

# Charakterisierung der Abbildungsfehler optischer Systeme durch die Kaustik und die Diapunktskonfiguration

DIETER RICHTER

Pädagogische Hochschule „Karl Liebknecht“ Potsdam, Deutsche Demokratische Republik.

Ausgehend von den Seidelschen Abbildungsfehlern werden die Bildgütefunktionen Kaustik und Diapunkt analytisch dargestellt und ihre Abhängigkeit von den Koeffizienten der Bildfehler 3. Ordnung für rotationssymmetrische Systeme diskutiert. Diese Zusammenhänge werden an praktischen Beispielen mit Hilfe der Strahldurchrechnung veranschaulicht.

## 1. Vorbemerkungen

Bei der Analyse der Abbildungseigenschaften optischer Systeme ist die Auswahl einer Bildgütefunktion von besonderer Bedeutung. Mit einer gewählten Bildgütefunktion können Gütekriterien, aufbauend auf errechneten Gütezahlen, formuliert werden. Die physikalischen und geometrischen Eigenschaften, die durch Bildgütefunktionen beschrieben werden, führen zur Auswahl der Gütezahlen. Eine wichtige Forderung an eine Gütezahl ist ihre sichere und schnelle numerische Bestimmbarkeit.

Sämtliche geometrisch optische Bildgütefunktionen sind über die grundsätzliche Gütefunktion, das Eikonale miteinander verwandt. Wegen der optisch wenig anschaulichen Eigenschaften der Eikonale ist die Suche nach vom Standpunkt der optischen Abbildung anschaulichen Bildgütefunktionen verständlich. Der Zustand, daß jeder Abbildungsqualität wie z.B. Bildschärfe, Kontrast u.s.w. praktisch eine Gütezahl zuzuordnen ist, stellt gegenwärtig noch einen Wunschtraum dar.

Historisch haben sich die Bildgütefunktionen Queraberration und Wellenaberration herausgebildet und weitestgehend durchgesetzt. Da die Zusammenhänge mit vielen Bildqualitäten noch nicht formuliert werden können, könnte die Untersuchung anderer Bildgütefunktionen Fingerzeige liefern für die Berechnung entsprechender Gütezahlen.

Im folgenden wird ausgehend von den Begriffen Wellenaberration, Queraberration, Diapunkt und Kaustik gezeigt, wie die Seidelschen Abbildungsfehler (Eigenschaften der Queraberration) in der Diapunktskonfiguration bzw. in der Kaustik zum Ausdruck kommen. Abschließend werden für 2 konkrete optische Systeme ausgehend von der Strahldurchrechnung die drei Bildgütefunktionen verglichen.

## 2. Bildgütefunktionen und die Wellenaberration

Bei der Auswahl einer Bildgütefunktion bieten sich aufgrund der Welleneigenschaften des Lichtes die Eikonale an. Ausgehend von der Debye-Pichtschen Darstellung der Wellenfunktion [1], [2] erweist sich das gemischte Eikonale für einen Objektpunkt im Endlichen und das Winkeleikonale für einen Objektpunkt im Unendlichen als die das Strahlenbündel bestimmende Funktion. Bezeichnet man mit  $[P, Q]$  die optische Weglänge zwischen  $P$  und  $Q$  auf einem Strahl durch  $P$  und  $Q$ , so könnte als Wellenaberration definiert werden und durch ebene Wellen physikalisch als sinnvoll erkannt werden:

$$\begin{aligned} W(P, \mathbf{p}) &= T(P_0) - T(P_0^{(0)}), \\ T(P_0) &= [P, Q], \end{aligned} \quad (1)$$

wobei  $P_0$  den Bezugspunkt des Eikonals bezeichnet (siehe auch Figur 1). Hierbei ist zu beachten:

- a)  $W$  hängt nur von 2 Bildraumgrößen ab, da  $\mathbf{p}$  festen Betrag besitzt.
- b) Je nach Lage des Objektpunktes  $P$  (siehe oben) ist für  $T$  das entsprechende Eikonale zu benutzen.

c) Für das Bezugseikonale  $T^{(0)}$  könnte verwendet werden: der konstante Wert von  $T$  für einen Bezugsstrahl (günstig bei wellenoptischen Rechnungen) oder bei Betrachtungen, die in Richtung analytischer Untersuchungen gehen ein Ausdruck der der Bezugsabbildung (paraxiale Abbildung) entspricht. Im weiteren wird diese letztere Festlegung benutzt, so daß  $P_0$  der ideale Bildpunkt ist. Dadurch folgt für die Queraberration aus den Eikonaleigenschaften, wenn aus  $W$  die  $z$ -Koordinate  $w$  von  $\mathbf{p}$  eliminiert wurde [2]

$$\Delta \mathbf{P}' = \left( -\frac{\partial W}{\partial u}, -\frac{\partial W}{\partial v}, 0 \right) = \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0. \quad (2)$$

d) Wie aus Figur 1 und den Eikonaledefinitionen ersichtliche ist, sind die voneinander abhängigen Bildgütefunktionen  $W$  und  $\Delta \mathbf{P}'$  abhängig von der Lage des Bezugspunktes  $P_0$ .

In der in d) angedeuteten Weise sind fast alle Bildgütefunktionen von einem Bezugspunkt oder einer besonderen Ebene (Bildebene oder Meridionalebene), abhängig. Hier zeichnet sich die Kaustik als im Raum nur durch das Strahlenbündel festgelegte Bildgütefunktion besonders aus.

## 3. Diapunkte

Ersetzt man im Unterschied zu (2) in (1) die erste Koordinate von  $\mathbf{p}$ , so erhält man die Durchstoßpunkte der Strahlen durch die Meridionalebene bei Beachtung der Verabredungen gemäß Figure 1 analog zu (2) in der Form

$$\Delta \mathbf{D} = \left( 0, -\frac{\partial W}{\partial v}, -\frac{\partial W}{\partial w} \right) = \mathbf{D} - \mathbf{P}_0. \quad (3)$$

Nach HERZBERGER [3] heißen diese Durchstoßpunkte Diapunkte und besitzen folgende bemerkenswerten Eigenschaften:

a) Im allgemeinen bilden die Diapunkte ein Spotdiagramm in der Meridionalebene. Wegen der besonderen Lage der Meridionalebene zur Lichtrichtung ergeben sich in Sonderfällen (der abbildenden Systeme) linienartige Spots:

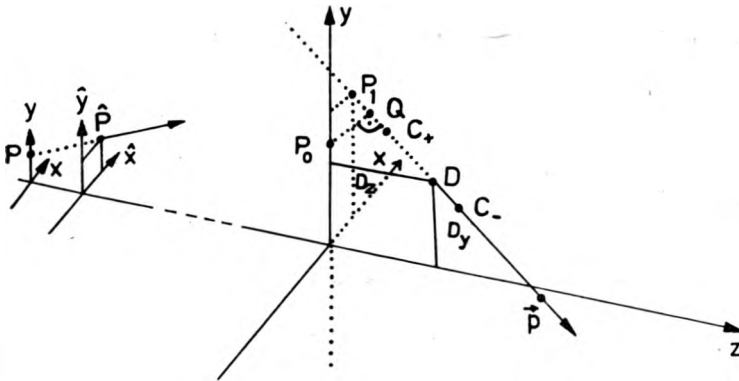


Fig. 1. Zur Geometrie im Bildraum. Die  $z$ -Achse ist in Licht-Richtung orientiert, so daß für den Strahlvektor  $p = (u, v, w)$  mit  $p = n, w > 0$  gilt.  $n$  ist der Brechungsindex des Bildraumes. Die  $y$ -Achse ist so orientiert, daß die  $y$ - $z$ -Ebene die Meridionalebene in rotations-symmetrischen Systemen ist.  $P_0$  ist ein Bezugspunkt in der Bildebene ( $x$ - $y$ -Ebene),  $Q$  ist der zu  $P_0$  gehörige Fußpunkt auf einem beliebigen Lichtstrahl.  $P_1$  ist der Durchstoßpunkt des Strahls durch die Bildebene,  $D$  durch die Meridionalebene (Diapunkt).  $C_+$  und  $C_-$  sind die Berührungspunkte des Strahls mit der Kaustik.  $P(0, y)$  ist der Objektpunkt,  $\hat{P}(\hat{x}, \hat{y})$  der Durchstoßpunkt des Strahls durch eine Auswahlenebene oder die Eintrittspupille

Die Diapunkte liegen auf einer Kurve, wenn gilt

$$\frac{\partial^2 W}{\partial v^2} \frac{\partial^2 W}{\partial w^2} - \left( \frac{\partial^2 W}{\partial v \partial w} \right)^2 = 0. \tag{4}$$

Die Kurve ist eine Gerade, wenn gilt

$$\frac{\partial W}{\partial v} = A(P) \frac{\partial W}{\partial w}. \tag{5}$$

b) Liegen die Diapunkte auf einer Kurve  $C$ , so bilden sämtliche Strahlen durch einen Diapunkt  $D$  mit der Tangente in  $D$  an die Kurve  $C$  den gleichen Winkel. Es bilden sich Strahlenkegel um die Tangente (siehe Figur 2).

Aus a) folgt nach Herzberger eine sehr übersichtliche Bildfehlerklassifikation der stigmatischen Bildfehler:

- Deformationsfehler – allgemeiner Fall,
- Asymmetriefehler – entspricht (4),
- Symmetriefehler – entspricht (5),
- scharfer Bildpunkt – kann Verzeichnung besitzen.

Aus der Strahldurchrechnung lassen sich diese Fehler durch Ausgleichsrechnung über die Begriffe Abweichung von einer besten Kurve, besten Gerade, einem besten Punkt erfassen.

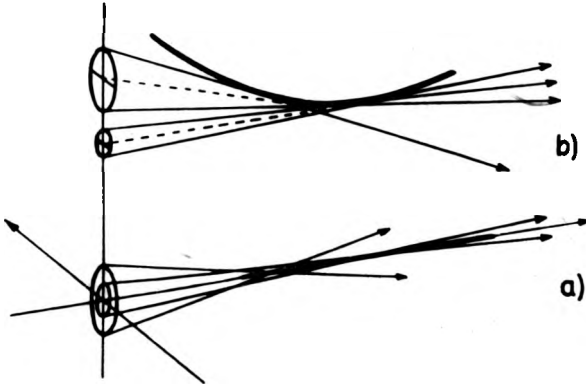


Fig. 2. Symmetriefehler (a) und Asymmetriefehler (b)

Beschränkt man sich auf Bildfehler 3. Ordnung in rotationssymmetrischen Systemen, so läßt sich die bildseitige Strahlrichtung  $(u, v)$  linear mit den Durchstoßpunktkoordinaten in der Eintrittspupille mit Koeffizienten  $a$  und  $\beta$  verbinden.  $u = ax + \beta\hat{x}$ ,  $v = ay + \beta\hat{y}$ . Aus (1), (2) und (3) wird:

$$\begin{aligned} \Delta x' &= -\frac{1}{\beta} \frac{\partial W}{\partial \hat{x}}, & \Delta D_y &= \Delta y' - \frac{\Delta x'}{\beta \hat{x}} (\beta \hat{y} + \alpha y), \\ \Delta y' &= -\frac{1}{\beta} \frac{\partial W}{\partial \hat{y}}, & \Delta D_x &= -\frac{\Delta x'}{\beta \hat{x}} n, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} W &= -\frac{\beta A}{4} (\hat{x}^2 + \hat{y}^2)^2 - \beta B (\hat{x}^2 + \hat{y}^2) y \hat{y} - \frac{\beta C}{2} (\hat{x}^2 + \hat{y}^2) y^2 - \frac{\beta(D-C)}{2} y^2 \hat{y}^2 \\ &\quad - \beta E y^3 \hat{y} + E_0 y^4, \end{aligned}$$

$A, B, C, D, E$  sind den Seidelschen Bildfehlerkoeffizienten proportional.

#### 4. Kaustik

Üblicherweise wird die Kaustik als Hüllfläche des bildseitigen Strahlenbündels definiert. Hieraus folgt für den Ortsvektor  $C_{\pm}$  der Kaustik (siehe Figur 1):

$$\begin{aligned} C_{\pm} &= \mathbf{D} - \frac{L}{2} \mathbf{p} \pm \frac{1}{2} \sqrt{R} \mathbf{p}, \\ L &= 2 \frac{vw}{n^2} \frac{\partial^2 W}{\partial v \partial w} - \frac{n^2 - v^2}{n^2} \frac{\partial^2 W}{\partial v^2} - \frac{n^2 - w^2}{n^2} \frac{\partial^2 W}{\partial w^2}, \\ M &= \frac{n^2 - v^2 - w^2}{n^2} \left[ \frac{\partial^2 W}{\partial v^2} \frac{\partial^2 W}{\partial w^2} - \left( \frac{\partial^2 W}{\partial v \partial w} \right)^2 \right], \\ R &= L^2 - 4M. \end{aligned} \quad (7)$$

Aus (7) liest man drei Eigenschaften ab:

a) Die Kaustik zerfällt in 2 Flächenstücke oder jeder Strahl besitzt mit der Kaustik 2 gemeinsame Punkte.

b) Für meridionale Strahlen fallen die Kaustikpunkte der Fläche  $C_-$  mit den Diapunkten zusammen.

c) Beim Asymmetriefehler degeneriert die eine Kaustikschale zu der linienhaften Diapunktverteilung.

Im Fall der Bildfehlertheorie 3. Ordnung folgt mit den analogen Beziehungen wie im Abschnitt 3. und einer Drehung der Koordinatenachse so, daß die  $z$ -Achse zum Bezugsstrahl (geht durch  $\hat{x} = \hat{y} = 0$  in der Eintrittspupille) parallel liegt, die  $x$ -Achse erhalten bleibt und der Nullpunkt in  $P_0$  liegt:

$$\mathbf{C}_{\pm} = -\frac{1}{\beta} \begin{bmatrix} \frac{\partial W}{\partial \hat{x}} - \frac{1}{2} N \hat{x} \pm \frac{1}{2} \hat{x} \sqrt{K} \\ \frac{\partial W}{\partial \hat{y}} - \frac{1}{2} N \hat{y} \pm \frac{1}{2} \hat{y} \sqrt{K} \\ -\frac{1}{2\beta} N \pm \frac{1}{2\beta} \sqrt{K} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$N = \frac{\partial^2 W}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial \hat{y}^2}, \quad K = \left( \frac{\partial^2 W}{\partial \hat{x}^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial \hat{y}^2} \right)^2 + 4 \left( \frac{\partial^2 W}{\partial \hat{x} \partial \hat{y}} \right)^2.$$

Im Unterschied zur Berechnung der Diapunkte ist die Bestimmung der Kaustikpunkte für einen Strahl aus der Strahldurchrechnung aufwendig und erinnert an die astigmatische Durchrechnung. Von STAVROUDIS [4] stammt ein Formelsatz, der mit der Strahldurchrechnung flächenweise mitgerechnet werden kann und die Hauptkrümmungen der Wellenfläche im Durchstoßpunkt des Strahls durch die brechende Fläche und die Richtung der 1. Hauptkrümmungslinie liefert. Da der jeweilige Krümmungsmittelpunkt der gesuchte Punkt der Kaustik ist, kann so die Kaustik punktweise errechnet werden.

## 5. Charakterisierung der Seidelschen Bildfehler durch Kaustik und Diapunkte

Hier werden nur der Öffnungsfehler und die Koma behandelt, da für Astigmatismus/Bildfeldwölbung die Diapunkte auf einem Geradenstück, der sagittalen Bildlinie liegen, welches zusammen mit der meridionalen Bildlinie die Kaustik liefert und für die Verzeichnung das Diapunktsspotdiagramm und die Kaustik in einen Punkt entarten. Somit liefern nur der Öffnungsfehler und die Koma noch neue Erkenntnisse.

Setzt man in der Wellenaberration die Koeffizienten Null bis auf jenen, dessen Eigenschaften zu untersuchen sind, so ergibt sich folgende Aufstellung aus (6) und (8). Hier liegt jeweils der ideale Bildpunkt im Nullpunkt. Bei den Diapunkten wurde analog zur Kaustik auf das Koordinatensystem transformiert, dessen  $z$ -Achse im Bezugsstrahl liegt (Figur 3).

**Öffnungsfehler:  $A \neq 0$** 

Queraberration:  $\Delta x' = A(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)x,$

$$\Delta y' = A(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)y,$$

Diapunkte:  $\Delta D_y = 0,$

$$\Delta D_z = -\frac{nA}{\beta}(\hat{x}^2 + \hat{y}^2), \quad (9)$$

Kaustik:  $C_+ = -A(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)\{0, 0, 1/\beta\},$

$$C_- = -A(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)\{2\hat{x}, 2\hat{y}, 3/\beta\}.$$

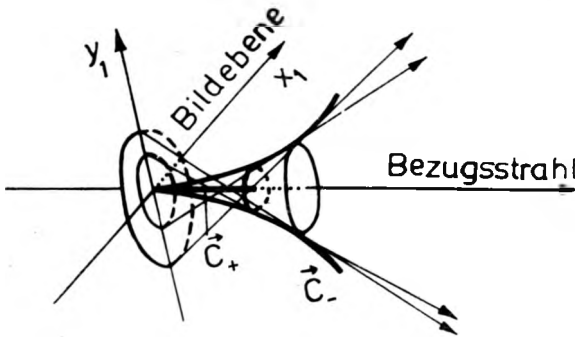


Fig. 3. Queraberration, Kaustik und Diapunkt für den Öffnungsfehler 3. Ordnung. Die Diapunkte liegen auf der Kaustikschale  $C_+$ . Es gilt in der Darstellung  $A < 0$

**Koma:  $B \neq 0$** 

Queraberration:  $\Delta x' = 2By\hat{x}\hat{y},$

$$\Delta y' = By(\hat{x}^2 + 3\hat{y}^2),$$

Diapunkte:  $\Delta D_y = By(\hat{x}^2 + \hat{y}^2),$

$$\Delta D_z = -\frac{2nBy}{\beta}\hat{y}, \quad (10)$$

Kaustik:

$$C_{\pm} = By \left\{ \begin{array}{l} -2\hat{x}\hat{y} \mp 2\hat{x}\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} \\ \hat{x}^2 - \hat{y}^2 \mp 2\hat{y}\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} \\ -\frac{4}{\beta}\hat{y} \mp \frac{2}{\beta}\sqrt{\hat{x}^2 + \hat{y}^2} \end{array} \right\},$$

(siehe Figur 4 und 5).

**Öffnungsfehler und Koma:  $A \neq 0, B \neq 0,$** 

Queraberration:  $\Delta x' = A(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)\hat{x} + 2By\hat{x}\hat{y},$

$$\Delta y' = A(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)\hat{y} + By(\hat{x}^2 + 3\hat{y}^2),$$

Diapunkte:  $\Delta D_y = By(\hat{x}^2 + \hat{y}^2),$   
 $\Delta D_z = -\frac{nA}{\beta}(\hat{x}^2 + \hat{y}^2) - \frac{2nB}{\beta}y\hat{y},$

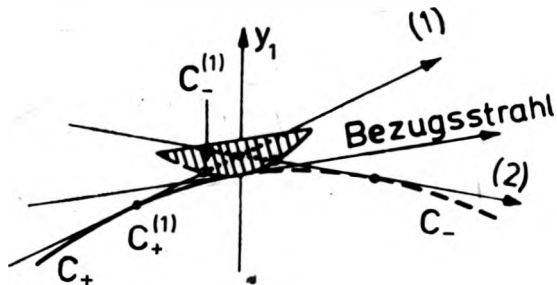


Fig. 4. Kaustik (für Meridionalstrahlen) und Diapunkte (///) für Koma 3. Ordnung und  $By > 0$

Kaustik: 
$$C_{\pm} = \begin{bmatrix} -A(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)\hat{x} - 2By\hat{x}\hat{y} \mp \hat{x}\sqrt{Q} \\ -A(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)\hat{y} + By(\hat{x}^2 - \hat{y}^2) \mp \hat{y}\sqrt{Q} \\ -\frac{2A}{\beta}(\hat{x}^2 + \hat{y}^2) - \frac{4B}{\beta}y\hat{y} \mp \frac{1}{\beta}\sqrt{Q} \end{bmatrix}, \tag{11}$$

$Q := [A(\hat{x}^2 + \hat{y}^2) + 2By\hat{y}]^2 + (2By\hat{x})^2.$

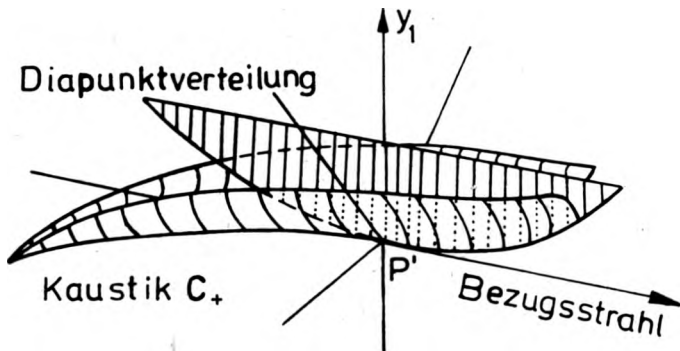


Fig. 5. Räumliche Verteilung der Diapunkte und einer Kaustikschale. Die 2. Kaustikschale ergibt sich durch Spiegelung an der Bildebene. In der Figur gilt  $By > 0, \beta > 0$

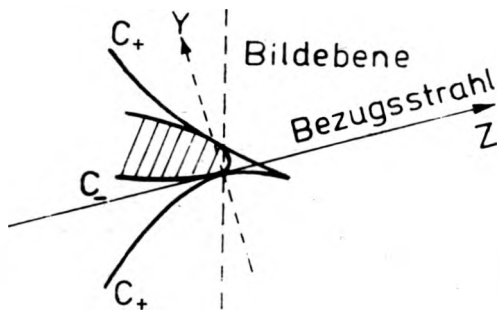


Fig. 6. Meridionale Kaustik und Diapunktverteilung (///) bei Existenz von Koma und Öffnungsfehler 3. Ordnung, qualitativ dargestellt für  $a > 0$

Um einen Überblick zu erhalten, ist es sinnvoll nur die Kaustik der meridionalen Strahlen ( $\hat{x}_1 = 0$ ) zu betrachten. Mit reduzierten Koordinaten gemäß  $Y := y\text{-Koord.}/By$ ;  $Z := z\text{-Koord.}/\beta/2By$  und der Abkürzung  $a = A/2By$  erhält man die Gleichungen (Figur 6):

$$\text{Kaustik } C_+: Y = -4a\hat{y}^3 - 3\hat{y}^2, Z = -3a\hat{y}^2 - 3\hat{y},$$

$$C_-: Y = \hat{y}^2, Z = -a\hat{y}^2 - \hat{y},$$

$$\text{Diapunkte: } Y = \hat{x}^2 + \hat{y}^2, Z = -a(\hat{x}^2 + \hat{y}^2) - \hat{y}$$

## 6. Numerische Resultate

Abschließend werden zwei Photoobjektive unterschiedlicher Abbildungsgüte [5], [6] durch die Eigenschaften Kaustik und Diapunktskonfiguration vorgestellt. Zum Vergleich werden in den Figuren 7 und 8 die üblichen Korrekturdarstellungen gegeben [8] und in den Tabellen 1 die Seidelschen Bildfehlerkoeffizienten [7] 3. Ordnung angegeben.

In den Figuren 9 und 10 ist jeweils der Achsschnitt durch die rotations-symmetrische Kaustik dargestellt, die bei der Abbildung des unendlichen fernen Achspunktes entsteht.

Tabelle 1. Konstruktionsdaten und Seidelkoeffizienten für einen Achromaten [6] und ein Tessar [5]

Achromat: $f = 99,57$ , $1 : 9$ , $w = 17^\circ$ für die Wellenlänge 589,3 nm					
Fl.	$r$	$e'$	$n'$	Öffnungsblende:	
1	21,0	3,0	1,51009	$\hat{s}_3 = 11,5$	
2	-35,0	1,25	1,54869	$\hat{R} = 4,55$	
3	38,82	92,90	1,0		
Tessar: $f = 100,64$ , $1 : 2,8$ , $w = 25^\circ$ für die Wellenlänge 589,3 nm					
Fl.	$r$	$e'$	$n'$	Öffnungsblende:	
1	39,24	10,2	1,69467	$\hat{s}_4 = 4,4$	
2	1496,2	6,0	1,0	$\hat{R} = 14,2$	
3	-76,08	2,8	1,62588		
4	33,47	7,4	1,0		
5	-668,34	2,3	1,52944		
6	40,39	9,5	1,69467		
7	-51,58	81,50	1,0		
Bildfehlerkoeffizienten 3. Ordnung für Abbildung aus dem Unendlichen					
System	I	I	III	IV	V
Achromat	20,0	2,18	-0,29	0,33	-0,36
Tessar	1,5	-0,22	0,16	0,23	0,0044



Für den Feldwinkel  $w = 8,7^\circ$  ist in den Figuren 11 und 12 die Kaustik-Kurve, erzeugt durch die meridionalen Strahlen, und ein Ausschnitt aus der Diapunktverteilung (nicht nur für meridionale Strahlen) gezeichnet. Hierbei wurde die Diapunktverteilung für eine Strahlwahl berechnet, die durch ein Rechteckraster in der Öffnungsblende gegeben ist.

Die Diapunktverteilungen werden nach einem Vorschlag von HERZBERGER [3] mittels Ausgleichsrechnungen mit der „Methode der kleinsten Quadrate“

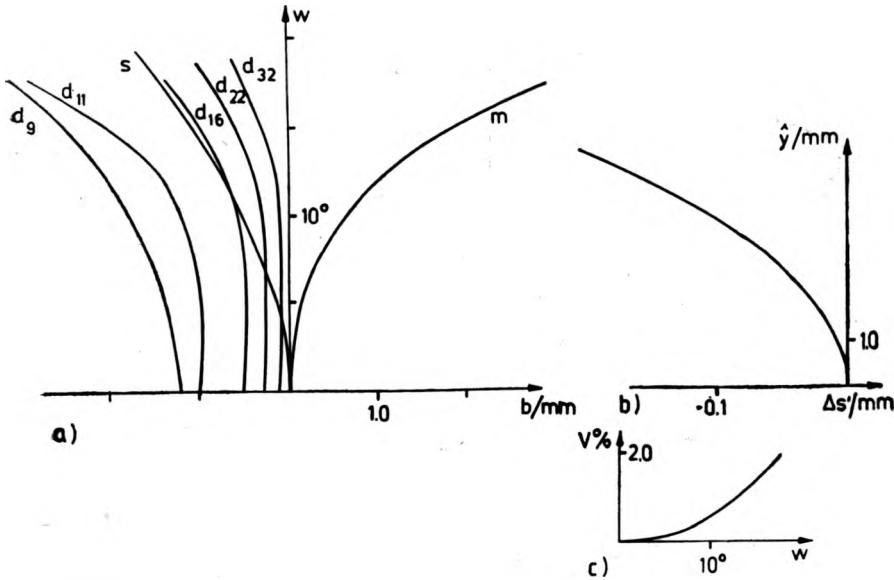


Fig. 7. Korrekturdarstellungen des Achromaten [6]. a) Vergleich der meridionalen (m) und sagittalen (s) Bildschale und der besten Diapunktshalen bei verschiedenen Öffnungen ( $d_0$ ), b) sphärische Längsaberration, c) Verzeichnung

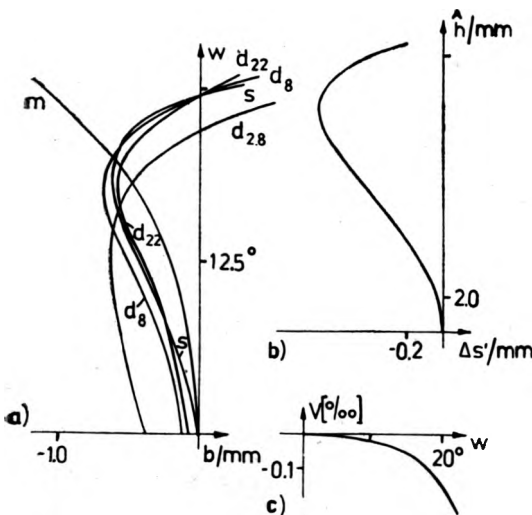


Fig. 8. Korrekturdarstellungen des Tessar [5] mit gleicher Bedeutung der Teilbilder wie in Figur 7

bewertet. Dabei ist der „beste Diapunkt“ der Mittelwert aller Diapunkte (Schwerpunkt), die „mittlere Abweichung“ ist die Wurzel aus der Summe der „Abweichungsquadrate“ vom besten Diapunkt. Im Sinne des Abschnitt 3 wird

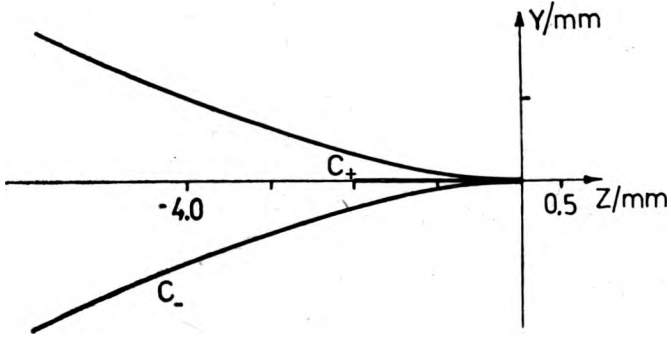


Fig. 9. Axiale Kaustik des Achromaten [6]

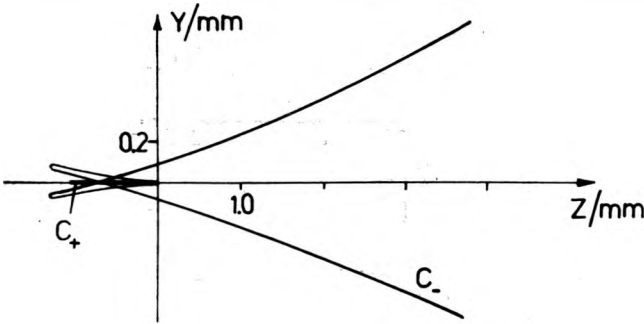


Fig. 10. Axiale Kaustik des Tessars [5]

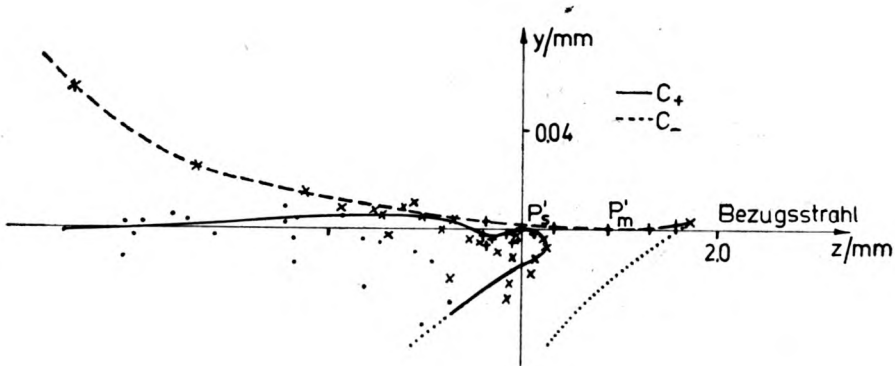


Fig. 11. Meridionale Kaustik und Diapunktverteilung für den Achromaten. Bezogen wird die Darstellung auf den Bezugsstrahl durch den Mittelpunkt der Öffnungsblende. Bildwinkel  $\omega = 8,7^\circ$ . + kennzeichnet Strahlen innerhalb der Öffnung 1 : 22, x kennzeichnet die zusätzlichen Strahlen bis zur Öffnung 1 : 16.  $P'_m$  ist der meridionale  $P'_s$  ist der sagittale Bildpunkt

die beste Gerade und die dazu gehörige mittlere Abweichung sowie die beste Kurve vom Grade  $n$  bestimmt. Hierbei wurde getestet ab welchem Grad das Residuum praktisch konstant blieb. Dieser Wert wird in den Tabellen 2 und 3 mit

angegeben. Getestet wurde bis zum Grad 5. Die Diapunktschalen wurden in Figur 7 und 8 nach Tabelle 2 und 3 aus den besten Diapunkten gezeichnet.

Aus dem Vergleich der Aberrationskoeffizienten und den Figuren 7 bis 12 wird der wesentlich bessere Korrekturzustand des Tessars deutlich. Darüber

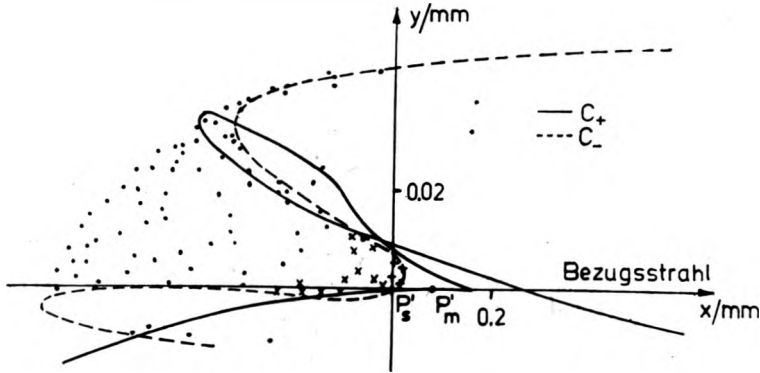


Fig. 12. Meridionale Kaustik und Diapunktverteilung für das Tessar. Bezeichnungen analog Figur 11.  $w = 8,7^\circ$ . + entspricht 1 : 8, x entspricht 1 : 5,5. Die gestrichelten Kurventeile werden durch die Öffnungsblende weggeschnitten

Tabelle 2. Diapunkt aberration für den Achromaten [6]

$w$	$\Omega$	bester Diapunkt		mittl. Abweichung	Abweichung von der		
		$y$	$z$		besten Geraden	besten Kurve	vom Grad
0,00°	32	0,0	-0,12	0,07	0,0		
	22	0,0	-0,27	0,16	0,0		
	16	0,0	-0,48	0,28	0,0		
	11	0,0	-1,01	0,58	0,0		
	9	0,0	-1,16	0,67	0,0		
4,37°	32	-0,012	-0,12	0,14	0,0013	0,0013	2
	22	-0,028	-0,27	0,24	0,0025	0,0025	3
	16	-0,049	-0,48	0,37	0,0040	0,0038	3
	11	-0,098	-0,98	0,70	0,0053	0,0052	3
	9	-0,135	-1,36	1,03	0,0050	0,0049	4
8,69°	32	-0,023	-0,11	0,25	0,0031	0,0026	4
	22	-0,054	-0,27	0,40	0,0065	0,0062	4
	16	-0,100	-0,50	0,56	0,0098	0,0097	4
	11	-0,214	-1,11	0,97	0,0116	0,0114	5
	9	-0,316	-1,65	1,37	0,0120	0,0114	5
12,91°	32	-0,039	-0,13	0,36	0,0047	0,0042	4
	22	-0,114	-0,41	0,53	0,0093	0,0091	4
	16	-0,206	-0,75	0,72	0,0129	0,0129	4
	11	-0,420	-1,52	1,18	0,0167	0,0160	4
	9	-0,605	-2,18	1,61	0,0181	0,0168	3
17,00°	32	-0,144	-0,43	0,35	0,0065	0,0062	3
	22	-0,279	-0,82	0,54	0,0097	0,0097	3
	16	-0,426	-1,23	0,78	0,0136	0,0135	3
	11	-0,757	-2,14	1,26	0,0215	0,0210	3
	9	-1,041	-2,90	1,72	0,0242	0,0231	4

Tabelle 3. Diapunkt aberration für das Tessar [5]

$w$	$\Omega$	bester Diapunkten		mittl. Abweichung	Abweichung von der		vom Grad
		$y$	$z$		besten Geraden	besten Kurve	
0,00°	8	0,00	-0,11	0,095	0,00		
	4	0,00	-0,32	0,246	0,00		
	2,8	0,00	-0,37	0,244	0,00		
8,70°	22	-0,0030	-0,021	0,041	0,0005	0,0000	3
	16	-0,0050	-0,035	0,053	0,0008	0,0000	5
	11	-0,0118	-0,083	0,088	0,0020	0,0019	2
	8	-0,0167	-0,117	0,113	0,0029	0,0028	2
	5,5	-0,0351	-0,247	0,180	0,0056	0,0052	2
	4,0	-0,0511	-0,365	0,218	0,0090	0,0077	2
	3,5	-0,0550	-0,400	0,207	0,0114	0,0096	2
	2,8	-0,0405	-0,340	0,234	0,0140	0,0135	4
	17,02°	22	-0,0039	-0,013	0,060	0,0008	0,0000
16		-0,0063	-0,021	0,076	0,0009	0,0000	5
11		-0,0147	-0,049	0,117	0,0029	0,0027	3
8		-0,0203	-0,067	0,138	0,0046	0,0042	4
5,5		-0,0386	-0,127	0,186	0,0107	0,0094	5
4,0		-0,0430	-0,139	0,191	0,0247	0,0244	5
3,5		-0,0282	-0,094	0,204	0,0342	0,0327	5
2,8		-0,0236	0,064	0,374	0,0337	0,0335	5
24,66°		22	-0,0002	0,002	0,034	0,0032	0,0000
	16	-0,0001	0,004	0,042	0,0025	0,0015	3
	11	0,0010	0,013	0,063	0,0109	0,0090	5
	8	0,0031	0,023	0,076	0,0190	0,0186	5
	5,5	0,0225	0,091	0,138	0,0526	0,0496	5
	4,0	0,0838	0,269	0,360	0,0836	0,0749	5
	3,5	0,1450	0,443	0,551	0,1073	0,0926	5
	2,8	0,2081	0,684	0,725	0,1679	0,1475	5

hinaus ist aus den Ergebnissen folgendes abzulesen:

- Die Diaschalen geben die Tendenz der sagittalen Bildschalen wider.
- Die Korrektur des Öffnungsfehlers bringt in der axialen Kaustik eine komplizierte Faltung der Fläche hervor und damit eine räumliche Konzentration der Lichtintensität auf ein kleines Gebiet.
- Bei größer werdendem Feldwinkel wird durch die Blenden das Strahlenbündel einseitig beschnitten. Diese Wirkung ist in Figur 11 sehr deutlich ausgeprägt, da beim Achromaten bereits für diesen Feldwinkel ein erheblicher Komafehler vorhanden ist und für  $w = 8,7^\circ$  die analytische Bildfehlertheorie 3. Ordnung nicht mehr gilt.
- Aus den Tabellen 2 und 3 ersieht man, daß neben dem Öffnungsoder Symmetriefehler die Deformation erhebliches Gewicht besitzt, wie aus dem Vergleich der Residuen der Ausgleichsgeraden und besten Kurve zu erkennen ist.

**Literatur**

- [1] PИCHT J., *Optische Abbildung*, Braunschweig 1931.
- [2] LUNEBURG R. K., *Mathematical Theory of Optics*, Berkeley 1966.
- [3] HERZBERGER M., *Optica Acta* 15 (1968), 201–221. HERZBERGER M., *Symmetry and asymmetry in optical images*, [in] R. K. Luneburg, *Mathematical Theory of Optics*, Berkeley 1966, S. 440.
- [4] STAVROUDIS O. N., *J. Opt. Soc. Am.* 66 (1976), 1330–1333.
- [5] Schweizer Patent Nr. 299 767. *Photographisches Objektiv*, Ann. Zeiss-Opton, Oberkochen (Zit. nach Hildebrand K., Diss. Zürich 1967).
- [6] USA Patent Nr. 1643 865/1924, *Photographisches Objektiv* (Zit. nach [8]).
- [7] BEREK M., *Grundlagen der praktischen Optik*, W. de Gruyter, Berlin und Leipzig 1930.
- [8] MERTE M., RICHTER R., ROHR M., *Das photographische Objektiv*, J. Springer, Wien 1932.

*Received May 27, 1985*

**Характеристика погрешностей отображения оптических систем путем каустики и конфигурации диапунктов**

Исходя из первоначальных aberrаций, автор аналитически представил функция качества изображения каустики и диапунктов, а также обсудил их выделение из коэффициентов aberrации Зайдля для систем с вращательной симметрией. Эти связи продемонстрированы на практических примерах при помощи перерасчетов радиусов.