Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft

Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft

Band: 13 (1968)

Heft: 109

Artikel: Optik für Astro-Amateure

Autor: Wiedemann, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-900001

bestimmung mit einer Genauigkeit von 1 Kilometer auf 100 Millionen Kilometer. Das erlaubte z. B. den Ingenieuren beim Venus-Flug von «Mariner V», die Entfernung des unsichtbaren Satelliten jederzeit bis auf wenige hundert Meter genau zu bestimmen. Diese erstaunliche Messtechnik, bei der der bekannte Doppler-Effekt eine entscheidende Rolle spielt, ist eines der wichtigsten Hilfsmittel in der heutigen Raumfahrt.

Doch kehren wir wieder zu den Radar-Untersuchungen an der Venus zurück. Es scheint heute festzustehen, dass die nicht sichtbare Oberfläche des Planeten drei *«rauhe» Gebiete* von teils riesigen Ausmassen aufweist. Die Wissenschafter vermuten Gebirge, aber GOLDSTEIN, als vorsichtiger Gelehrter, meint: «Es war bisher nicht möglich, die Höhen zu messen. Gebirge sind also noch nicht nachgewiesen, aber jenes Terrain, das die Strahlung zurückwirft, ist rauh im Vergleich zu den übrigen Gebieten.»

Im April 1969, wenn Venus der Erde wieder näher kommt, steht den Physikern in Goldstone eine wesentlich erhöhte Sendeleistung von ungefähr 450 Kilowatt zur Verfügung, die bessere Untersuchungsmöglichkeiten schafft. Eines der Nahziele dieser Versuche unter Aufsicht der NASA ist das Ausfindigmachen sicherer Landeplätze für künftige, weich landende Venus-Sonden. HANS ROHR

Optik für Astro-Amateure

von E. WIEDEMANN, Riehen

3. Mitteilung

Die Verwirklichung der optischen Abbildung (Fortsetzung)

In der 2. Mitteilung[2]) haben wir die bei optischen Systemen auftretenden *Bildfehler* besprochen und die Möglichkeiten zu ihrer Beseitigung aufgezeigt. Von einem optischen System wird aber nicht nur eine prinzipielle Korrektur der Bildfehler verlangt. Um beurteilen zu können, ob ein optisches System für einen bestimmten Zweck geeignet ist, müssen die Beträge der Restaberrationen genau bekannt, das heisst zahlenmässig definiert sein. Dies gilt insbesondere für die *astronomische Optik*, aber auch für die *Photo-Optik*, die *Mikroskop-Optik* und die *Optik von Messgeräten.*

Für die zahlenmässige Bestimmung des Korrektionszustandes optischer Systeme, und, wie wir später sehen werden, auch für deren Synthese, benützt man heute ausschliesslich mathematische Methoden, deren man sich entweder auf herkömmliche Weise oder mit Hilfe von Rechenmaschinen und Computern bedient, wofür spezielle Rechenprogramme entwickelt worden sind. An dieser Stelle kann jedoch nur das prinzipielle Vorgehen bei diesen Rechnungen gezeigt und an einfachen Beispielen erläutert werden. Die Rechnungen selbst zerfallen in die folgenden:

1. die *Nullstrahlrechnung*, die die genauen Werte der Schnitt- und Brennweiten, gegebenfalls für beliebige Farben, liefert und damit über die Farbkorrektion auf der Achse (Farblängsfehler) und im Bildfeld (Farbquerfehler) Aufschluss gibt,
2. die *Berechnung der Flächenteilkoeffizienten und deren Summen*, die ebenfalls für beliebige Farben, einen angenäherten Aufschluss über den Korrektionszustand auf der Achse und innerhalb eines mässigen Bildfeldes liefert und besonders auch zum Einkorrigieren eines neuen Systems dienen kann,
3. die *(trigonometrische) Durchrechnung* von achsenparallelen, gegen die Achse geneigten und eventuell auch windschiefen Strahlen, womit für alle Bildfehler ein zahlenmässiges Bild des Korrektionszustandes erstellt werden kann, das sich durch die Berechnung von *Treffer-Diagrammen* in bezug auf den jeweiligen idealen Bildpunkt ergänzen lässt.

Eine Berechnung von Trefferdiagrammen ist allerdings des grossen damit verbundenen Aufwandes wegen kaum ohne Computer durchführbar und muss deshalb hier ausser Betracht bleiben. Dagegen sind die drei ersten Berechnungen auch ohne besondere Rechenhilfen möglich. Auf sie wollen wir nun eingehen. Für den näher daran interessierten Leser sei in diesem Zusammenhang die wichtigste einschlägige Literatur zitiert [3]), [4]), [5]), [8]). Er findet darin auch weitere, zusätzliche Berechnungsmöglichkeiten, die ihm helfen können, optische Systeme zu prüfen und zu beurteilen.

1. Die Nullstrahlenrechnung

Beschränkt man sich auf den sogenannten GAUSSschen fadenförmigen Raum um die Achse, innerhalb dessen der Sinus eines Winkels seinem Bogenwert noch gleichgesetzt werden darf, so gilt für die innerhalb dieses Raumes verlaufenen *Parachsialstrahlen* in aller Strenge die ABBEsche Invariante:

$$(1)\qquad n_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{s_1}\right)=n'_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{s'_1}\right),$$

worin n_1 den Brechungsindex eines ersten und n'_1 jenen eines folgenden Mediums, r_1 den Radius einer brechenden oder reflektierenden Fläche, s_1 die Schnittweite vor der Brechung oder Reflexion und s'_1 jene nach dieser bedeutet. Folgen mehrere Flächen aufeinander, so ist deren Abstand in Abzug zu bringen:

$$(2)\qquad s_2 = s'_1 - e'_1;\ s_1 = s'_2 - e'_2 \text{ und so fort,}$$

wenn mit e'_2, e'_2 und so fort die aufeinanderfolgenden Abstände bezeichnet werden.

Auf diese Weise lässt sich ein achsnaher Strahl über eine beliebige Folge von brechenden und reflektierenden Flächen, also ein beliebiges optisches System, verfolgen, und man erhält zu einer beliebig wählbaren ersten Schnittweite s_1 (die meistens ∞ oder eine gegebene Objektweite ist) die schliessliche Schnittweite s'_ν, die gleich der Bildweite ist. Da bei dem unendlich weit entfernten Objekt in der Astronomie s_1 stets $= \infty$ zu setzen ist, erhält man mit s'_ν stets die *Schnittweite* des optischen Systems, die aber im allgemeinen *nicht* mit dessen Brennweite identisch ist. Die *Brennweite* berechnet sich jedoch einfach aus den Schnittweiten:

$$(3)\qquad \frac{s'_1}{s_2}\cdot\frac{s'_2}{s_1}\cdot\ \ldots\ldots\ \cdot s'_\nu = f'.$$

Um diese kurzen Rechnungen zu erläutern, seien zwei einfache Beispiele berechnet:

a) Der einfache sphärische Hohlspiegel

Ein sphärischer Hohlspiegel habe einen Krümmungsradius $r = \pm 334.9748$ mm. Es sollen Schnitt- und Brennweite berechnet werden. s_1 sei ∞. Der Spiegel befinde sich in Luft, woraus folgt, dass $n_1 = n'_1 = 1$ ist. Dann lautet die ABBEsche Invariante:

$$(1\,a) \qquad 1\left(\frac{1}{-r_1} - \frac{1}{\infty}\right) = 1\left(\frac{1}{+r_1} - \frac{1}{s'_1}\right)$$

und damit $\quad -s'_1 = -\frac{r}{2}.$

Wie wir natürlich schon aus Erfahrung wussten, beträgt die Schnittweite die Hälfte des Radius, also —167.4874 mm. Das Minuszeichen vor der Schnittweite ist die Folge der Richtungsumkehr des Strahls, gemäss der früher getroffenen Festsetzung[1]). Aus (3) folgt weiter:

(3 a) $\quad -s'_1 = -f'$, in Worten:

beim einfachen Spiegel ist die Brennweite gleich der Schnittweite, da das System die optische Dicke Null besitzt.

b) Die bikonvexe Sammellinse

Eine bikonvexe Sammellinse sei aus dem Glas BK 7 gefertigt, besitze also für das Licht der gelben Quecksilberlinie den Brechungsindex $n_d = 1.51680$. Sie habe die Radien $r_1 = +604.2000$ und $r_2 = -100.7000$ mm. Die Dicke e'_1 sei 6.000. s_1 sei wiederum ∞, $n_1 = 1$. Es sollen Schnitt- und Brennweite berechnet werden.

Bei brechenden Flächen ist es zweckmässig, die ABBEsche Invariante hierzu in etwas anderer Form zu schreiben:

(1 b – 3 b) 1. Fläche und Übergang zur 2. Fläche:

$$\frac{-n'_1 + 1}{+r_1} = -x_1; \quad \frac{1}{-s_1} = -y_1; \quad \frac{-n'_1}{-x_1 - y_1} = s'_1; \quad s'_1 - e'_1 = s_2.$$

2. Fläche, Schnittweite s'_2 und Brennweite f':

$$\frac{+n'_1 - 1}{-r_2} = -x_2; \quad \frac{-n'_1}{s_2} = -y_2; \quad \frac{-1}{-x_2 - y_2} = s'_2;$$

$$\frac{s'_1}{s_2} \cdot s'_2 = f'.$$

Die numerische Ausrechnung ergibt: $s'_1 = 1773.4128$; $s_2 = 1767.4128$; $s'_2 = 166.9365$; $f' = 167.4874$ mm.

Damit sind Schnitt- und Brennweite dieser Linse für die Wellenlänge 587.5 nm, die dem Licht der gelben Quecksilberlinie entspricht, berechnet. Schnitt- und Brennweite sind etwas verschieden, da die Linse eine endliche Dicke besitzt.

Auf genau gleiche Weise verfolgt man den Nullstrahl auch durch eine Linsenfolge, beispielsweise durch ein Fernrohrobjektiv, eine BARLOW-Linse, ein Ross-System oder auch ein Okular, um deren Schnitt- und Brennweite zu bestimmen.

Ersetzen wir in der Rechnung der Sammellinse den Brechungsindex für n_d durch Brechungsindices für andere Farben, so erhalten wir die Schnitt- und Brennweiten für diese und damit die Masszahlen für die Farbfehler unserer Linse.

Schon früher[2]) haben wir erfahren, dass die Farbfehler einer einfachen Linse weitgehend aufgehoben werden können, wenn man zwei Linsen von gegensätzlicher Brechkraft und verschiedenen ν-Werten kombiniert. Für eine solche *Achromatisierung* gelten die folgenden Regeln: Soll die Kombination *sammeln*, so muss die Sammellinse eine kleine Farbzerstreuung, also einen grossen ν-Wert, und die Zerstreuungslinse eine grosse Farbzerstreuung, also einen kleinen ν-Wert aufweisen (Beispiel: Fernrohr-Objektive). Soll die Kombination *zerstreuen*, so muss die Sammellinse die grössere und die Zerstreuungslinse die kleinere Farbzerstreuung besitzen (Beispiel: BARLOW-Linsen).

Führt man für solche Kombinationen nach dem Schema (1 b – 3 b) die Nullstrahlrechnung für die verschiedenen interessierenden Farben durch, so erhält man damit die genauen Zahlenwerte der Achromatisierung der Schnitt- und Brennweite. Das Ergebnis kann man der Übersichtlichkeit halber graphisch darstellen, wofür die *Fig. 7* der 2. Mitteilung[2]) ein Beispiel darstellt.

c) Normierung

Bevor wir zur Flächenteilkoeffizienten-Berechnung und zur trigonometrischen Durchrechnung von Strahlen übergehen, sei noch eine in der praktischen Optik übliche Regel besprochen.

Um bequeme und vergleichbare Zahlenwerte zu bekommen, ist es üblich, die Nullstrahlrechnung und auch die trigonometrische Durchrechnung für die Brennweite 100 (mm) durchzuführen. Das ist immer möglich, auch wenn man zunächst eine andere Brennweite ermittelt hat, weil alle Bestimmungsstücke linear ändern, also mittels eines Faktors dahin gebracht werden können, dass die Brennweite 100 (mm) wird.

Bei unseren beiden Beispielen *a)* Hohlspiegel und *b)* Sammellinse hatten wir eine Brennweite von 167.4874 (mm) erhalten. Multiplizieren wir diesen Wert mit dem Faktor 0.59706, so erhalten wir $f' = 100.0000$. Mit demselben Faktor multiplizieren wir sodann alle unsere Bestimmungsstücke (Radien, Dikken, Abstände), womit das System normiert ist. Wir erhalten:

a) beim Spiegel:

$r \;= 334.9748 \cdot 0.59706 = 200.0000 = r$

$f' = 167.4874 \cdot 0.59706 = 100.0000 = f'$

b) bei der Sammellinse:

$r_1 = +604.2000 \cdot 0.59706 = 360.7431 = r_1$

$e'_1 = \quad 6.000 \cdot 0.59706 = \quad 3.5823 = e'_1$

$r_2 = -100.7000 \cdot 0.59706 = -\;60.1239 = r_2$

Die neuen Schnittweiten werden:

$s'_1 = +1058.7742$

$s_2 \;= +1055.1919$

$s'_2 = +\;\;99.6701$

und die Brennweite wird:

$f' \;= 100.0000.$

Für die Berechnung der Flächenteilkoeffizienten wäre eine Brennweite von 100 unbequem. Man hat sich deshalb darauf geeinigt, für diese Rechnungen die Brennweite = 1 zu setzen. Man rückt dafür bei den Konstruktionsdaten und den ebenfalls benötigten Werten der Nullstrahlrechnung das Komma um 2 Stellen nach links. Ferner benötigt man für die Berechnung der Flächenteilkoeffizienten noch die sogenannten h-Quotienten, die sich wie folgt ergeben:

$$(4) \qquad \frac{h_1}{h_1} = 1; \quad \frac{h_2}{h_1} = \frac{h_1}{h_1} \cdot \frac{s_2}{s'_1};$$

$$\frac{h_3}{h_1} = \frac{h_1}{h_1} \cdot \frac{s_2}{s'_1} \cdot \frac{s_3}{s'_2} \quad \text{etc.}$$

2. *Die Berechnung der Flächenteilkoeffizienten*

Mit der Berechnung der Flächenteilkoeffizienten verlassen wir den GAUSS'schen fadenförmigen Raum um die Achse und betreten den Bereich eines mässigen Öffnungsverhältnisses von etwa 1:10 und mässig gegen die Achse geneigter Strahlen, wie sie einem Bildwinkel von etwa 15° entsprechen. In diesen Bereichen treten dann die früher besprochenen 5 monochromatischen Bildfelder, die *sphärische Aberration*, die *Asymmetriefehler*, der *Astigmatismus*, die *Bildfeldwölbung* und die *Verzeichnung* auf, und diese Fehler sind es auch, über deren Grösse und Vorzeichen die Flächenteilkoeffizienten-Berechnung Aufschluss gibt.

Hierzu ist es nötig, in der Annäherung an den Sinus eines Winkels einen Schritt weiter als bei der Nullstrahl-Rechnung zu gehen. L. SEIDEL hat dafür als erster Entwicklungen nach der 3. Ordnung angegeben und auch gezeigt, wie man diese Entwicklungen dazu benützen kann, Fläche für Fläche einzeln die 5 von einander unabhängigen monochromatischen Bildfehler, in der oben angeführten Reihenfolge kurz mit: A, B, C, P und V bezeichnet, zu berechnen. Die bei einem optischen System schliesslich resultierenden Fehler ergeben sich dann einfach durch die Addition der einzelnen Flächenfehler. Ist deren Summe gleich Null, so ist das System dafür im Bereich der 3. Ordnung fehlerfrei.

Es sei bemerkt, dass die Methode der Flächenteilkoeffizienten-Berechnung nach der 3. Ordnung durch die Hinzunahme höherer Glieder in den Entwicklungen (5. Ordnung, 7. Ordnung) verfeinert werden kann, womit A. SONNEFELD[6]) die Anzahl der von einander unabhängigen Bildfehler gesetzmässig zunimmt. Schon J. PETZVAL (1840) soll die Entwicklung nach der 7. Ordnung für die Berechnung seines berühmten, nach ihm benannten Objektivs, mit dem bekanntlich die Aera der Astrophotographie eingeleitet wurde, benützt haben. Da der mathematische Aufwand dafür aber gross ist und die Berechnung nach der 3. Ordnung einen ausreichenden Einblick in die wesentlichen Merkmale eines optischen Systems vermitteln, soll hier nur darauf hingewiesen werden.

Wichtig ist indes, dass die Ergebnisse der Flächenteilkoeffizienten-Berechnung sowohl Aufschlüsse über den Korrektionszustand eines Systems, als auch Richtlinien für die Korrektur vermitteln, wie sie auf andere Weise kaum erhalten werden können. Einige Angaben mögen dies erläutern.

Treten bei einem optischen System in A und B nur kleine Flächenteilkoeffizienten auf und ist deren Summe kleiner als 1.5 bzw. 0.5, so bedeutet dies, dass dieses System eine relativ grosse Lichtstärke haben kann. Sind ausserdem die Flächenteilkoeffizienten C und P klein und deren Summen ebenfalls klein und von entgegengesetztem Vorzeichen, so wird das System ein grösseres Bildfeld auszeichnen. Zeigt ein System irgend einen Fehler, so wird dessen Beseitigung am ehesten gelingen, wenn jene Fläche geändert wird, an welcher der betreffende Flächenteilkoeffizient einen grossen Wert hat. Auf diese Weise kann die Kenntnis der Flächenteilkoeffizienten beim Korrigieren optischer Systeme helfen. Belässt man schliesslich den Summen der Flächenteilkoeffizienten kleine endliche Werte (statt sie zu Null zu machen), so kann man damit den Einfluss der Glieder der 5. und 7. Ordnung berücksichtigen. Es reicht dann die Gültigkeit der Werte bis zu den grösseren Öffnungsverhältnissen und grösseren Bildwinkeln, besonders, wenn die einzelnen Flächenteilkoeffizienten alle klein sind. Grosse Flächenteilkoeffizienten verursachen im allgemeinen erhebliche Zonenfehler und begrenzen – auch wenn die Summenwerte klein sind – das Öffnungsverhältnis oder das Bildfeld (oder beide) stark, es sei denn, es stünde einem grossen Flächenteilkoeffizienten ein annähernd gleich grosser entgegengesetzten Vorzeichens gegenüber. Ein Beispiel dafür werden wir bei zweilinsigen *Fernrohrobjektiven* noch kennen lernen. Auch bei katadioptrischen Systemen, insbesondere bei den Varianten des MAKSUTOV-Systems, bei optischen Zusatzsystemen (BARLOW-Linsen, ROSS-Systemen, ERFLE-Planokularen etc.) werden uns die Ergebnisse der Flächenteilkoeffizienten-Berechnungen noch sehr nützlich sein.

Was nun die Berechnung der Flächenteilkoeffizienten betrifft, so muss bezüglich des Rechenschemas auf die einschlägige Literatur[3]) verwiesen werden. Wie begnügen uns hier damit, die Ergebnisse für unsere beiden Beispiele in der von M. BEREK vorgeschlagenen Form wie folgt anzuschreiben:

a) Der einfache sphärische Hohlspiegel
$f' = -1.0000$, $s_1 = \infty$

ν	r_ν	e'_ν	n'_ν	s'_ν	$\frac{h_\nu}{h_1}$
1	±2.0000	0.0000	1.0000	—1.0000	1.0000
	A_ν	B_ν	C_ν	P_ν	V_ν
	+0.2500	—0.5000	+1.0000	—1.0000	±0.0000

Da unser Spiegel nur *eine* optisch wirksame Fläche besitzt, sind die ermittelten Flächenteilkoeffizienten gleichzeitig die gesuchten Summenwerte. Ihre Besprechung folgt weiter unten.

b) Die bikonvexe Sammellinse
$f' = +1.0000$, $s_1 = \infty$

ν	r_ν	e'_ν	n'_ν	s'_ν	$\frac{h_\nu}{h_1}$
1	+3.6074	0.0358	1.5168	+10.5877	1.0000
2	—0.6012	—	1.0000	+0.9967	0.9966
	A_ν	B_ν	C_ν	P_ν	V_ν
1	+0.0050	+0.0180	+0.0649	+0.0944	+0.5746
2	+6.5990	—2.3353	+0.8264	+0.5668	—0.4930
Summen	+6.6040	—2.3173	+0.8913	+0.6612	+0.0816

Es sei hier sogleich bemerkt, dass man eine Sammellinse auch in umgedrehter Stellung benützen kann, womit sich die Brennweite kaum ändert, die Flächenteilkoeffizienten und deren Summen aber merklich andere Werte annehmen können. Da in diesem Fall diese kleine zusätzliche Rechnung ein sehr instruktives Ergebnis liefert, sei ihr Ergebnis ebenfalls angeführt:

c) Die bikonvexe Sammellinse, umgedreht
$f' = +1.0000$, $s_1 = \infty$

ν	r_ν	e'_ν	n'_ν	s'_ν	$\frac{h_\nu}{h_1}$
1	+0.6012	0.0358	1.5168	+1.7646	1.0000
2	—3.6074	—	1.0000	+0.9797	0.9797
	A_ν	B_ν	C_ν	P_ν	V_ν
1	+1.0335	+0.6213	+0.3735	+0.5668	+0.5653
2	+0.9917	—0.7723	+0.6014	+0.0944	—0.5418
Summen	+2.0252	—0.1510	+0.9749	+0.6612	+0.0235

Vergleichen wir zunächst das Ergebnis der Flächenteilkoeffizienten-Berechnung unseres *Spiegels* mit der *Fig. 3* der vorangegangenen Mitteilung[2]), so finden wir eine prinzipielle Übereinstimmung in den Werten A und B mit dem Kurvenverlauf der sphärischen Aberration und der Abweichung gegen die Sinusbedingung. Dazu erfahren wir jetzt, dass der Spiegel positiven Astigmatismus und eine negative PETZVAL-Summe, aber keinen Verzeichnungsfehler aufweist.

Noch interessanter ist der Vergleich der beiden Flächenteilkoeffizienten-Berechnungen unserer *bikonvexen Sammellinse* mit der *Fig. 4* der vorangegangenen Mitteilung[2]), in der die A- und B-Werte beider Berechnungen mit kleinen Kreuzchen (×) eingetragen sind. Man erkennt, dass die Umkehrung der bikonvexen Sammellinse sehr merkliche Änderungen der Summenwerte A und B zur Folge hat, oder, anders ausgedrückt, dass die Durchbiegung einer Linse den Korrektionszustand erheblich verändert. Damit haben wir ein sehr wichtiges Hilfsmittel der konstruierenden Optik kennen gelernt, dessen Bedeutung sich noch dadurch erhöht, dass eine chromatische Korrektur durch Durchbiegungen kaum beeinflusst wird. Wir sehen weiter, dass unsere Sammellinse in umgedrehter Stellung fast genau die kleinstmöglichen Summenwerte A und B aufweist, wobei die sphärische Aberration aber immer noch etwa fünfmal grösser als beim Spiegel bleibt. Im Gegensatz zu diesem besitzt die Linse aber zum positiven Astigmatismus eine positive PETZVALsumme sowie ein wenig Verzeichnung.

Es ist nun möglich, die durch die Flächenteilkoeffizienten-Berechnung aufgezeigten Restfehler unserer Systeme wenigstens teilweise durch eine einfache Massnahme zu beseitigen, da die Werte von B, C und V durch die Blendenstellung beeinflusst werden. Dies sei an unserem Spiegel gezeigt.

Während der Restfehler der sphärischen Aberration von der Art der Flächenkrümmung (Kugelschale) und die PETZVAL-Krümmung des Bildfeldes vom Schalenradius abhängen, also durch eine Blendenstellung im Prinzip nicht beeinflussbar sind, gibt es stets eine Blendenlage, bei welcher die Asymmetriefehler verschwinden. Diese Blendenlage wird durch ihren Abstand z_1 vom System gekennzeichnet und asymmetriefehlerfreie Eintrittspupille genannt. Sie ergibt sich für unseren Spiegel nach der FRAUNHOFERschen Bedingung zu

$$(5) \qquad z_1 = \frac{\Sigma B}{\Sigma A}, \text{ also zu } \frac{-0.5000}{+0.2500} = -2.0000.$$

Bringen wir also im Abstand der doppelten Brennweite unseres Spiegels eine Blende an, so werden damit die Asymmetriefehler beseitigt. SCHMIDT- und MAKSUTOV-Systeme weisen, wenn sie richtig gebaut sind, diese Blende auf und sind deshalb (im Bereiche der 3. Ordnung) asymmetriefehlerfrei. Analog würde auch beim (sphärischen) NEWTON-Spiegel eine Verlängerung des Rohres auf die doppelte Brennweite und die Anbringung einer Blende am Rohrende die Bildqualität ausserhalb der Achse verbessern.

Soll weiter (im Bereiche der 3. Ordnung) der Astigmatismus beseitigt sein, so muss unser asymmetriefehlerfreier Spiegel auch der Bedingung

$$(6) \qquad (\Sigma B)^2 = \Sigma A \cdot \Sigma C \qquad \text{genügen.}$$

Die Rechnung zeigt, dass bei unserem Spiegel nunmehr die meridionale und die sagittale Bildfeldschale mit der PETZVAL-Schale zusammenfallen, womit der Astigmatismus beseitigt ist, wie wir dies vom SCHMIDT-Spiegel und anderen Systemen her bereits wissen. Der Krümmungsradius aller Bildfeldschalen ist gleich der System-Brennweite und das Bildfeld ist gegen das Objekt zu gewölbt. Kombiniert man aber zwei Spiegel mit gegensätzlich gleichen Radien, so wird die PETZVAL-Summe gleich Null und damit das Bildfeld eben, wenn zugleich auch der Astigmatismus beseitigt ist. Dieser Fall wird uns bei den *aplanatischen Spiegelsystemen* noch beschäftigen.

In analoger Weise kann auch die Korrektion von Linsen und Linsensystemen durch eine geeignete Blendenstellung verbessert werden. Wir werden bei der Behandlung der Fernrohrobjektive, der Korrektionssysteme und der Okulare darauf zurückkommen.

3. Die (trigonometrische) Strahlendurchrechnung

Es wurde bereits erwähnt, dass die Strahlendurchrechnung die *einzige* Methode ist, die bei optischen Systemen allgemein einen *präzisen* Aufschluss über die Strahlenvereinigung im Bildpunkt auf und ausserhalb der Achse eines optischen Systems von merklicher Öffnung gibt. Sie ist deshalb in der praktischen Optik die wichtigste Methode.

Handelt es sich um reine Spiegelsysteme mit Kugelflächen, so erfordert die Strahlendurchrechnung nur die Anwendung des Reflexionsgesetzes, ist also äusserst einfach. Sie wird schwieriger, wenn den Rotationsflächen andere Kegelschnitte (Parabeln, Hyperbeln, Ellipsen) zugrunde liegen, und sie kompliziert sich weiter, wenn ihre Basis Flächen höheren Grades (SCHMIDT-Platte) sind. Wir werden auf diese Berechnungen bei den betreffenden Systemen eingehen.

Bei Linsen- und Spiegellinsen-Systemen, auf welche der Begriff der trigonometrischen Strahlendurchrechnung im eigentlichen Sinne zutrifft, werden das Brechungsgesetz und das Reflexionsgesetz einzeln oder kombiniert wiederholt schematisch angewendet.

Noch bis zum Jahre 1930 dienten dafür die Methoden der Trigonometrie im eigentlichen Sinne, daher der Name. Mit der Einführung der 4-Spezies-Rechenautomaten und dann der Computer sind neue Rechenschemata entstanden, die vor allem auch die Durchrechnung gegen die Achse geneigter und windschiefer Strahlen erheblich erleichtern. Da diese Rechenschemata den vorhandenen Rechenhilfen angepasst sein müssen, also recht verschieden sein können, sei von Beschreibungen abgesehen und dafür an Hand der Literatur [3]), [5]), [7]), [8]), [9]) auf das prinzipielle Vorgehen verwiesen. Der näher daran interessierte Leser findet dort auch völlig durchgerechnete Beispiele und Hinweise für die jeweils zweckmässigste Modifikation der in Frage kommenden Formeln.