



Bildkosmetik

Wie die automatisierte Qualitätskontrolle von Abbildungsobjektiven schnell und einfach gelingt

■ Norbert Harendt, Hutthurm

Die detaillierte Prüfung von Optiken ist noch immer sehr zeitaufwändig. Zur Spezifikation ihrer Abbildungseigenschaften werden deshalb in der Regel die Daten der optischen Berechnung verwendet. Messmethoden, die die Maßhaltigkeit von CCD-Sensoren ausnutzen und computergestützt die Bilder eines geeigneten Targets vermessen, sind hier klar im Vorteil. Derartige Messgeräte empfehlen sich sogar für die automatisierte Qualitätskontrolle von Messobjektiven.

Seit Einführung der telezentrischen Objektivs in die Messtechnik steigt der Qualitätsanspruch ständig. Daher wird eine detailliertere Beurteilung ihrer Abbildungseigenschaften immer wichtiger. Herkömmliche Verfahren zur Qualitätsbeurteilung sind nicht geeignet, die Abbildungsstreuung von Objektiven in ihrem

HERSTELLER

Ingenieurbüro Klaus Eckerl,
94116 Hutthurm,
Tel. 0 85 05 /32 22,
Fax 0 85 05 /34 00,
www.ib-eckerl.de

gesamten Bildbereich zu quantifizieren [1-4]. Die manuelle Vorgehensweise bei der Datengewinnung (zusammengehörige Wertepaare objekt- und bildseitiger Koordinaten, möglichst bei unterschiedlichen Arbeitsabständen; MTF-Aufnahmen an beliebigen Feldpositionen) ist nur für ausgewählte Bildbereiche und Objektive praktikabel, jedoch nicht für den gesamten Bildbereich einer großen Anzahl an Objektiven. Die erforderliche große Menge an Daten, die zur Abbildungskorrektur eines Objektivs benötigt wird, können solche Verfahren auf keinen Fall liefern (Bild 1).

Hier bietet es sich an, die Maßgenauigkeit von CCD-Sensoren auszunutzen und Daten zur Verzeichnung eines Objektivs durch computergestützte Vermessung des Bilds eines geeigneten Targets (siehe Bild 1) zu erhalten. Ein solches Verfahren konnte mit dem Messsystem »OptoMess« realisiert werden. Damit wird eine Quantifizierung auch bei unterschiedlichsten Arbeitsabständen möglich und ausreichendes Datenmaterial geliefert. Diese Vorgehensweise erlaubt es, Abbildungsobjektive zur Steigerung ihrer Abbildungsstreuung softwaregestützt zu kor-

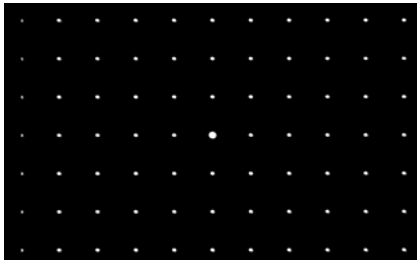


Bild 1. Das »OptoMess«-Kombinationstarget ermöglicht MTF- und Verzeichnungsmessungen

rigieren. Der Zeitbedarf für die Datenaufnahme ist zudem so gering, dass ein Einsatz solcher Messgeräte in der Produktion zur automatisierten Qualitätskontrolle von Messobjektiven denkbar ist.

Das Qualitätsmerkmal MFT

Die Beschränkung der Kenngrößen zur Quantifizierung einer optischen Abbildung auf die im Folgenden genannten (MTF, Verzeichnung und Telezentrie) bedeutet letztendlich keine Einschränkung, da die hier nicht genannten Abberationen zu einer Verschlechterung der Punktabbildung und somit der Modulationsübertragungsfunktion MTF führen. Bei dem so genannten Koma beispielsweise wird ein Punkt kometenhaft unsymmetrisch zerstreut, was die Detektion einer wahren Kante erschwert. Mithilfe unterschiedlicher Objektweiten wird schließlich auch eine leichte Defokussierung im Bild hervorgerufen. Gepaart mit den Abberationen der Objektive ergeben sich als Bild mehr oder weniger verwaschene Kanten unterschiedlicher Größe [5]. Ausgehend von der Modulation der Gleichung 1 (Kasten) einer strahlungstechnischen Größe I gelangt man zu der Modulationsübertragungsfunktion T(R) in Abhängig-

keit der Ortsfrequenz R (Gleichung 2). Die üblichen Messverfahren für die MTF sind nur bei inkohärenter monochromatischer Beleuchtung realisierbar [6]. Der Objektbereich wird dabei zeitraubend mittels eines Spalts abgetastet. Zur Genauigkeitssteigerung wird dieser Vorgang mit dem erzeugten Bild wiederholt.

Manuelles Einrichten entfällt

Für die Einrichtprozeduren und die Messung wird allerdings entsprechend qualifiziertes Personal benötigt. Mit OptoMess hingegen werden MTF-Messungen am gleichen Target wie die restlichen Untersuchungen durchgeführt, das heißt in One-Shot-Technik im gesamten Bildfeld mit Weißlicht oder spektral beliebig gefiltertem Licht (Bild 1). Somit sind schnelle Messungen möglich; qualifiziertes Personal ist hierbei nur im Teach-in-Modus vonnöten. Ein Beispiel für eine MTF-Messung ist in Bild 2 dargestellt.

Eine optische Abbildung wird in erster Näherung mittels des paraxialen Abbildungsmaßstabs β beschrieben. Für die Abbildung der Objektkoordinaten der Höhe h auf Bildkoordinaten der Höhe h' gilt Gleichung 3. Die Verzeichnung beschreibt dabei den Effekt, dass sich der Abbildungsmaßstab bei einer abbildenden Optik in der Regel im Bildfeld ändert – symmetrisch als Folge von Designbeschränkungen und asymmetrisch auf Grund von Fertigungsfehlern (Gleichung 4). Die zugrunde liegende DIN 58187 (Qualitätsbewertung optischer Systeme) beschränkt sich jedoch auf eine rein radialsymmetrische Beschreibung der Verzeichnung, die zudem auf Grund von gerätetechnischen Details nur an wenige

Gleichungen

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

$$T(R) = \frac{M_{\text{Bild}}}{M_{\text{Objekt}}} \quad (2)$$

$$\beta' = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h'}{h} \quad (3)$$

$$V_a = h' - \beta'h \quad (4)$$

$$V_r(r) = 100 (a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6) \quad (5)$$

$$\text{Telezentrie-fehler} = \frac{\text{Änderung der scheinbaren Objektgröße}}{\text{Änderung des Objektstandes}} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{\Delta x}{\Delta z} \quad (7)$$

$$\tau' = \frac{\Delta x'}{\Delta z} \quad (8)$$

$$[\tau] = [\tau'] = 1 \frac{\mu\text{m}}{\text{mm}} \text{ 1mrad} \quad (9)$$

sche Verzeichnungen und Änderungen des Arbeitsabstands zu integrieren [7]. Die relative Verzeichnung kann im Rahmen eines solchen Modells wie in Gleichung 5 angegeben werden.

Bild 3 zeigt exemplarisch die absolute Verzeichnung im Bildraum eines hochwertigen Objektivs in der gängigen Darstellungsweise. Aufschluss über asymmetrische Fehler liefert dann die ermittelte überhöhte Darstellung der Verzeichnungen der einzelnen Messpunkte (Bild 4).

Telezentriefelder quantifizieren

Abbildungsobjektive, die nur quasi paralleles Licht zur Bilderzeugung zulassen, indem die Eintrittspupille ins (fast) Unendliche gelegt wird, nennt man te- >>

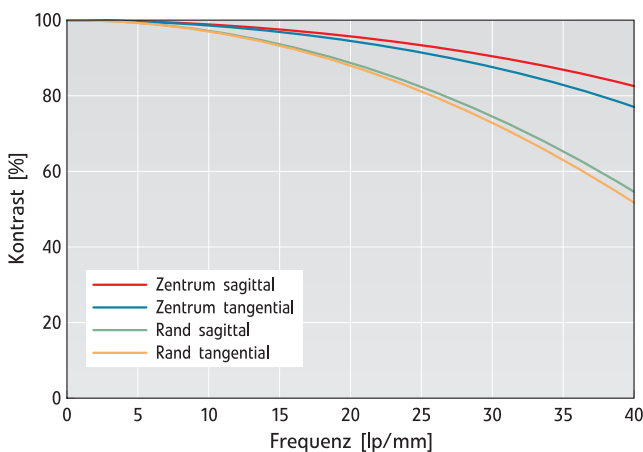


Bild 2. Darstellung der MTF: Hier ist die Modulation über der Ortsfrequenz für zwei Bildhöhen aufgetragen

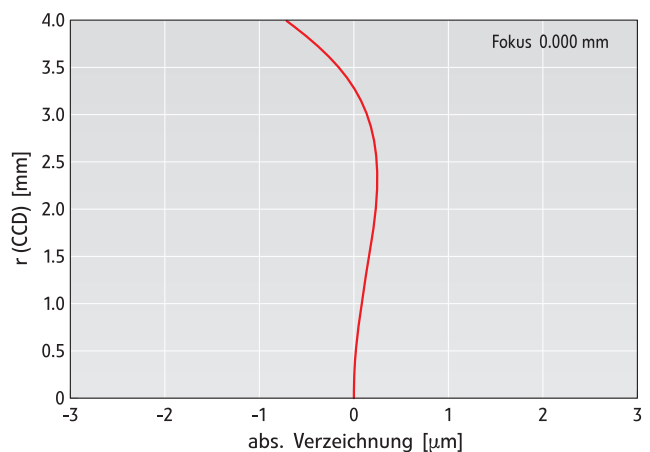


Bild 3. Darstellung der absoluten Verzeichnung eines hochwertigen Objektivs im Bildraum

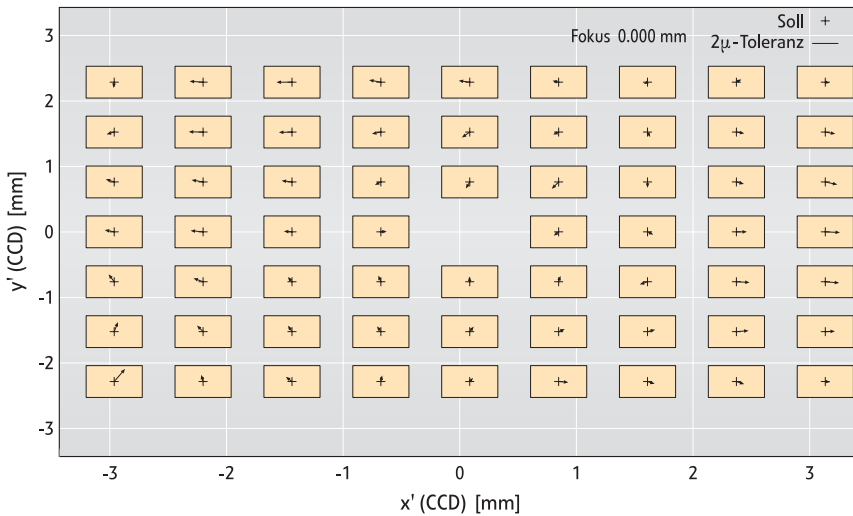


Bild 4. Überhöhte Darstellung der absoluten Verzeichnung im Bildraum: Die Pfeile entsprechen der an den Messpunkten ermittelten Verzeichnung, deren Skalierung durch Rechtecke von $\pm 2 \mu\text{m}$ verdeutlicht wird

lezentrische Objektive. Sie haben die Eigenschaft, dass eine Abstandsvariation des abzubildenden Objekts auf Grund der parallelen Strahlengänge keine Änderungen im Bild verursacht. Telezentrie ist immer dann gefordert, wenn in der Tiefe gestaffelte Messobjekte unabhängig vom Arbeitsabstand exakt zu vermessen sind und dabei hochgenaues Positionieren des Messobjekts vermieden werden soll. Telezentrie ist dann zweckmäßig, wenn Abbildungen mit großem Feldwinkel zu starkem Randabfall der Lichtintensität führen würden oder Abschattung auftritt, beispielsweise bei Abtastung von LCD-Anzeigen und Beobachtung von groben Strukturen mit steilen Flanken (Schatten). Weil eine ideal telezentrische Optik extrem wenig Licht zur Abbildung zulässt, ist in der Praxis die Abgrenzung telezentrischer Objektive von nicht telezentrischen nicht scharf umrissen. Um einen optimalen Kompromiss zwischen Telezentrie und Lichtempfindlichkeit zu erzielen, muss der Bereich der Telezentrie

je nach Messaufgabe individuell ermittelt werden. Als Arbeitsgrundlage kann hier die Definition aus Gleichung 6 gelten.

Der Telezentriefehler lässt sich als Pseudowinkel im Objektraum (Gleichung 7) und Bildraum (Gleichung 8) angeben. Die Winkeleinheit 1 mrad (Gleichung 9) gibt demnach also die Größenänderung in Mikrometer an, um die sich ein Bild – oder ein Objekt – scheinbar ändert, wenn sich der Arbeitsabstand um einen Millimeter verschiebt. Bild 5 zeigt die Telezentriefehler für zwei Makroobjektive: das nicht telezentrische Makro-Objektiv 0.5x weist mit 50 mrad einen 10fach größeren Telezentriefehler auf als ein vergleichbares telezentrisches Objektiv.

Exaktes Spezifizieren der Abbildungsleistung

Zurzeit ist es in der Optikfertigung die Regel, auf den Datenblättern als Kenndaten abbildender Optiken das anzugeben, was die Auslegung der optischen Rech-

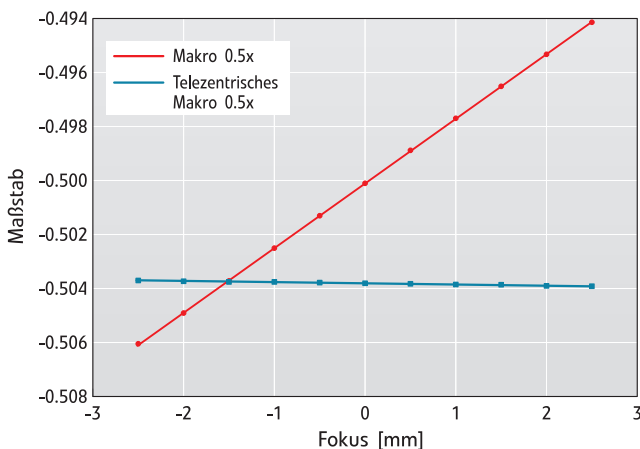


Bild 5. Darstellung der Telezentriefehler für zwei Makro-Objektive: Aufgetragen ist die Maßstabsänderung über der Änderung des Arbeitsabstands

nung erwarten lässt. Eine messtechnische Bestätigung der Abbildungsleistung wird in der Regel nicht durchgeführt, da MTF-Messungen nur in Stichproben, Verzeichnungs- und Telezentriemessungen hingegen überhaupt nicht stattfinden. Sowohl die Reproduzierbarkeit von Messungen als auch ihre Rückführbarkeit auf Standards erfordert natürlich eine exakte Spezifizierung der Abbildungsleistung des eingesetzten Objektivs. Da solche Daten nicht ausreichend vorhanden sind, werden oft Vergleichsmessungen mit taktilen Systemen durchgeführt, um die Stabilität des optischen Messaufbaus zu verifizieren. Zur genauen Spezifizierung der Abbildungsleistung eines Objektivs muss die Messtechnik alle interessierenden Ab-

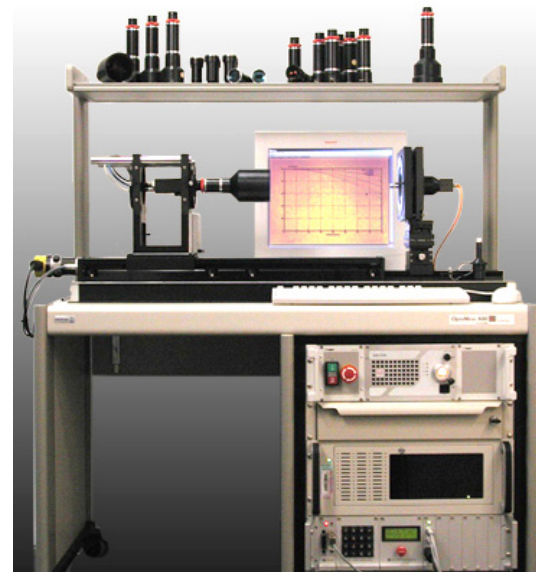


Bild 6. Der Aufbau von »OptoMess«: Die Abbildungsleistung von Objektiven kann damit quantifiziert und bei Bedarf korrigiert werden

bildungsfehler im Objektraum in vollem Umfang erfassen. Bedarf an einem automatisierten schnellen Messverfahren zur Qualitätskontrolle abbildender Optiken ist also genügend vorhanden. Vor allem die gravierendsten Fehler optischer Messsysteme – die so genannten asymmetrischen Fehler – werden von der optischen Rechnung nicht erfasst; sie schleichen sich durch Addition verschiedener Fertigungsfehler ein.

Um die vom Ingenieurbüro Eckerl entwickelten und gefertigten Objektive hinsichtlich ihrer Abbildungsleistung quantifizieren und eventuell korrigieren zu können, wurde das Messsystem »OptoMess« entwickelt. Mit ihm ist es möglich, Prüflinge in ihrem gesamten Objektraum

zu vermessen (Bild 6). Das Target, das für einen Abbildungsbereich eine entsprechende Rasterung von Objektpunkten aufweist, lässt sich im Objektraum in äquidistanten Abständen mikropositionieren. Verwendet werden außerdem ein CCD-Sensor mit hoher Auflösung und farbvariable Beleuchtungen. Zur Rückführung auf Standards sind die verwendeten Targets natürlich kalibriert (nach DKD-Zertifizierung). Die Erfassungs- und Auswertungsroutinen ermöglichen zudem eine vollautomatische und schnelle Vermessung eines Prüflings im gesamten Objektraum.

Messgerät für alle wichtigen Kenndaten

Mit dem beschriebenen Messgerät ist man somit in die Lage, innerhalb kürzester Zeit nicht nur alle wichtigen optischen Kenndaten eines Objektivs – wie Abbildungsmaßstab und Verzeichnung – zu ermitteln, sondern außerdem Modellfunktionen anzugeben, mit deren Hilfe das entstandene Bild auf Maßstabskonstanz korrigiert werden kann. Als Beispiel für ein Objektiv, das sich ohne Verzeichnungskorrektur nur sehr schwer für Vermessungsaufgaben einsetzen lässt, sei hier die hyperzentrische Abbildungsoptik von IB/E angeführt (Bilder 7 und 8).

Konzipiert wurde das Objektiv für Anwendungszwecke, bei denen ohne eine außergewöhnliche perspektivische Darstellung die Details eines Prüflings überhaupt nicht dargestellt werden können. So ist sein Einsatz beispielsweise bei der Prüfung der Oberflächenbeschaffenheit von Tabletten denkbar. Der Blickwinkel des Objektivs neigt sich dabei mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse immer mehr dem Zentrum zu, so-

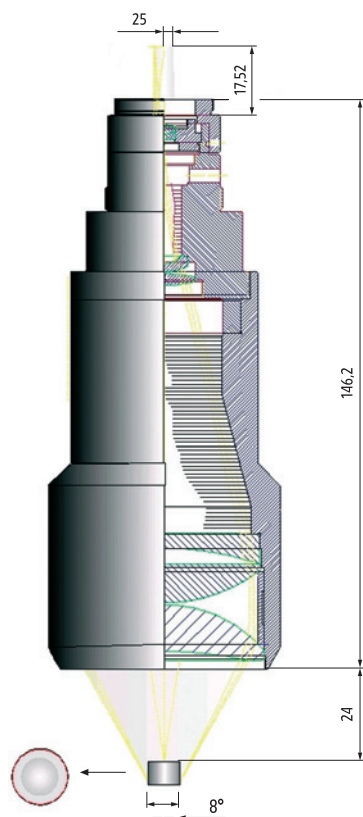


Bild 7. Darstellung des hyperzentrischen Messobjektivs: Mit ihm ist es möglich, ausgedehnte Objekte von allen Seiten zu betrachten

dass sich die Details der normalerweise nicht sichtbaren Oberflächen der Kanten der Tablette gleichzeitig mit der dem Objektiv zugewandten Oberfläche darstellen lassen (Bild 7). So lässt sich eine hohe Durchsatzrate bei der optischen Prüfung der Tabletten erzielen, da für die Kanten keine separaten Aufnahmen gemacht werden müssen. Die in Bild 8 dargestellten Messwerte der Verzeichnungsmessung zeigen, dass die Werte der relativen radialen Verzeichnung sich der Auslegung der Optikrechnung entsprechenden verhalten. Gleichzeitig erkennt man, dass sich diese Optik bei Verzeichnungen im

Bereich von 20 Prozent, entsprechend objektseitigen Messfehlern im Millimeterbereich, für Vermessungszwecke nur mit softwaregestützter Verzeichnungskorrektur einsetzen lässt.

Fazit: schnellere Qualitätsprüfung und höhere Abbildungsleistung

Die heute für eine detaillierte Prüfung von Optiken verwendeten Verfahren sind meist aufwändig und Zeit raubend; für die Spezifikation ihrer Abbildungseigenschaften werden deshalb in der Regel die Daten der optischen Rechnung verwendet. Mit »OptoMess« steht nun ein Messsystem zur Verfügung, mit dessen Hilfe diese Daten verifiziert und so die fertigungsbedingten Toleranzen evaluiert werden können. Mit dem hierbei angewandten Verfahren ist zudem eine detaillierte Qualitätskontrolle in der Optikfertigung möglich. Außerdem können auf der Grundlage der gewonnenen Daten softwaregestützte Verzerrungskorrekturen von Bilddaten vorgenommen werden, um so die Abbildungsleistungen guter telezentrischer Messoptiken weiter zu steigern oder um Sonderoptiken, die die Aufnahme bestimmter Bilddetails erst ermöglichen, auch für vermessende Aufgaben einsetzen zu können. <<

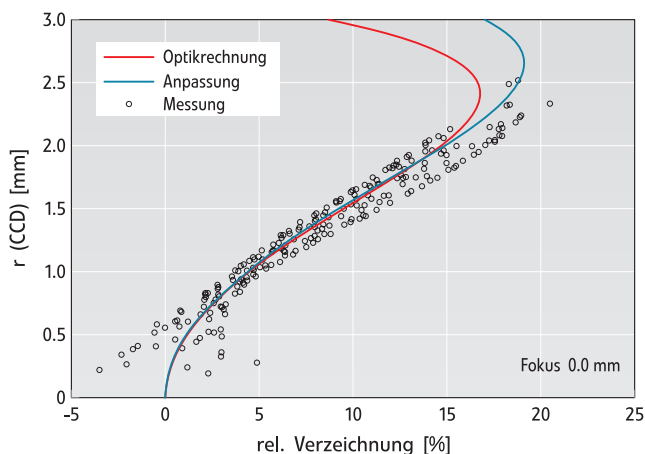


Bild 8. Hyperzentrische Optik, relative Verzeichnung im Vergleich zu der des Designs: Bei Verzeichnungen von 20 Prozent lässt sich diese Optik nur mit softwaregestützter Verzeichnungskorrektur für Vermessungszwecke verwenden

Literatur

- [1] Normenausschuss Feinmechanik und Optik, DIN 58187: »Qualitätsbewertung optischer Systeme, Bestimmung der radialen Verzeichnung«; Technical report, Deutsches Institut für Normung e.V., 1986
 - [2] Normenausschuss Feinmechanik und Optik, DIN 58185: »Optische Übertragungsfunktion«; Blatt 1 (Formelzeichen, Begriffe, Mathematische Zusammenhänge), Technical report, Deutsches Institut für Normung e.V., 1974
 - [3] Normenausschuss Feinmechanik und Optik, DIN 58185: »Optische Übertragungsfunktion«; Teil 3 (Durchführung der Messung), Technical report, Deutsches Institut für Normung e.V., 1978
 - [4] Normenausschuss Feinmechanik und Optik, DIN 58185: »Optische Übertragungsfunktion«; Teil 4 (Darstellung), Technical report, Deutsches Institut für Normung e.V., 1978
 - [5] K. Eckerl: »Kundenspezifische Optikentwicklung«; Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, Schiele & Schön, 1994
 - [6] Normenausschuss Feinmechanik und Optik, DIN 58185: »Optische Übertragungsfunktion«; Teil 2 (Gerätegrundlagen), Technical report, Deutsches Institut für Normung e.V., 1976
 - [7] U. Eckerl, N. Harendt und K. Eckerl: »Quantifizierung der Abbildungstreuung von Messobjektiven«; Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, Schiele & Schön, 1998
- Weitere Literatur:
 T. Wieland: »Untersuchung eines linearen direkten Verfahrens zur Kamerakalibrierung«; Vision & Voice, 1992
 M. Li und J. Laves: »Some aspects of zoom lens camera calibration«; IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell., Schiele & Schön, 1996, S. 1105-1110

■ Dr. Norbert Harendt ist Projektleiter BV-Systeme im Ingenieurbüro IB-Eckerl, Hutthurm.