

In 100-Prozent-Kontrolle gefertigte
telezentrische Messobjektive



Optik unter Kontrolle

Schnelle Qualitätsprüfung an Objektiven in der Serienproduktion

■ Norbert Harendt, Hutthurm

Praxisnahe Optikdesigns: Dank einer lückenlosen Protokollierung der Objektivproduktion lassen sich die Leistungsanforderungen des Entwurfs sinnvoll auf die Möglichkeiten der Serienfertigung abstimmen.

Optische Verfahren gewinnen in der Messtechnik und den angrenzenden Disziplinen an Bedeutung, besonders im Verbund mit der Bildverarbeitung. Gleichmaßen steigt der Anspruch an die Qualität der dort verwendeten Optiken. Obwohl die Prüfverfahren in der Optikfertigung immer ausgeklügelter werden, hält die Qualitätsprüfung mit diesem Anspruch nicht Schritt. Die wenigsten für die Messtechnik ausgewiesenen Objektive werden vor der Auslieferung einzeln geprüft. Die Anzahl derer, die mit einem Prüfprotokoll ausgeliefert werden, ist noch geringer.

Es ist immer noch üblich, die Designdaten einer Abbildungsoptik zur Darstellung ihrer Abbildungsgüte anzugeben, anstelle der in der Produktion tatsächlich

zu erwartenden. Damit liegen bei den wenigsten Optikherstellern repräsentative Daten darüber vor, wie die Einflüsse ihrer Serienproduktion die Qualität des Optikdesigns auf lange Sicht beeinträchtigen. Dies soll nicht bedeuten, dass Qualitätsprüfungen nicht stattfinden. Vereinzelt werden stichprobenhaft Einzelmerkmale geprüft, vor allem anhand der optischen Übertragungsfunktion MTF [1-4]. Der

HERSTELLER

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

komplette Umfang der spezifizierten Leistungsdaten wird jedoch von den wenigsten Herstellern geprüft, vor allem nicht zu 100 Prozent in der Serienfertigung.

Asymmetrische Abbildungsfehler – Merkmal der Objektivherstellung

Die Norm zur Prüfung der Verzeichnung [5] konzentriert sich auf die radiale Verzeichnung. Diese ist in der Regel vom Optikdesign bestimmt, welches aus Kostenerwägungen Abstriche bei der Abbildungsqualität zulässt. Die asymmetrischen Verzeichnungen sind jedoch Ergebnisse der nicht idealen Qualität der Produktion.

Es lässt sich keine Optik komplett frei von asymmetrischen Abbildungsfehlern herstellen, da die Fertigung immer Toleranzen zum System hinzufügt. Stringent berechenbar sind diese auch nicht, bestenfalls mit Toleranzbetrachtungen abschätzbar. Daher ist es zur Kontrolle der Fertigung immer geboten, die tatsächlichen Abbildungsfehler produktionsnah möglichst vollständig zu erfassen.

Als Stellvertreter wird gern die MTF geprüft, da der Glaube herrscht, ein opti-



Bild 1. OptoMess-Arbeitsplatz: Der Messplatz wurde bei IB/E entwickelt, um die eigene Produktion telezentrischer Messobjektive zu protokollieren

sches System, dessen MTF der Spezifikation entspricht, erfülle auch die Spezifikationen hinsichtlich der übrigen Abbildungsfehler. Da Änderungen in der MTF und den übrigen Abbildungsfehlern in der Regel unterschiedliche Ursachen haben, lassen sich die von den Herstellern gewünschten Rückschlüsse nicht ziehen:

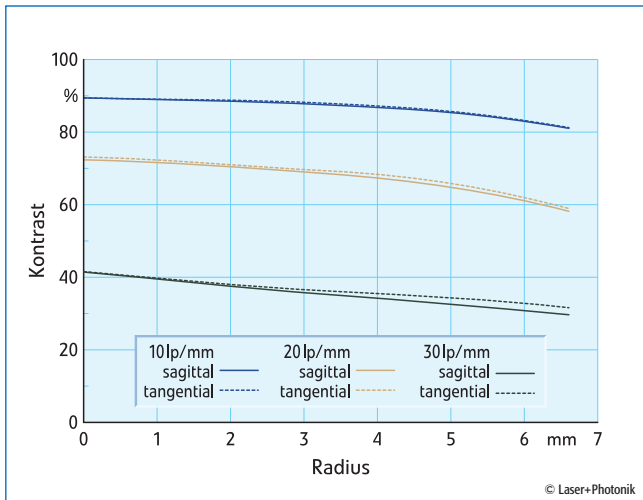


Bild 2. Darstellung der MTF: Aufgetragen ist hier die Modulation über der Bildhöhe für drei Ortsfrequenzen

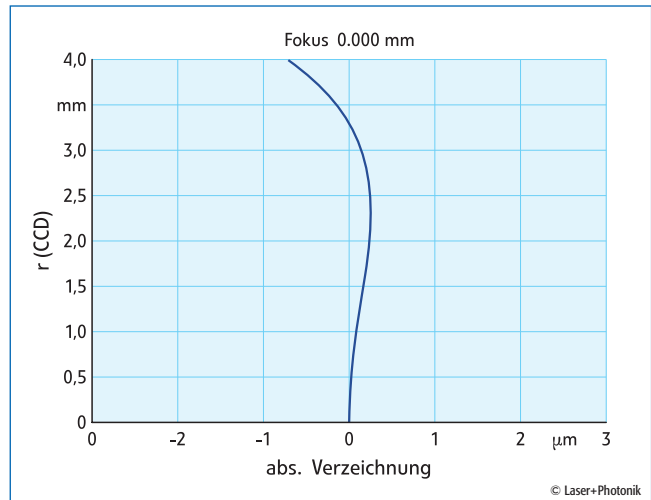


Bild 3. Darstellung der absoluten Verzeichnung im Bildraum

Wenn sich die Verzeichnung eines Exemplars gegenüber dem Standard ändert, muss sich nicht zwingend seine MTF ändern und umgekehrt: Wenn also für einen Kunden die Verzeichnung der Objektivs spezifiziert ist, muss diese auch geprüft werden.

Qualitätsprüfung: Die Kosten im Griff

Das endgültige Argument gegen vollständige Prüfungen lautet in der Optikfertigung: Vollständige Qualitätskontrolle ist zu teuer, das bezahlt uns keiner. Solange der Kunde dies akzeptiert, kann das auch weiter so praktiziert werden. Das Argu-

ment an sich stimmt aber nicht mehr, da mit »OptoMess« ein System existiert, das kostengünstige 100-Prozent-Qualitätsprüfungen erlaubt (Bild 1). Die Bedienung durch ausgewiesenes Fachpersonal ist bei diesem System nur für die Einarbeitungsphase erforderlich. Die eigentliche Qualitätsprüfung kann durch das Fertigungspersonal erfolgen, da hier nur die gespeicherten Mess- und Protokollierungsdefinitionen aufzurufen sind. Weitergehende Justagemaßnahmen beim Wechsel des Prüflings sind nicht erforderlich.

So kann die Produktion schnell und umfassend hinsichtlich Weißlicht- und spektral gewichteter MTF, Verzeichnung,

asymmetrischer Abbildungsfehler, Vignettierung und weiterer optischer Kenngrößen protokolliert werden. Die Kosten der Qualitätsprüfung lassen sich leicht erwirtschaften, wenn die Ergebnisse der Protokollierung dazu genutzt werden können, die hochperformanten Exemplare der Produktion zu identifizieren und zu einem Preis anzubieten, der ihrer Qualität entspricht.

Klassische Analysen in der Optik-Fertigung

Optische Übertragungsfunktion MTF: Die MTF ist das wichtigste Qualitätsmerkmal. Ausgehend von der Modulation

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

einer strahlungstechnischen Größe I gelangt man zu der Modulationsübertragungsfunktion $T(R)$ in Abhängigkeit der Ortsfrequenz R durch

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

Die üblichen Messverfahren für die MTF [2] verlangen nach inkohärenter monochromatischer Beleuchtung. Der Objektbereich wird zeitraubend mittels eines Spalts abgetastet, dessen Bild zur Genauigkeitssteigerung wiederum mittels eines Spalts abgetastet wird. Für die Einrichtprozeduren wie für die Messung benötigt man hoch qualifiziertes Personal. ➔

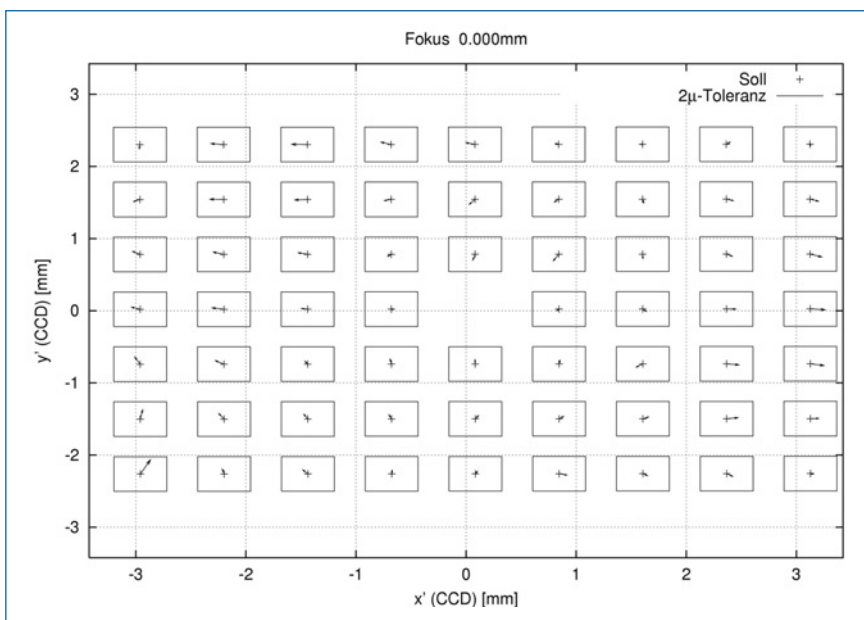


Bild 4. Überhöhte Darstellung der absoluten Verzeichnung im Bildraum: Die Pfeile entsprechen der an den Messpunkten ermittelten Verzeichnung, deren Skalierung durch die Rechtecke verdeutlicht wird, die $\pm 2 \mu\text{m}$ markieren

Mit OptoMess hingegen werden MTF-Messungen am gleichen Target vorgenommen wie die restlichen Untersuchungen, also in One-Shot-Technik im gesamten Bildfeld mit Weißlicht oder spektral beliebig gefiltertem Licht. Dies ermöglicht schnelle Messungen, die zudem nur während des Teach-in nach qualifiziertem Fachpersonal verlangen. Eine exemplarische MTF-Messung zeigt Bild 2.

Verzeichnung: Der zweite klassische Qualitätsparameter ist die Verzeichnung. Eine optische Abbildung wird in erster Näherung mittels des paraxialen Abbildungsmaßstabs β' beschrieben, der für die Abbildung der Objektkoordinaten der Höhe h auf Bildkoordinaten der Höhe h' besagt:

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

Die Verzeichnung beschreibt dann den Effekt, dass sich der Abbildungsmaßstab bei einer abbildenden Optik in der Regel im Bildfeld ändert – symmetrisch auf Grund von Designbeschränkungen und asymmetrisch auf Grund von Fertigungsfehlern:

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

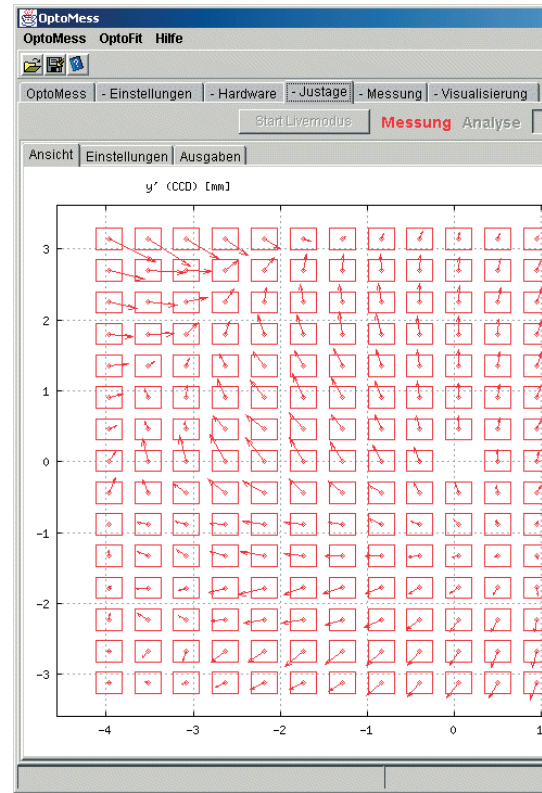
Die zugrunde liegende DIN 58187 über die Qualitätsbewertung optischer Systeme [5] beschränkt sich jedoch auf eine rein radialsymmetrische Beschreibung der Verzeichnung, die zudem wegen ge-

rätetechnischer Details nur an wenigen Stützstellen im Bildraum ermittelt werden muss.

Bild 3 zeigt exemplarisch die absolute Verzeichnung im Bildraum eines hochwertigen Objektivs in der gängigen Darstellungsweise.

Asymmetrische Abbildungsfehler: Aufschluss über asymmetrische Fehler liefert dann die mit OptoMess ermittelte überhöhte Darstellung der Verzeichnungen der einzelnen Messpunkte. Bild 4 zeigt in überhöhter Art und Weise für jeden gemessenen Spot seine individuelle Verzeichnung in Richtung und Betrag als Vektorpfeil an: Er verbindet den idealen paraxial definierten Bildort mit dem realen, durch die Prüfoptik erzeugten. Zur bequemen Betrachtung lassen sich Vergleichsrechtecke anzeigen, die ein Vergleichsmaß visualisieren. Im dargestellten Beispiel sind dies $2 \mu\text{m}$. Das bedeutet, jedes Rechteck spannt ein Toleranzfeld von $\pm 2 \mu\text{m}$ auf, anhand dessen sich der jeweilige Betrag der Verzeichnung abschätzen lässt. Da die Messpunkte für Verzeichnung und MTF dieselben sind, kann auch die MTF-Auswertung gezielt an einzelnen Feldpunkten durchgeführt werden, um gezielt Asymmetrien darzustellen. Eine hierfür typische Anwendung ist die MTF-Auswertung allein an den vier Eckpunkten, welche Dejustagen im System sehr empfindlich aufzeigen kann.

Live-Auswertung: Die Königsdisziplin bei der Optikherstellung ist die individuelle Fehlerkorrektur. Sind Abweichungen zwischen gemessener Performance



und Zielspezifikation vorhanden, müssen bei höherpreisigen Produkten Korrekturen vorgenommen werden. Dies ist bei herkömmlichen Prüfverfahren keine Option, da entweder der Zeitaufwand für die Prüfung so groß ist, dass diese Vorgehensweise unrentabel ist, oder die Analysedaten auf Grund der inhärenten Rotationssymmetrie für Korrekturen nicht verwendbar sind.

Anhand der von OptoMess gelieferten Analysen der asymmetrischen Abbildungsfehler kann der Effekt einer eingebrachten Korrektur schneller erfasst werden, als wenn ein rotationssymmetrisch gemitteltes Gesamtergebnis betrachtet

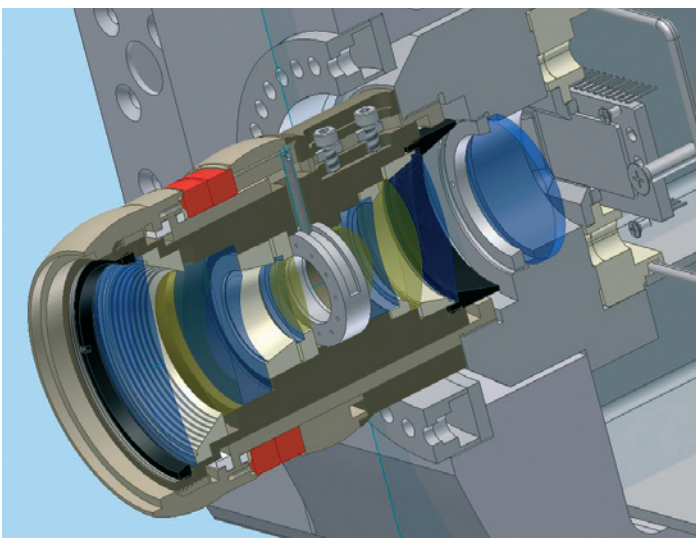


Bild 6. Optischer 3D-Messkopf mit IB/E-Objektiven



Bild 7. Weitwinkel-Hybridoptik von IB/E mit diffraktiven Elementen für Abbildungen mit großer Dynamik

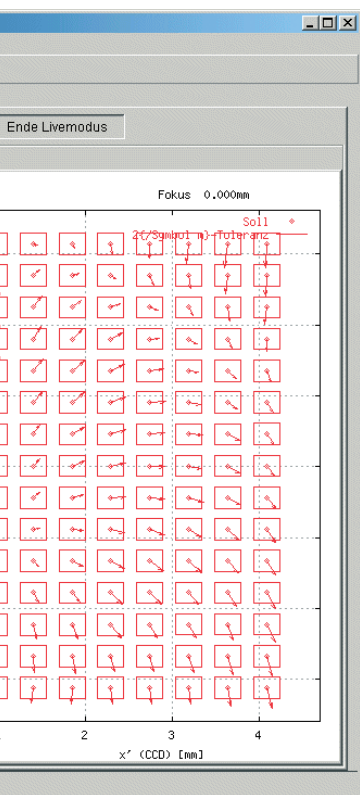


Bild 5. Darstellung einer asymmetrischen Analyse im Live-Modus von OptoMess

wird. Da typische Fertigungsfehler wie Dezentrierung oder Verkippung von Linsen vor allem asymmetrische Fehler hervorrufen, ist die maximale Empfindlichkeit zur Erkennung solcher Fehler und ihrer Änderung durch Korrekturmaßnahmen auch nur bei einer Darstellung der asymmetrischen Fehler gegeben. Bei einer rotationssymmetrischen Darstellung bedarf es wegen ihres vermittelnden und richtungsbereinigten Charakters naturgemäß stärkerer und weniger zielorientierter Eingriffe.

So wird ein Traum der Qualitätsprüfung in der Optik wahr: An der gefertigten Optik können Fehlerkorrekturmaßnahmen und gleichzeitig eine Analyse der optischen Leistungsfähigkeit des Systems vorgenommen werden. Hier sind Optikdesign und -konstruktion zugleich gefordert, entsprechende Korrekturmöglichkeiten in der fertig montierten Optik zu belassen. So kann innerhalb kurzer Zeit ein gefertigtes optisches System auf maximale Leistungsfähigkeit getrimmt werden.

Closed-Loop-Optikdesign und -prüfung: Die weitergehende Option zur Liveauswertung ist die Möglichkeit der Bewertung der Messergebnisse von OptoMess durch das Optikdesign. Hat man das Design für die geprüfte Optik vorliegen, besteht die Möglichkeit, die Messergebnisse durch das Designprogramm zu reproduzieren. Ein solcher »Closed-Loop« zwischen Entwicklung und Prüfung ermöglicht extrem effektives Fehlerma-

nagement. Denn die Fehler produzierenden Elemente werden identifiziert, die nötigen Korrekturen genannt. So kann sich die Korrektur zeitlich sehr effektiv gestalten, da aufwändiges Probieren entfällt. Natürlich wird auch hier Erfahrung benötigt, um die Elemente und Toleranzen im Vorhinein als Kandidaten für Fehlerquellen zu benennen – allerdings nur einmal bei der Einrichtung dieser Analysemethode.

Dieses Verfahren ist gegenüber der Liveauswertung dort eindeutig vorteilhaft, wo Objektive zur Fehlerkorrektur zerlegt werden müssen. Hier wäre eine Leistungssteigerung durch Probieren wegen der zusätzlichen Arbeitsschritte Zerlegen und Montieren eindeutig aufwändiger.

OptoMess in der Anwendung

Standard-100-Prozent-Protokollierung an telezentrischen Messobjektiven:

Der Messplatz OptoMess wurde von IB/E entwickelt, um vornehmlich die eigene Produktion von telezentrischen Messobjektiven zu protokollieren. Es ist Standard bei IB/E, jedes gefertigte Objektiv auf seine vollständigen Spezifikationen zu prüfen. Gleichzeitig ermöglicht dies, einen Maßstab zu bekommen, inwieweit hochwertige Objektivdesigns durch die Toleranzen der Fertigung in der Serie verändert werden. Diese Erfahrungen und die kundenspezifischen Forderungen nach möglichst kostengünstiger und somit angepasster Qualität lassen wir derzeit in zwei Produktlinien fließen: telezentrische Messobjektive mit gewohnt guter Telezentrie, in Standard- und in erhöhter Qualität (Titelbild).

Optische 3D-Messtechnik: Geometrisch messende Verfahren, die auf optischer Abbildung beruhen, stellen extreme Anforderungen an die Qualität der Abbildungsobjektive. Wo schnelle Rechner an der Auswertung der Bilddaten arbeiten, lassen sich symmetrische Abbildungsfehler leicht korrigieren, nicht jedoch produktionsbedingte asymmetrische Abbildungsfehler. Bei diesen hochpreisigen und qualitativ hochwertigen Optiken ist eine genaue Kontrolle der Produktion gefordert, um die asymmetrischen Abbildungsfehler zu minimieren. Als Beispiel hierfür zeigt Bild 6 einen optischen 3D-Messkopf mit Projektions- und Abbildungsoptik.

Kostengünstige Objektive für die

Automobilindustrie: Ein typischer Fall für die Begrenzung der Stückkosten bei hohen Produktionszahlen sind Objektive für die Automobilindustrie (Bild 7). Hier rechnet sich eine schnelle Qualitätsprüfung an Objektiven in der Serie sofort. Die angepasste Qualitätsprüfung mit OptoMess ermöglicht durch spezielle Objektivaufnahmen ein schnelles Befüllen der Prüfstation parallel zum Prüfbetrieb, sofern die Prüfstation nicht direkt in das Montageband integriert werden kann. Die Übereinstimmung der Taktraten von Produktion und Prüfung gewährleistet eine vollautomatische 100-Prozent-Kontrolle der Fertigung. Nur so lassen sich durch die extremen Qualitätsanforderungen bedingte Rückläufer vermeiden.

Fazit

Die schnelle Qualitätsprüfung an Objektiven in der Serie ist machbar. Damit ist eine Voraussetzung erfüllt, um praxisnahe Optikdesigns zu erstellen. Ohne 100-Prozent-Kontrolle in der Fertigung gibt es keine Aussage darüber, welche Leistungsmerkmale eines Optikdesigns sich bei welchen Konstruktionen realisieren lassen. Und damit fehlt die Aussage, welche Leistungsmerkmale in der Designphase nur nachrangig optimiert werden sollten, da andernfalls der Aufwand in der Fertigung überproportional steigt, diese Leistungsmerkmale auch in der gefertigten Optik zu halten. <<

■ Literatur

1. Normenausschuss Feinmechanik und Optik; DIN 58185: »Optische Übertragungsfunktion. Blatt 1: Formelzeichen, Begriffe, Mathematische Zusammenhänge«; Technical Report, Deutsches Institut für Normung e.V., 1974
2. Normenausschuss Feinmechanik und Optik; DIN 58185: »Optische Übertragungsfunktion. Teil 2: Gerätegrundlagen«; Technical Report, Deutsches Institut für Normung e.V., 1976
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. Normenausschuss Feinmechanik und Optik; DIN 58187: Qualitätsbewertung optischer Systeme, Bestimmung der radialen Verzeichnung; Technical Report, Deutsches Institut für Normung e.V., 1986

■ Dr. Norbert Harendt

ist Leiter Bildverarbeitung und Messsysteme im Ingenieurbüro K. Eckerl IB/E in Hutthurm.