

Optische Systeme ohne Rotationssymmetrie: Bestimmung von Bildlage und Bildorientierung

Matthias Hillenbrand*, Beate Mitschunas*, Jürgen Werner*, Stefan Sinzinger*,
Rania H. Abd El-Maksoud**

*Fachgebiet Technische Optik, IMN MacroNano®, Technische Universität Ilmenau

**Physics Department, Faculty of Science, Ain Shams University

<mailto:matthias.hillenbrand@tu-ilmenau.de>

Wir präsentieren verallgemeinerte parabasale Berechnungsansätze für plansymmetrische Systeme, die u.a. eine Ermittlung der astigmatischen Bild- und Pupillenebenen sowie deren Orientierung erlauben. Zusätzlich geben wir einen Ausblick, wie diese Berechnungsansätze auf symmetriefreie Systeme erweitert werden können.

1 Einführung

Durch den Verzicht auf Symmetrieforderungen stehen beim Design optischer Systeme zusätzliche Freiheitsgrade zur Verfügung. Diese können einerseits zur Korrektur von Abbildungsfehlern genutzt werden. Andererseits erlauben sie die Entwicklung hochkompakter, auf konkrete Abbildungsaufgaben zugeschnittener Systeme und erschließen neue Anwendungsfelder wie z.B. das Wavefront Coding, für die symmetriefreie Flächen zwingend erforderlich sind. Typische Anwendungsbeispiele reichen von planar-integrierten Systemen über Off-Axis Spiegelsysteme für die UV- und EUV-Lithografie bis hin zu Augmented-Reality-Systemen.

Ein wesentliches Ziel besteht in der Entwicklung von allgemeingültigen Designstrategien für symmetriefreie Systeme, die eine systematische Erschließung des deutlich vergrößerten Lösungsraumes gestatten. Analog zu den paraxialen Abbildungsmodellen, die in ihrer Gültigkeit auf rotationssymmetrische Systeme beschränkt sind, diskutieren wir erweiterte astigmatische Strahldurchrechnungsansätze für plansymmetrische Systeme, die u.a. die direkte Berechnung der Lage und Orientierung der Bild- und Pupillenebenen gestatten.

2 Parabasale Abbildungsbeziehungen

Ausgangspunkt für die nachfolgenden Betrachtungen ist die Definition eines Basisstrahls, der durch das Zentrum des Objektes und das Zentrum der Eintrittspupille verläuft und als Ersatz für die optische Achse rotationssymmetrischer Systeme dient. Durch die Beschränkung auf die differentielle Umgebung des Basisstrahls lassen sich vereinfachte parabasale Abbildungsbeziehungen herleiten (griech. para = neben, bei; d.h. enge Umgebung des Basisstrahls).

Der Basisstrahl trifft im Allgemeinen schräg auf die optischen Flächen, wodurch bereits in dessen

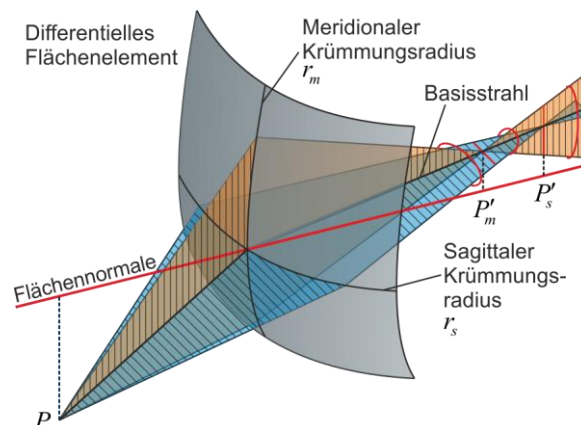


Abb. 1 Astigmatismus an einer optischen Wirkfläche mit den lokalen Krümmungsradien r_m und r_s

differentieller Umgebung Astigmatismus auftritt. Dies bedeutet, dass Strahlen, die ausgehend von einem Objektpunkt P auf dem Referenzstrahl in unterschiedlichen Schnittebenen auf die optische Fläche treffen, sich bildseitig in verschiedenen Bildpunkten schneiden (Abb. 1). Besondere Aussagekraft besitzen hierbei Meridional- und Sagittalebene, die mit den Extrema der Bildpunkt-lagen korrelieren. Die Meridionalebene enthält den Basisstrahl und die Normale der optischen Fläche, während die Sagittalebene den Basisstrahl enthält und senkrecht auf der Meridionalebene steht. Bei plansymmetrischen Systemen entspricht die Meridionalebene der Symmetrieebene.

Die Lage der meridionalen und sagittalen Bildpunkte P'_m und P'_s kann direkt über die Coddington-Gleichungen berechnet werden [1]. Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich aus Platzgründen auf eine reflektierende Fläche, sind aber analog auf brechende Flächen übertragbar. Für die Lage der meridionalen und sagittalen Bildpunkte gilt nach [1]:

$$\varepsilon' = -\varepsilon \quad (1)$$

$$l'_m = \frac{l_m r_m \cos \varepsilon}{2l_m - r_m \cos \varepsilon}; \quad l'_s = \frac{r_m l_s}{2l_s \cos \varepsilon - r_m} \quad (2)$$

Zur Bestimmung der Neigung der Bildebenen wird der Objektpunkt um einen differentiellen Betrag in der Objektebene verschoben (Abb. 2). Diese Verschiebung lässt sich durch die Komponenten dl entlang und dv senkrecht zum Basisstrahl ausdrücken. Als Folge verändert sich auch die Lage der meridionalen und sagittalen Bildpunkte um die Komponenten dl' und dv' . Ein analytischer Zusammenhang zwischen den bild- und objektseitigen Komponenten kann mit Hilfe der totalen Differentiale der Gl. (1-2) hergestellt werden. Bei vorgegebener Neigung $\tan \delta = dl/dv$ der Objektebene sind mit $\tan \delta' = dl'/dv'$ die Neigungen der meridionalen und sagittalen Bildebenen direkt berechenbar:

$$\tan \delta'_m = \frac{l'_m}{l_m} \tan \delta_m - \frac{2l'_m \tan \varepsilon}{r_m \cos \varepsilon} \quad (3)$$

$$\tan \delta'_s = \frac{l'_s}{l_s} \tan \delta_s + \frac{2l'_s \sin \varepsilon}{r_s} \quad (4)$$

Gleichwertige Beziehungen wurden von Ott in [2] veröffentlicht.

3 Vergleich mit numerischer Berechnung

Zur Kontrolle der analytischen Gleichungen dient das Beispiel eines sphärischen Einzelspiegels mit einem Radius von -40mm . Die Objektebene besitzt einen Abstand von $l_m = l_s = -60\text{mm}$ zum Spiegel, während der Winkel ε zwischen dem Basisstrahl und der Flächennormale 30° beträgt. Die Berechnungsergebnisse für verschiedene Neigungswinkel δ der Objektebene sind in Tab. 1-2 dargestellt und werden dort mit den Ergebnissen einer numerischen Optimierung verglichen, bei der die Lage und Orientierung der Bildebene freigegeben wurde. Mit einer maximalen Abweichung von $1,1 \cdot 10^{-3} \%$ stimmen die Ergebnisse der analytischen Berechnung dabei sehr gut mit der numerischen Kontrollrechnung überein.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine parabasale Theorie für plansymmetrische Systeme vorgestellt, die eine zuverlässige Bestimmung der Lage und Orientierung der meridionalen und sagittalen Bild- und Pupillenebenen gestattet. Im Rahmen der bisherigen analytischen Betrachtungen wurde dabei stets davon ausgegangen, dass die Blende mit der optischen Fläche zusammenfällt. Die Berücksichtigung allgemeiner Blendenlagen ist Gegenstand weiterführender Untersuchungen.

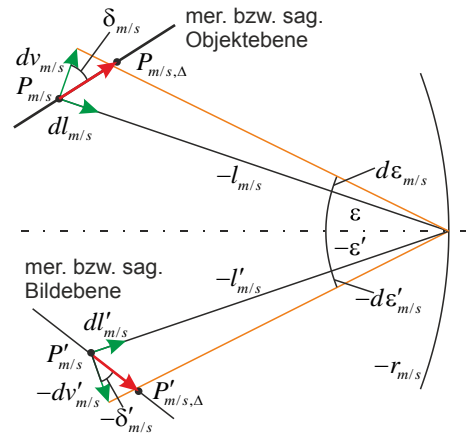


Abb. 2 Auswirkung einer differentiellen Verschiebung des Objektpunktes auf die Verschiebung des Bildpunktes

	l'_m in mm	l'_s in mm
analytisch	-38,185397	-68,301270
numerisch	-38,185395	-68,301270

Tab. 1 Analytische und numerische Ergebnisse für die Lage der meridionalen und sagittalen Bildebenen

Neigung	$\delta'_{m, \text{analyt}}$ in $^\circ$	$\delta'_{m, \text{num.}}$ in $^\circ$	$\delta'_{s, \text{analyt.}}$ in $^\circ$	$\delta'_{s, \text{num.}}$ in $^\circ$
$\delta_m = 0^\circ$	-45,518849	-45,518848	53,793977	53,794037
$\delta_m = 30^\circ$	-30,000000	-30,000000	65,103909	65,103907
$\delta_m = 45^\circ$	-14,282380	-14,282379	69,896091	69,896109

Tab. 2 Analytische und numerische Ergebnisse für die Neigung der meridionalen und sagittalen Bildebenen bei Vorgabe verschiedener Objektebenenneigungen

Die vorgestellten skalaren Beziehungen sind nur auf plansymmetrische Systeme anwendbar. Vollständig symmetriefreie Systeme machen den Übergang zu einer vektoriellen Beschreibung erforderlich. Als Ausgangspunkt für die Untersuchung solcher Systeme kann das differentielle Raytracing dienen [3].

5 Danksagung

Die Autoren danken dem BMBF sowie dem TMBWK für die Förderung der vorgestellten Untersuchungen im Rahmen des „Kompetenzdreieck Optische Mikrosysteme – OptiMi“ (FKZ: 16SV5473) und der „Graduate Research School on Optical Microsystems Technology (OMITEC)“ (FKZ: PE 104-1-1).

Literatur

- [1] H. Haferkorn, „Bewertung optischer Systeme“, Dt. Verl. der Wiss. (1986)
- [2] P. Ott, „Imaging with tilted surfaces: an efficient matrix method for the generalized Scheimpflug condition and its application to rotationally symmetric triangulation“ in J. Opt. Soc. Am. A 22, 1077-1085 (2005)
- [3] O. N. Stavroudis, „The optics of rays, wavefronts and caustics“, Acad. Press (1972).