

Qualitätsbewertung optischer Systeme

Bestimmung der radialen Verzeichnung

DIN
58 187

Quality evaluation of optical systems; determination of radial distortion

Rotationssymmetrische optische Systeme haben im allgemeinen die Aufgabe, Objekte geometrisch ähnlich abzubilden. Diese Aufgabe wird ideal nach der Geometrie der Zentralprojektion erfüllt. Abweichungen von der idealen Abbildungsgeometrie nennt man Verzeichnung. Die Verzeichnung ist eine ortsabhängige Größe, die im allgemeinen vektoriellen Charakter hat. In einer vorgegebenen Bildebene (die auch im Unendlichen liegen kann) hat dieser Vektor zwischen theoretischem und realem Bildort eine radiale und eine tangentielle Komponente. Bei optischen Systemen ist die tangentielle Komponente grundsätzlich durch mangelhafte Rotationssymmetrie bedingt. Die nach dem heutigen Stand der Technik gefertigten Systeme haben eine vernachlässigbare tangentielle Verzeichnung. Bei elektromagnetisch fokussierten elektronenoptischen Systemen tritt dagegen eine tangentielle Komponente der Verzeichnung als primärer Bildfehler auf. In dieser Norm wird nur die radiale Verzeichnung behandelt. Für spezielle Systeme, z. B. manche optronische Systeme, kann eine Erweiterung auf eine vektorielle Darstellung erforderlich werden.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für optische Abbildungssysteme im optischen Spektralbereich nach DIN 5031 Teil 7, bei denen durch ihre Konstruktion eine rotationssymmetrische Abbildungsgeometrie angestrebt ist. Sie gilt für optronische Abbildungssysteme, sofern eine hinreichende Rotationssymmetrie der Abbildung gewährleistet ist. Sie gilt also z. B. nicht für anamorphotische Systeme.

2 Größen, Formelzeichen und Einheiten

Größe	Formelzeichen	Einheit
absolute Verzeichnung	V_a	mm, μm
relative Verzeichnung	V_r	%
Abstand der Objektebene vom vorderen Knotenpunkt	a	mm
Abstand der Bildebene vom hinteren Knotenpunkt	a'	mm
Objekthöhe	u	mm
Bildhöhe	u'	mm
Gaußsche Bildhöhe	u'_0	mm
objektseitiger Bildwinkel	w	rad, Grad
bildseitiger Bildwinkel	w'	rad, Grad
Gaußscher Bildwinkel	w'_0	rad, Grad
Abbildungsmaßstab	β'	
Winkelvergrößerung	Γ	
Azimut des Prüflings	Φ	rad, Grad
Verschiebung des Nullpunktes	$\bar{s}$	mm, μm

In dieser Norm sind für alle Strecken und Winkel Beträge einzusetzen.

Fortsetzung Seite 2 bis 7

Normenausschuß Feinmechanik und Optik (NaFuO) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

3 Begriffe

3.1 Bildwinkel

3.1.1 Objektseitiger Bildwinkel

Der objektseitige Bildwinkel w ist der Winkel zwischen der optischen Achse und der Verbindungslinie von Eintrittspupillenmitte und Objektpunkt.

3.1.2 Bildseitiger Bildwinkel

Der bildseitige Bildwinkel w' ist der Winkel zwischen der optischen Achse und der Verbindungslinie von Austrittspupillenmitte und Bildpunkt.

3.2 Verzeichnung

Verzeichnung wird in dieser Norm definiert als radiale Ablage der außeraxialen Bildpunkte von den Gaußschen Bildpunkten in einer vorgegebenen Bildebene, die parallel zur Bezugsfläche des Systems liegt.

Sie ist eine Funktion der realen Bildhöhe u' bzw. des bildseitigen Bildwinkels w' sowie als Parameter des Abbildungsmaßstabes β' .

Liegt die Bildebene in endlicher Entfernung, so wird die Verzeichnung je nach Anwendung angegeben als

- absolute Verzeichnung

$$V_a = u' - u'_0 \quad (1)$$

- relative Verzeichnung in %

$$V_r = 100 \cdot \frac{u' - u'_0}{u'_0} \quad (2)$$

Liegt das Bild im Unendlichen, so ist im Sinne dieser Norm die Verzeichnung definiert als

- relative Verzeichnung in %

$$V_r = 100 \cdot \frac{\tan w' - \tan w'_0}{\tan w'_0} \quad (3)$$

Bei Verlagerung des Bildortes zur optischen Achse hin ist die Verzeichnung negativ.

Bei Verlagerung des Bildortes von der optischen Achse weg ist die Verzeichnung positiv.

4 Bezeichnung

Bezeichnung der Prüfung bei unendlicher Objektentfernung und endlicher Bildentfernung (A):

Prüfung DIN 58187 – A

Verwendete Kurzzeichen:

Kurzzeichen	Objektentfernung	Bildentfernung
A	unendlich	endlich
B	unendlich	unendlich
C	endlich	endlich
D	endlich	unendlich

5 Grundlagen der Meßverfahren

Die mathematischen Grundlagen ergeben sich aus der Geometrie der Zentralprojektion.

5.1 Unendliche Objektentfernung, endliche Bildentfernung

Bezugsgröße ist der Abstand a' der gewählten Bildebene vom hinteren Knotenpunkt. Dann ist die Gaußsche Bildhöhe

$$u'_0 = a' \tan w' \quad (4)$$

Man erhält a' als Grenzwert

$$a' = \lim_{w \rightarrow 0} \frac{u'}{\tan w} \quad (5)$$

Bei telezentrischer Abbildung tritt an die Stelle von a' der Abstand der telezentrischen Blende vom vorderen Knotenpunkt.

Damit ergibt sich die

- absolute Verzeichnung

$$V_a = u' - a' \tan w \quad (6)$$

- relative Verzeichnung in %

$$V_r = 100 \cdot \frac{u' - a' \tan w}{a' \tan w} \quad (7)$$

5.2 Unendliche Objektentfernung, unendliche Bildentfernung

Für ein afokales System ist die Bezugsgröße Γ die Winkelvergrößerung

$$\Gamma = \lim_{w \rightarrow 0} \frac{\tan w'}{\tan w} \quad (8)$$

und somit

$$\tan w'_0 = \Gamma \tan w \quad (9)$$

Daraus ergibt sich die

- relative Verzeichnung in %

$$V_r = 100 \cdot \frac{\frac{\tan w'}{\tan w} - \Gamma}{\Gamma} \quad (10)$$

5.3 Endliche Objektentfernung, endliche Bildentfernung

Bezugsgröße ist der Abbildungsmaßstab β' . Ist u der Abstand des Objektpunktes vom Koordinatenursprung der Objektebene, a der Abstand der Objektebene vom vorderen Knotenpunkt und a' der Abstand der Bildebene vom hinteren Knotenpunkt, so ist

$$\frac{a'}{a} = \lim_{u \rightarrow 0} \frac{u'}{u} = \beta' \quad (11)$$

$$u'_0 = u \lim_{u \rightarrow 0} \frac{u'}{u} = u\beta' \quad (12)$$

Damit ergibt sich die

- absolute Verzeichnung

$$V_a = u' - u\beta' \quad (13)$$

- relative Verzeichnung in %

$$V_r = 100 \cdot \frac{\frac{u'}{u} - \beta'}{\beta'} \quad (14)$$

Bei telezentrischer Abbildung sind a und a' zu ersetzen durch den Abstand der telezentrischen Blende vom zugehörigen Knotenpunkt und den Abstand der Objekt- bzw. Bildebene von der telezentrischen Blende, je nachdem, ob die telezentrische Blende im Objekt- oder im Bildraum liegt.

¹⁾ Enthält die Bildebene den bildseitigen Brennpunkt, so ist $a' = f$. Nach DIN 4521 wird die Brennweite gemessen für $\lambda = 546 \text{ nm}$ und bei voller Öffnung.

5.4 Endliche Objektentfernung, unendliche Bildentfernung

Bezugsgröße ist der Abstand a der Objektebene vom vorderen Knotenpunkt. Ist u der Abstand des Objektpunktes vom Koordinatenursprung der Objektebene, so ist

$$a = \lim_{u \rightarrow \infty} \frac{u}{\tan w'} \quad (15)$$

Bei telezentrischer Abbildung tritt an die Stelle von a der Abstand der telezentrischen Blende vom hinteren Knotenpunkt.

Damit ergibt sich die

— relative Verzeichnung in %

$$V_r = 100 \cdot \left(\frac{a}{u} \tan w' - 1 \right) \quad (16)$$

6 Kurzbeschreibung der Meßverfahren

Zur Ermittlung der Verzeichnung müssen zusammengehörige Wertepaare objektseitiger und bildseitiger Koordinaten gemessen werden. Objektseitig sind das der objektseitige Bildwinkel w bzw. die Objekthöhe und bildseitig sind das der bildseitige Bildwinkel w' bzw. die Bildhöhe u' . Dabei sind die Bezeichnungen objektseitig und bildseitig anwendungsbezogen zu verstehen.

Die Richtung der Durchstrahlung des Prüflings (vom Objektraum zum Bildraum oder vom Bildraum zum Objektraum) hat keinen Einfluß auf das Meßergebnis.

Zur Darstellung von Objektorten mit endlicher Entfernung bzw. bei umgekehrter Strahlrichtung zur Darstellung von Bildorten mit endlicher Entfernung dienen z. B. beleuchtete Strichplatten, eine Reihe von beleuchteten Spalten mit bekannten Abständen oder ein einzelner meßbar verschiebbarer beleuchteter Spalt. Zur Darstellung von Objekten mit unendlicher Entfernung benutzt man Kollimatoren, zur Erfassung von im Unendlichen liegenden Bildern benutzt man Fernrohrobjektive (bzw. umgekehrt bei umgekehrter Strahlrichtung).

Zur Messung der objektseitigen bzw. bildseitigen Bildwinkel werden der Kollimator bzw. das Fernrohr und der Prüfling mit seiner Bildebene bzw. Objektebene gegeneinander meßbar verschwenkt, wobei die Schwenkachse durch die Mitte der Eintrittspupille bzw. Austrittspupille des Prüflings laufen sollte, um die volle Apertur des Prüflings auch bei größeren Bildwinkeln zu erfassen.

Zur Messung von endlichen Bildhöhen bzw. Objekthöhen benutzt man in der Meßebe meßbar verschiebbare Detektionseinrichtungen bzw. in der Meßebe angebrachte Skalen.

Die Berechnung der Verzeichnung aus den Meßwerten erfolgt nach den in Abschnitt 5 angegebenen Formeln.

Anmerkung: Bei umgekehrter Strahlrichtung ist darauf zu achten, daß bildseitige und objektseitige Größen nicht verwechselt werden, da sich anderenfalls das Vorzeichen der Verzeichnung umkehrt.

7 Meßaufbauten

7.1 Allgemeine Anforderungen

Die Meßaufbauten müssen so gestaltet sein, daß sich die Bezugsfläche des Prüflings und die Objektebene bzw. Bildebene parallel zueinander ausrichten lassen. Bei unendlicher Objekt- bzw. Bildentfernung muß für den Bildwinkel $w = 0$ bzw. $w' = 0$ die Bezugsfläche des Prüflings senkrecht zur Strahlrichtung justierbar sein. Zur Ausrichtung benötigt man einen Autokollimator. Es ist daher zweckmäßig, einen verwendeten Kollimator oder ein verwendetes Fernrohr als Autokollimator auszubilden.

Die Meßgeräte für objektseitigen und bildseitigen Bildwinkel, Objekthöhe und Bildhöhe müssen so genau sein, daß die Genauigkeit der ermittelten Verzeichnungswerte 5- bis 10mal besser ist als die Toleranz.

Für optische Systeme mit sehr geringer zugelassener Verzeichnung ist diese Genauigkeit mitunter nicht erreichbar. In diesem Fall ist die erreichte Genauigkeit im Prüfbericht anzugeben.

Die allgemeine Stabilität und Präzision des Meßaufbaus, insbesondere der Schwenklagerungen, ist in die Fehlerabschätzung mit einzubeziehen.

Die spektrale Charakteristik des Meßaufbaus ist der vorgesehenen Anwendung des Prüflings anzupassen.

Die Objektbeleuchtung muß in der Regel inkohärent sein. Durch Aufstellung geeigneter Blenden sind die Strahlbegrenzungen sicherzustellen, die der praktischen Anwendung des Prüflings entsprechen. Besondere Aufmerksamkeit ist bei Lupen und Okularen erforderlich.

Die Beleuchtungsoptik ist so aufzubauen, daß die realen Hauptstrahlen der praktischen Anwendung entsprechen.

Die Beleuchtungsapertur muß gegebenenfalls der vorgesehenen Anwendung des Prüflings angepaßt werden.

Verwendete Hilfsoptiken müssen so gut korrigiert sein, daß durch sie die Meßwerte nicht verändert werden. Ihre Pupillen müssen so groß sein, daß die Pupillen des Prüflings nicht beschnitten werden.

Es ist sicherzustellen, daß bei der Messung die anwendungsgemäße Bildebene hinreichend genau eingehalten wird. Dazu kann die Anwendung vorgegebener Fokussierkriterien erforderlich sein.

Bei hohen Anforderungen an die Meßgenauigkeit kann die Anwendung gegebener Kriterien für die Festlegung des Bildortes erforderlich sein.

7.2 Unendliche Objektentfernung, endliche Bildentfernung

Der Meßaufbau muß die Messung zusammengehöriger Wertepaare des objektseitigen Bildwinkels w und der Bildhöhe u' gestatten.

Das Objekt wird durch eine Marke in der Brennebene eines Kollimators dargestellt, vorzugsweise durch einen inkohärent beleuchteten schmalen Spalt. In der Bildebene des Prüflings wird eine meßbar verschiebbare Einrichtung zur Detektion des Bildes angebracht. Der Kollimator einerseits und der Prüfling mit der in seiner Bildebene angebrachten Detektionseinrichtung andererseits müssen sich gegeneinander meßbar schwenken lassen. Dabei ist es unerheblich, welcher Teil geschwenkt wird und welcher Teil feststeht. Die Schwenkachse steht auf der von der Bildhöhenachse und der optischen Achse des Kollimators aufgespannten Ebene senkrecht und verläuft ungefähr durch die Mitte der Eintrittspupille des Prüflings.

Zur Messung des objektseitigen Bildwinkels kann z. B. ein Drehtisch mit Winkelskala oder mit einem Theodoliten verwendet werden. Die Schwenkung kann durch eine Anordnung von mehreren Kollimatoren unter verschiedenen Winkeln ersetzt werden.

Vor Beginn der Messung muß die Verschieberichtung des Bilddetektors parallel zur Bezugsfläche des Prüflings ausgerichtet werden. Der Kollimator muß senkrecht zur Bezugsfläche ausgerichtet werden. Auf diese Weise wird ein Objektpunkt unter dem objektseitigen Bildwinkel $w = 0$ realisiert; sein Bild gibt den Koordinatenursprung in der Bildebene für den Meßvorgang an.

Da zu dieser Grundjustierung ein Autokollimationsfernrohr benötigt wird, ist es zweckmäßig, den verwendeten Kollimator als Autokollimator auszuführen. Als Detektionseinrichtung kann z. B. ein Mikroskop mit Strichmarke in der Zwi-