

Die Lichtverteilung und ihre Beeinflussung durch Aberrationen

Joerg Sprenger

Carl Zeiss CMP GmbH

joerg.sprenger@zeiss.com

Während man in der abbildenden Optik bestrebt ist, möglichst alle Aberrationen zu minimieren bzw. zu beseitigen; stellt sich mit Blick auf eine homogene Beleuchtungsanforderung die Frage, mit welchen Aberrationen (insbesondere Pupillenaberrationen) man der natürlichen Vignettierung begegnen kann.

1 Einführung

Die bei größeren Strahlwinkel auftretende Reduzierung der Beleuchtungsstärke E ist ein seit langem diskutiertes Problem. Während man für die Beleuchtung bei parallel stehenden Sender- und Empfängerflächen, sowie ausgehend von einem Lambertstrahler als Quelle zu einer $\cos^4$ -Verteilung (der natürlichen Vignettierung) gelangt, gestaltet sich die analytische Bestimmung beim Vorhandensein eines optischen Systems zwischen beiden Ebenen schwieriger. Zwar können die Eintritts- bzw. Austrittspupille wieder als Empfänger- bzw. Quellen-Ebene angesehen werden, jedoch treten bei ihrer Abbildung Aberrationen auf. Anhand von Anwendungsbeispielen soll der Einfluss für zwei verschiedene Abbildungsfehler dargestellt werden, dabei wird bei allen Betrachtungen von rotationssymmetrischen Systemen ohne jegliche Absorption-/Reflektionsverluste ausgegangen.

2 Beeinflussung mittels der Verzeichnung

Verglichen werden zwei Systeme jeweils mit einer Brennweite $f_0' = 30\text{mm}$ bestehend aus 4 Linsen mit einer innenliegenden Blende. Für die Berechnung der ‚relativen Illumination‘ wird ZEMAX verwendet und ein Objekt im Unendlichen angenommen; zusätzlich ist in Abb.1 der Verlauf der $\cos^4$ Funktion über den objektseitigen Feldwinkel w dargestellt. Der Unterschied in der rel. Beleuchtungsstärke zwischen

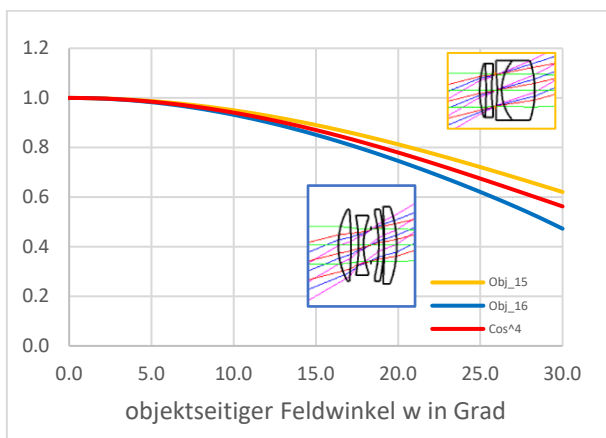


Abb.: 1 Relative Beleuchtungsstärke $E_{rel}(w)$

beiden Objektiven liegt bei einem Feldwinkel von 30° bei ca. 15%, und ist auf die Auswirkung unterschiedlicher Verzeichnungen zurückzuführen. Die Verzeichnung, die bei erfüllter Tangensbedingung vor allem von der sphärischen Korrektur der Blenden- bzw. Pupillenabbildung abhängt, ist bei Linsensystem Obj_15 aufgrund der Kittflächen positiv, bei Linsensystem Obj_16 negativ aufgeführt. Für die Verzeichnung bzw. den Verlauf der Hauptstrahlen bedeutet das eine Verlagerung der Bildpunkte nach innen und damit eine tonnenförmige Verzeichnung für Linsensystem Obj_15 und eine kissenförmige Verzeichnung bei Linsensystem Obj_16, Abb.2. illustriert das Verhalten. Durch diese Umverteilung der Bildpunkte konzentriert sich in einem Fall die Beleuchtungsstärke zum Rand hin, während im anderen Fall eine Zerstreuung auftritt.

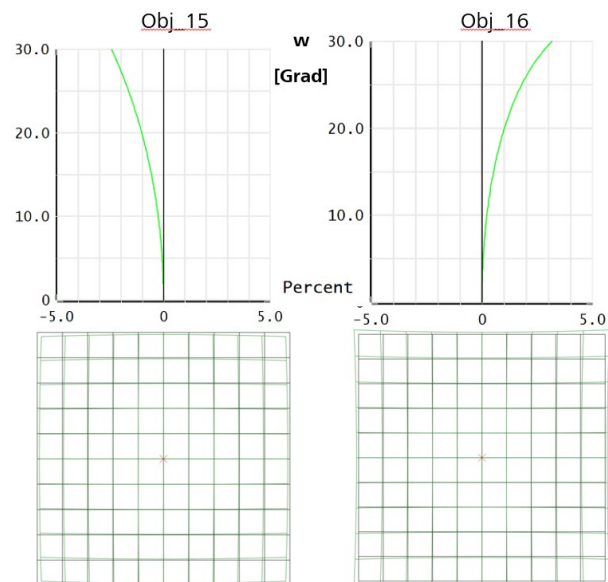


Abb.: 2 Verzeichnungsdarstellung in Prozent/ als Gitter

Dieser Einfluss der Verzeichnung auf die Beleuchtungsstärke lässt sich auch analytisch ableiten, hier sei auf eine Arbeit von E. Wandersleb verwiesen [2], sowie auf eine neuere Veröffentlichung [1] in der der Pupillen-Abbildungsmaßstab β_p bzw. das inverse Winkelverhältnis des Hauptstrahlwinkels in die abgeleitete Formel eingeht. Bei der Formel von Wandersleb ist die Verzeichnung V_w in Abhängigkeit vom

Feldwinkel w über die Brennweite $f_w = y_w / \tan(w)$ ausgedrückt im Gegensatz zur paraxialen Brennweite f_0 .

$$E_{rel}(w) = \cos \left(\operatorname{atan} \left(\tan(w) \left\{ \frac{1}{\beta_p} + V_w \right\} \left\{ \frac{1}{V_w + 1} \right\} \right) \right)^4 \quad (1)$$

In Formel (2) ist neben den absoluten Werten auch der Verlauf der Verzeichnung über den Differentialquotienten df_w/dw enthalten:

$$E_{rel}(w) = \left(\frac{f_0}{f_w} \right)^2 \frac{\cos(w)^4}{1 + \frac{1}{2} \frac{df_w}{dw} \sin(2w)} \quad (2)$$

Tabelle 1 zeigt den Vergleich der 3 Rechnungen.

	w	β_p	V_w/f_w	$E_{rel}(1)$	$E_{rel}(2)$	ZEMAX
Obj_15	30°	1.07	- 2.5%/ 29.23	0.60	0.62	0.62
Obj_16	30°	0.94	+3.3%/ 30.99	0.53	0.49	0.47

Tab. 1 Vergleich der Modellrechnungen

3 Beeinflussung mittels der Pupillencoma

Ein weiteres Mittel die Beleuchtungsstärke am Feldrand zu erhöhen, ist die Vergrößerung der Ein- bzw. Austrittspupille mit zunehmenden Feldwinkel. Dazu soll ein bekanntes Objektiv, das Russar-22 – Abb. 3 untersucht werden. Es handelt sich um ein nahezu symmetrisches System mit verschwindendem Verzeichnungsfehler. Aus diesem Grund soll die Betrachtung der Blendenabbildung in Ein- und Austrittspupille als identisch abgenommen werden, und im Weiteren nur die Abbildung in die Austrittspupille analysiert werden. Dargestellt in Abb. 3 ist der Abbildungsstrahlengang, sowie in der Ebene der Austrittspupille AP der durch die Randstrahlen begrenzte Bereich für den Achspunkt AP(F1) und der vergrößerte ovale Bereich für Feldpunkt AP(F2). Um die Ursache für diese ovalen Erweiterung zu erkennen, wechseln wir in den Pupillenstrahlengang, bilden also die Blende in die Austrittspupille ab, die Bildebene wird zur Aperturblende und wir bestimmen für drei verschiedene Aperturringe die Zerstreu-

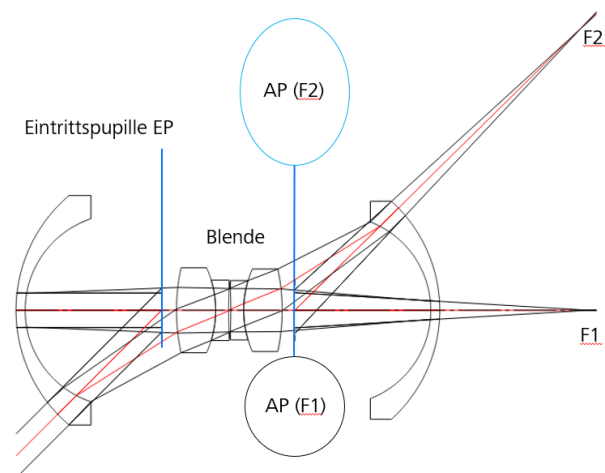


Abb.: 3 Russar-22, US 2,516,724; M.M. Rusinov

ungsfiguren in der Bildebene, hier der Austrittspupille AP, (siehe die farbigen Ringe in Abb. 4). Man erkennt an der Position und Größe der Figuren, dass es sich um eine starke Aussenkoma handelt. Berücksichtigt man noch, dass bei der Ermittlung des ovalen Bereichs in Abb. 3 nur ein Bildpunkt betrachtet wurde und kein kompletter Ring, so wird als Randstrahl jeweils nur ein Punkt aus der äußersten Zerstreuungsfigur in Frage kommen. Dieser Punkt wurde in Abb. 4 sowohl für viele als auch für vier exemplarische Blendenpunkte eingezeichnet und ergibt als Kurve die vergrößerte ovale Begrenzung.

Das Vorhandensein zusätzlicher sphärischer Aberration führt dazu, dass sich der Doppelring der primären Koma seitlich verdreht und damit eine weitere Unsymmetrie in der Berandung der Austrittspupille AP(F2) entsteht.

Für weitere über die Bildfehlertheorie abgeleitete Zusammenhänge zwischen der relativen Beleuchtungsstärke und den Bild- bzw. Pupillenaberrationen sei auf eine Veröffentlichung von D. Reshidko u. J. Sasian [3] verwiesen.

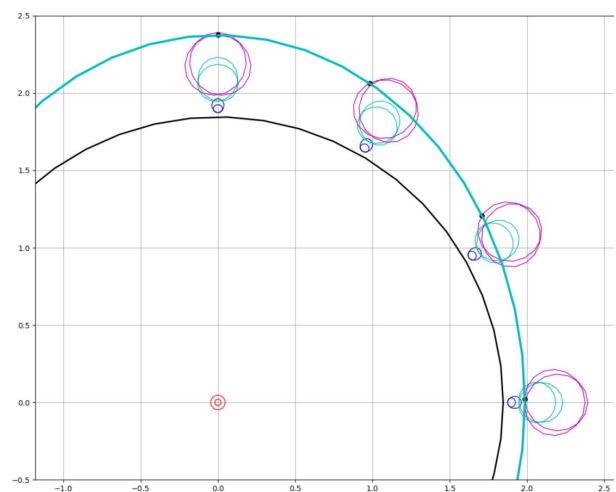


Abb.: 4 Austrittspupille mit Zerstreuungsfiguren bei konstanten Pupillendurchmessern, d.h. hier Bildkreisdurchmesser

Literatur

- [1] T.P. Johnson, Jose Sasian; Image distortion, pupil coma, and rel. illumination, Applied Optics 2020
- [2] Ernst Wandersleb, Die Lichtverteilung im Grossen in der Brennebene des photographischen Objektivs, Scientia Photographica 1952
- [3] D. Reshidko, Jose Sasian; Role of aberrations in the rel. illumination of a lens system, SPIE Opt.Eng. 55, 2016