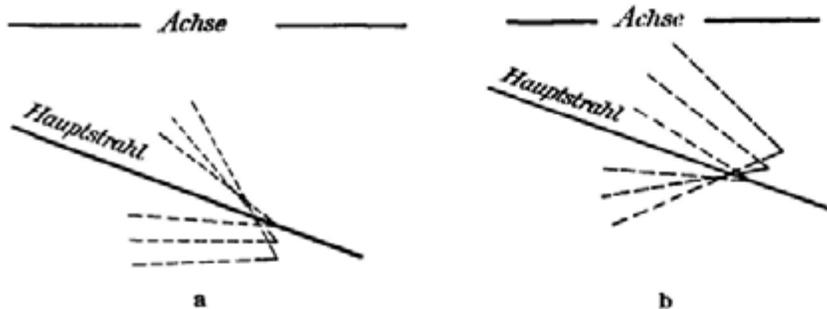


Fig. 11. Asymmetriefehler im Sagittalschnitt. a) Äußerer Rinnenfehler. b) Innerer Rinnenfehler.

des optischen Systems ist (Fig. 9), so besteht für die objektseitig in einem solchen Schnitt verlaufenden Strahlen kein zwingender Anlaß, auch bildseitig ein ebenes Büschel zu bilden; es werden sich wohl je zwei Strahlen des sagittalen Büschels, die in bezug auf den Meridianschnitt symmetrisch liegen, zwar deshalb wieder im Meridianschnitt schneiden, aber dieser Schnittpunkt wird zufolge Mangels weiterer Symmetrieelemente i. a. nicht auf dem dem Meridianschnitt angehörigen Strahl des sagittalen Büschels liegen (Fig. 11); hierdurch erscheint das ursprünglich ebene sagittale Büschel nach Durchgang durch das optische System symmetrisch zum Meridianschnitt rinnenförmig durchgebogen. Dieser Fehler wird deshalb als Rinnenfehler bezeichnet. Koma und Rinnenfehler sind Fehler gleicher Gattung, nämlich Folgen mangelnder Symmetrieeigenschaften, die sich allerdings im Meridianschnitt und Sagittalschnitt qualitativ und quantitativ anders auswirken. Wir werden später noch einen dritten zu dieser Gruppe gehörenden Fehler kennen lernen.

Man kann das Zustandekommen dieser Fehler auch so verstehen und aussprechen: Der Rinnenfehler ist eine Folge der Tatsache, daß die Ebene, innerhalb deren objektseitig ein sagittales Büschel verläuft,