

DIN ISO 11421

ICS 37.020

Ersatz für
DIN ISO 11421:2005-09**Optik und optische Instrumente –
Genauigkeit von Messungen der optischen Übertragungsfunktion
(ISO 11421:1997)**

Optics and optical instruments –
Accuracy of optical transfer function (OTF) measurement (ISO 11421:1997)

Optique et instruments d'optique –
Exactitude du mesurage de la fonction de transfert optique (OTF) (ISO 11421:1997)

Gesamtumfang 40 Seiten

Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO) im DIN

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise.....	5
Einleitung.....	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe und Symbole.....	7
3.1 Begriffe	7
3.2 Symbole	8
4 Ursachen von Ungenauigkeiten bei Messanlagen	9
4.1 Geometrie der optischen Bank.....	9
4.1.1 Objekt und Bild im Endlichen.....	9
4.1.2 Objekt im Unendlichen und Bild im Endlichen.....	10
4.1.3 Objekt und Bild im Unendlichen	11
4.1.4 Bildverstärker und andere Systeme mit körperlichen Objekt- und/oder Bildflächen.....	11
4.1.5 Prüflingshalterung	11
4.2 Ändern des Azimutes	12
4.2.1 Objekt und Bild im Endlichen.....	12
4.2.2 Objekt im Unendlichen und Bild im Endlichen.....	12
4.2.3 Objekt im Unendlichen und Bild im Unendlichen	12
4.2.4 Bildverstärker und andere Systeme mit körperlicher Objektfläche und/oder Bildfläche	12
4.3 Justierung (Ausrichtung) der TTU und des Bildanalysators	12
4.4 Korrekturfaktoren	13
4.4.1 Spaltbreitenfehler	13
4.4.2 Korrektur der MTF für inkohärent gekoppelte Übertragungsoptiken	14
4.4.3 Ortsfrequenzkorrektur für den Feldwinkel.....	14
4.5 Fokusfehler.....	14
4.6 Ortsfrequenzfehler.....	15
4.7 Restfehler in Übertragungsoptiken.....	15
4.8 Spektralcharakteristiken	15
4.9 Größe der Testfigur und/oder des Abtastfeldes.....	15
4.10 Richtungsempfindlichkeit des Bildanalysators.....	16
4.11 Räumliche Strahlungscharakteristik der TTU.....	16
4.12 Signalverarbeitung im Messgerät	16
4.13 Streustrahlung	16
4.14 Kohärente Strahlung	16
4.15 Nullpegelfehler.....	16
5 Methoden zur Abschätzung des Genauigkeitsgrades	17
5.1 Geometrie des optischen Banksystems	17
5.1.1 Geradlinigkeit der Führungsbahnen.....	17
5.1.2 Parallelität der Flächen und/oder Rechtwinkligkeit zur Bezugsachse.....	19
5.1.3 Genauigkeit von Drehwinkeln	20
5.2 Kollimatorfokus (Abweichung von der unendlichen Objektweite).....	21
5.3 Fokussierung	23
5.4 Spektralcharakteristiken	24
5.5 Größe des Testobjekts und/oder des Abtastbereichs	24
5.6 Signalverarbeitung im Messgerät	25
5.7 Richtungsempfindlichkeit des Bildanalysators.....	25

6	Berechnung der Gesamtgenauigkeit einer Messung	27
7	Spezifizierung der allgemeinen Anlagengenauigkeit	27
7.1	Wert der Nominalgenauigkeit (NAV; en: nominal accuracy value)	27
7.2	Standard-Objektiv-Messungen (SLM; en: standard-lens measurements)	29
7.3	Audit-Objektiv-Messungen (ALM; en: audit-lens measurements)	30
7.4	Spaltblendentest (SAT; en: slit aperture test)	30
8	Regelmäßige Leistungsbewertung	30
Anhang A (normativ) Genauigkeit von Messungen der Phasenübertragungsfunktion (PTF)		31
A.1	Ursachen der Ungenauigkeit einer Messanlage	31
A.2	Methoden zur Genauigkeitsbewertung von Messungen	31
A.2.1	Seitliche Verschiebung des Bildebenenursprungs	31
A.2.2	Spaltblendentest	31
A.2.3	Standard- und Audit-Objektive	32
Anhang B (informativ) Bestimmung der Änderungsrate der MTF mit verschiedenen Parametern		33
B.1	Einleitung	33
B.2	Änderungsrate der MTF mit der Fokussierung	33
B.3	Änderungsrate der MTF mit Bildhöhe oder Bildweite	33
B.4	Änderungsrate der MTF mit Ortsfrequenz	33
Anhang C (informativ) Beispielrechnung zur Nominalgenauigkeit		36
C.1	Objektivparameter	36
C.2	Berechnung von MTF-Fehlern	36
C.2.1	Geometrische Fehler des optischen Banksystems	36
C.2.2	Fehler durch Azimutänderung	37
C.2.3	Fehler in der Ausrichtung der TTU und des Bildanalysators	37
C.2.4	Fehler von Korrekturfaktoren	37
C.2.5	Fokusfehler	38
C.2.6	Ortsfrequenzfehler	38
C.2.7	Aberrationen in Übertragungsoptiken	38
C.2.8	Winkelcharakteristik des Bildanalysators	38
C.2.9	Signalverarbeitung	39
C.3	Gesamtfehler	39
C.3.1	Axial	39
C.3.2	Außeraxial	39
Anhang D (informativ) Literaturhinweise		40

Nationales Vorwort

Die Internationale Norm ISO 11421:1997 wurde vom ISO/TC 172/SC 1 unter Beteiligung deutscher Experten ausgearbeitet. Im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. war hierfür der Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO) zuständig.

Für die im Inhalt zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

ISO 9334 siehe DIN ISO 9334

Änderungen

Gegenüber DIN ISO 11421:2005-09 wurden folgende Korrekturen vorgenommen:

- a) falsch dargestellte Formeln berichtigt;
- b) Bild B.1. b) berichtigt.

Frühere Ausgaben

DIN ISO 11421: 2005-09

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 9334, *Optik und optische Instrumente – Optische Übertragungsfunktion – Begriffe und mathematische Beziehungen*

DIN ISO 9335, *Optik und optische Instrumente – Optische Übertragungsfunktion – Prinzipien und Messverfahren*

DIN ISO 9336-3, *Optik und optische Instrumente – Optische Übertragungsfunktion – Anwendung – Teil 3: Fernrohre*

Optik und optische Instrumente

Genauigkeit von Messungen der optischen Übertragungsfunktion

Einleitung

Die optische Übertragungsfunktion (OTF) ist eine der Hauptkriterien für die objektive Bewertung der Abbildungseigenschaften von optischen, elektro-optischen und anderen bilderzeugenden Systemen.

Die Begriffe, die für die Messung der optischen Übertragungsfunktion gelten, sind in ISO 9334 festgelegt. ISO 9335 beinhaltet Aussagen zu den Prinzipien und Regeln der Messung. Eine weitere Internationale Norm, ISO 9336, befasst sich mit speziellen Anwendungen in verschiedenen optischen und elektro-optischen Feldern. Sie besteht aus mehreren Teilen, die sich jeweils mit einer besonderen Anwendung befassen.

ISO 9335 benennt die Hauptfaktoren, die Einfluss auf die Genauigkeit von Übertragungsfunktionsmessungen haben und beschreibt Verfahren, die darauf ausgerichtet sind, genaue und wiederholbare Ergebnisse zu erzielen. Sie geht aber nicht detailliert auf Techniken und Verfahren zur Genauigkeitsbewertung von OTF-Messanlagen oder auf die Einschätzung von Messungenauigkeiten für spezielle bilderzeugende Systeme ein.

Die vorliegende Internationale Norm zählt die Hauptursachen von Ungenauigkeiten bei OTF-Messanlagen auf, und geben eine Anleitung, wie diese bewertet werden können und wie die Folgen dieser Bewertungen in der Einschätzung der Fehlerbandbreite bei jeder OTF-Messung verwendet werden können. Eines der Ziele der Erstellung dieser Internationalen Norm ist die Festlegung einer realistischen Messunsicherheit für die Ergebnisse von OTF-Messungen. Ein weiteres Ziel ist, Methoden zur besseren Einschätzung der Genauigkeit einer OTF-Messanordnung zu fördern, die die Tatsache berücksichtigen, dass die Genauigkeit einer einzelnen Messung sowohl von der Ausrüstung als auch vom Prüfling abhängt.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm gibt einen Leitfaden für die Bewertung der Fehlerquellen in Messanlagen für die optische Übertragungsfunktion (OTF) und für den Gebrauch dieser Informationen zur Bewertung von Messfehlern. Sie gibt weiterhin einen Leitfaden zur Einschätzung und Spezifikation eines Genauigkeitswertes für einen speziellen Messwert und empfiehlt Methoden für Routinebewertungen.

Der Hauptteil dieser Internationalen Norm behandelt ausschließlich die Modulationsübertragungsfunktion als Teil der OTF. Die Phasenübertragungsfunktion (PTF) wird verhältnismäßig kurz im Anhang A behandelt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Normen enthalten Festlegungen, die durch Verweisung in diesem Text Bestandteil dieser Internationalen Norm sind. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung waren die angegebenen Ausgaben gültig. Alle Normen unterliegen der Überarbeitung, und Anwender dieser Internationalen Norm werden gebeten, die Möglichkeit zu prüfen, die jeweils neuesten Ausgaben der nachfolgend genannten Normen anzuwenden. Mitglieder von IEC und ISO führen Verzeichnisse der gültigen Internationalen Normen.

ISO 9334:1995, *Optics and optical instruments – Optical transfer function – Definitions and mathematical relationships*.

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieser Internationalen Norm gelten die folgenden Begriffe.

3.1.1

Standard-Objektiv

Einzel- oder Mehrfach-Linsenelement, gefertigt mit einer Genauigkeit, die sicherstellt, dass die unter exakt festgelegten Messbedingungen ermittelte MTF um weniger als 0,05 MTF-Einheiten vom theoretisch vorhergesagten Wert abweicht

ANMERKUNG Um diese Genauigkeit zu erreichen, sind Standard-Objektive üblicherweise von einfacher Form und daher in ihrem Anwendungsbereich eingeschränkt. Ein Beispiel einer häufig verwendeten Linse ist die Plankonvex-Linse mit 50 mm Brennweite, welche in [3] erwähnt ist. Diese und verschiedene andere Standard-Objektive (einschließlich afokaler Systeme und Linsen, die im infraroten Wellenlängenbereich arbeiten) sind kommerziell erhältlich.

3.1.2

Audit-Objektiv

Einzel- oder Mehrfach-Linsenelement von fest definierter Konstruktion, dessen Herstellgenauigkeit nicht ausreicht, um die MTF aus Berechnungen mit Hilfe der Entwurfsdaten zu bestimmen (üblicherweise als Ergebnis der Komplexität der Linse), aber dessen MTF-Werte unter genau definierten Messbedingungen bei einem anerkannt autorisierten Labor gemessen wurden (vorzugsweise eine staatliche Kalibrierstelle, falls vorhanden)

3.2 Symbole

Symbol	Parameter	Einheit(en)
h	Objekthöhe	mm, mrad, Grad
h'	Bildhöhe	mm, mrad, Grad
$\Delta h'$	Fehler in der Bildhöhe	mm, mrad, Grad
l	Objektstand	mm
l'	Bildabstand	mm
$\Delta l'$	Fehler im Bildabstand	mm
Δz	Abweichung von der Geradheit der objektseitigen Führungsbahn	mm
$\Delta z'$	Abweichung von der Geradheit der bildseitigen Führungsbahn	mm
Δa	Kippung der objektseitigen Führungsbahn zum Lot auf die Referenzachse	rad
$\Delta a'$	Kippung der bildseitigen Führungsbahn zum Lot auf die Referenzachse	rad
ΔZ	Gesamtabweichung von der idealen Objektebene	mm
$\Delta Z'$	Gesamtabweichung von der idealen Bildebene	mm
M	Abbildungsmaßstab bzw. Vergrößerung	dimensionslos
r	Ortsfrequenz	mm^{-1} , mrad^{-1} , Grad^{-1}
Δr	Fehler in der Ortsfrequenz	mm^{-1} , mrad^{-1} , Grad^{-1}
$m(r, h)$	Änderung der MTF in Abhängigkeit des Objektfokus (für Bildverstärker und ähnliche Systeme)	mm^{-1}
$m'(r, h')$ oder $m'(r, \omega)$	Änderung der MTF in Abhängigkeit des Bildfokus	mm^{-1}
$p'(r, h')$ oder $p'(r, \omega)$	Änderung der MTF in Abhängigkeit der Bildhöhe	mm^{-1} , mrad^{-1} , Grad^{-1}
$q'(r, h')$	Änderung der MTF in Abhängigkeit der Bildweite	mm^{-1}
ω	Objektseitiger Feldwinkel	mrad, Grad
$\Delta \omega$	Fehler im objektseitigen Feldwinkel	mrad, Grad
f	Brennweite	mm
ψ	Azimutalwinkel	Grad
$\Delta \psi$	Abweichung im Azimutalwinkel zwischen Spalten	Grad
R	(Prüflingsbrennweite)/(Kollimatorbrennweite) oder (Dekollimatorbrennweite)/(Kollimatorbrennweite)	dimensionslos
g'	Spaltbreite in der Bildebene	mm
L'	Länge von kürzeren Spalten in Bezug auf die Bildebene	mm
MTF_c	MTF der Übertragungsoptik	dimensionslos
r_o	Ortsfrequenz für den Nullfeldwinkel	mm^{-1} , mrad^{-1} , Grad^{-1}
$n'(r, h')$	Änderung der MTF in Abhängigkeit der Ortsfrequenz	mm, mrad, Grad
$\Delta MTF(r)$	Fehler der MTF	dimensionslos

Symbol	Parameter	Einheit(en)
$\Delta MTF_c(r)$	MTF-Fehler der Übertragungsoptik	dimensionslos
ΔMTF_{rl}	MTF-Fehler resultierend aus den Abbildungsfehlern der Übertragungsoptik	dimensionslos
Δl	Fehler in der Einstellung des Kollimatorfokus	mm
$\Delta MTF(\text{random})$	gesamter (statistischer) Fehler der MTF	dimensionslos
$\Delta MTF(\text{systematic})$	gesamter (systematischer) Fehler der MTF	dimensionslos
$\Delta MTF(\text{total})$	Gesamtfehler der MTF	dimensionslos
$\Delta MTF(\text{rand})_n$	Fehler der MTF der n -ten Quelle (statistisch)	dimensionslos
$\Delta MTF(\text{syst})_n$	Fehler der MTF der n -ten Quelle (systematisch)	dimensionslos

ANMERKUNG Die Bezeichnung $m(r, h)$, $m'(r, h')$, $p'(r, h')$ usw. bedeutet, dass diese Parameter Funktionen der Ortsfrequenz r und der Bildhöhe h' oder h sind (das heißt, der Wert der Parameter ist unterschiedlich groß für verschiedene Frequenzen und verschiedene Bildhöhen).

4 Ursachen von Ungenauigkeiten bei Messanlagen

In diesem Abschnitt werden die Hauptursachen von Ungenauigkeiten bei OTF-Messanlagen genannt und die Wirkungen bei einer MTF-Messung beschrieben (kurze Hinweise zur PTF-Messung sind im Anhang A zu finden).

4.1 Geometrie der optischen Bank

Die Funktion der optischen Bank besteht darin, ein Mittel zur Aufnahme der „Testfigureneinheit“, des „Prüflings“ und des „Bildanalysators“ in der korrekten geometrischen Beziehung bereitzustellen (das heißt, gemäß dem gewählten Ist-Zustand nach ISO 9334). Um dies zu erreichen, stützt man sich üblicherweise auf Parameter wie die Geradheit der Führungsbahnen, deren Parallelität zueinander und/oder zu der Fläche, zu der der Prüfling in Bezug steht, oder auf die Genauigkeit der Winkelteilungen usw. Abweichungen von der angenommenen Geometrie führen zur Abweichung vom idealen Ist-Zustand und in der Folge zu Fehlern bei der gemessenen OTF. Die wichtigsten Parameter der optischen Bank sind abhängig von der verwendeten Testanordnung (Hinweis: bei Anordnungen wie „nodal slide“-Bänken, die nicht in dieser Internationalen Norm erfasst sind, muss der Anwender seine eigene Fehlerbeurteilung vornehmen). Für Anordnungen nach ISO 9335 sind die Hauptursachen von Ungenauigkeiten und die daraus resultierenden MTF-Fehler im Folgenden dargestellt.

4.1.1 Objekt und Bild im Endlichen

Beide Führungsbahnen, diejenige der Testfigureneinheit (TTU) und die des Bildanalysators, müssen gerade und rechtwinklig zur Bezugsachse sein.

Abweichungen von der Geradheit und der Rechtwinkligkeit rufen Abweichungen von der idealen Bildebene hervor, welche durch:

$$\Delta Z(h) = \Delta z(h) + h \cdot \Delta a$$

für die TTU und

$$\Delta Z'(h') = \Delta z'(h') + h' \cdot \Delta a'$$

für den Bildanalysator gegeben sind, wobei h und h' die Objekt- und Bildhöhen sind, Δz und $\Delta z'$ Abweichungen von der Geradheit, und Δa und $\Delta a'$ Winkelabweichungen für die TTU und den Bildanalysator (in Radiant) beziehungsweise für die Führungsbahnen sind.

Die gemeinsame Wirkung wird gegeben durch:

$$\Delta Z'(h')_{\text{total}} = \Delta Z'(h') + M^2 \cdot \Delta Z\left(\frac{h'}{M}\right)$$

wobei $M = h'/h$ der Abbildungsmaßstab ist.

Falls $m'(r, h')$ die Änderungsrate der $MTF(r)$ in Abhängigkeit von der Defokussierung ist, dann ist der Fehler in der MTF gegeben durch:

$$\Delta MTF(r) = m'(r, h') \cdot \Delta Z'(h')_{\text{total}}$$

Zwei weitere mögliche Fehlerquellen liegen in der Ungenauigkeit der Einstellungen der Bildhöhe h' sowie der Objekt- und/oder Bildweite^{N1)}. Der Fehler der MTF ist in diesem Fall gegeben durch:

$$\Delta MTF(r) = p'(r, h') \cdot \Delta h' + q'(r, h') \cdot \Delta l'$$

wobei $\Delta h'$ und $\Delta l'$ die Fehler in der Bildhöhe beziehungsweise in der Bildweite sind, und p' und q' die entsprechenden Änderungsraten der MTF. Normalerweise sind p' und q' klein, und somit kann diese Fehlerquelle außer Acht gelassen werden (das heißt, die Fehler werden kleiner als 0,01 MTF-Einheiten).

4.1.2 Objekt im Unendlichen und Bild im Endlichen

Es gelten ähnliche Überlegungen wie für 4.1.1 jedoch gibt es nur eine einzige Führungsbahn. Abweichungen von der idealen Bildebene sind in diesem besonderen Fall gegeben durch:

$$\Delta Z'(h')_{\text{total}} = \Delta z'(h') + h' \cdot \Delta \alpha'$$

und die entsprechenden Fehler in der MTF sind wiederum gegeben durch:

$$\Delta MTF(r) = m'(r, h') \cdot \Delta Z'(h')_{\text{total}}$$

Fehler können auch durch Fehleinstellungen der Bildhöhe oder des Feldwinkels entstehen (welcher zur Definition des Ist-Zustandes verwendet wird), und durch die Einstellung der Objektweite, die unendlich sein soll. So entstehen MTF-Fehler wie zuvor, das heißt:

$$\Delta MTF(r) = p'(r, h') \cdot \Delta h' + q'(r, h') \cdot \Delta l'$$

oder, falls der objektseitige Feldwinkel statt der Bildhöhe angegeben ist:

$$\Delta MTF(r) = p'(r, \omega) \cdot \Delta \omega + q'(r, h') \cdot \Delta l'$$

In den obigen Gleichungen sind h' , $\Delta l'$, p' und q' wie in 4.1.1 definiert, ω ist der objektseitige Feldwinkel und $\Delta \omega$ ist der Fehler im objektseitigen Feldwinkel. Der Wert von $\Delta l'$ ist aus der bekannten Lage des Objektabstandes als Abweichung von Unendlich zu bestimmen.

Die entsprechende Gleichung lautet:

$$\Delta l' = \frac{f^2}{l}$$

N1) Nationale Fußnote: Gemeint ist hier die Verwendung eines falschen Abbildungsmaßstabes bei exakter Fokussierung.

wobei f die Brennweite des Prüflings und l der tatsächliche Objektabstand ist.

Üblicherweise sind MTF-Fehler der zwei zuletzt genannten Ursachen klein und können außer Acht gelassen werden, es sei denn, es wird an Stelle des Kollimators ein sehr großer Objektabstand verwendet, unter der (fälschlichen) Annahme, dass dies eine hinreichende Annäherung an Unendlich ist.

4.1.3 Objekt und Bild im Unendlichen

Mit dem für diesen Typ empfohlenen Prüfaufbau (siehe ISO 9335) sollte sich der Abstand zwischen dem Bildanalysator und dem Dekollimator nicht ändern, wenn der Bildwinkel variiert wird. Es gibt deshalb keinen MTF-Fehler, der aus einer Veränderung in der Fokuseinstellung mit objektseitigem oder bildseitigem Feldwinkel resultiert.

Wenn sich der Abstand zwischen Dekollimator und Bildanalysator jedoch ändern kann (z. B. in Folge einer Durchbiegung des Fokusschlittens), so er gibt sich daraus ein Fehler in der MTF, der durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$\Delta MTF(r) = m'(r, \omega) \cdot \Delta z'(\omega)$$

wobei $\Delta z'(\omega)$ der mechanische Fehler ist, und $m'(r, \omega)$ die Änderungsrate der MTF mit der Defokussierung darstellt.

Andere Fehlerquellen sind Ungenauigkeiten in der Einstellung des Feldwinkels und in der Abweichung des Objektabstandes von Unendlich. Die resultierenden MTF-Fehler ergeben sich durch die entsprechenden Gleichungen nach 4.1.2, das heißt:

$$\Delta MTF(r) = p'(r, \omega) \cdot \Delta \omega + q'(r, h') \cdot \Delta l'$$

mit

$$\Delta l' = \frac{f^2}{l}$$

4.1.4 Bildverstärker und andere Systeme mit körperlichen Objekt- und/oder Bildflächen

Ein allgemein anerkanntes Verfahren beim Prüfen dieses Systemtyps ist, die Testfigur für jede Testposition in der Bild-/Objektfläche auf die Objektfläche und/oder die Bildfläche auf den Bildanalysator nachzufokussieren. Mit diesem Verfahren werden Fokusfehler, die durch mechanische Bankfehler entstehen, ausgeschaltet. Die einzige andere Fehlerquelle ist die nicht korrekte Einstellung der definierten Objekt- oder Bildhöhe. Die sich daraus ergebenden MTF-Fehler sind üblicherweise klein, und sind wie in 4.1.1 gegeben durch:

$$\Delta MTF(r) = p'(r, h') \cdot \Delta h'$$

Falls ein Testverfahren verwendet wird, bei dem bei einer Veränderung der Objekt-/Bildhöhe nicht nachfokussiert wird, und wenn die Führungsbahnen der TTU und des Bildanalysators nicht gerade und parallel zu ihrer jeweiligen Objekt-/Bildfläche sind, dann sind die dadurch hervorgerufenen MTF-Fehler gegeben durch:

$$\Delta MTF(r) = m(r, h) \cdot [\Delta z(h) + h \cdot \Delta a] + m'(r, h') \cdot [\Delta z'(h') + h' \cdot \Delta a']$$

4.1.5 Prüflingshalterung

Die Prüflingshalterung kann den Prüfling nicht immer exakt, wie beabsichtigt, aufnehmen. Dies führt zu Streuungen der Ergebnisse einer Messreihe, wenn der Prüfling zwischen den Messungen entfernt und wieder eingebaut wird. Die Hauptauswirkung ist eine kleine Neigung der Bildebene. Die möglicherweise große Auswirkung auf die gemessene MTF ist durch dieselben Gleichungen wie für Winkelfehler in der optischen Bank gegeben (siehe 4.1.1).

4.2 Ändern des Azimutes

Bei den meisten OTF-Anlagen ist eine Änderung des Messazimutes durch das Drehen der TTU und des Bildanalysators möglich. Diese Drehung kann zu einer Bewegung der TTU und/oder des Bildanalysators entlang der Richtung der Rotationsachse führen. Dadurch wird eine Fokusänderung hervorgerufen, die wie folgt bezeichnet wird:

$$\Delta z(\psi) \text{ und } \Delta z'(\psi)$$

für die TTU beziehungsweise den Bildanalysator, wobei ψ der Azimutalwinkel ist. Der MTF-Fehler, resultierend aus dieser Fokusänderung, ist in 4.2.1 bis 4.2.4 für jede der Prüfaufbauten angegeben.

4.2.1 Objekt und Bild im Endlichen

$$\Delta MTF(r) = m'(r, h') \cdot \left[\Delta z'(\psi) + M^2 \cdot \Delta z(\psi) \right]$$

4.2.2 Objekt im Unendlichen und Bild im Endlichen

$$\Delta MTF(r) = m'(r, h') \cdot \left[\Delta z'(\psi) + R^2 \cdot \Delta z(\psi) \right]$$

wobei R das Verhältnis (Prüflingsbrennweite)/(Kollimatorbrennweite) ist.

Üblicherweise ist R^2 klein, und der zweite Term in der Klammer kann außer Acht gelassen werden.

4.2.3 Objekt im Unendlichen und Bild im Unendlichen

$$\Delta MTF(r) = m'(r, \omega) \cdot \left[\Delta z'(\psi) + (M \cdot R)^2 \cdot \Delta z(\psi) \right]$$

wobei R das Verhältnis (Dekollimatorbrennweite)/(Kollimatorbrennweite) ist, und M die Vergrößerung des Prüflings.

4.2.4 Bildverstärker und andere Systeme mit körperlicher Objektfläche und/oder Bildfläche

Falls ein Testverfahren angewandt wird, bei dem die Testfigur auf die Objektfläche und/oder die Bildfläche zum Bildanalysator nachfokussiert wird, dann resultieren für jedes Testazimut daraus keine Fehler (siehe 4.1.4). Falls ein Testverfahren angewandt wird, bei dem bei der Veränderung des Objekt-/Bildazimuts keine Nachfokussierung durchgeführt wird, sind die MTF-Fehler gegeben durch:

$$\Delta MTF(r) = m(r, h) \cdot \Delta z(\psi) + m'(r, h') \cdot \Delta z'(\psi)$$

4.3 Justierung (Ausrichtung) der TTU und des Bildanalysators

Wenn sowohl die TTU als auch der Bildanalysator Maskenvorlagen verwenden, die nicht rotationssymmetrisch sind, dann ist ihre gegenseitige (relative) Orientierung von Bedeutung. Üblicherweise ist eine oder sind beide Masken in Form eines Spaltes senkrecht zur Abtastrichtung orientiert. Die Auswirkung von Winkelabweichungen $\Delta\psi$ zwischen den beiden (siehe Bild 1) führt zu einer effektiven Zunahme der Spaltbreite, gegeben durch:

$$\Delta g' = L' \cdot \Delta\psi$$

wobei L' die Länge des kürzeren der zwei Spalte umgerechnet in die Bildebene ist. Der MTF-Fehler, der daraus resultiert, ist gegeben durch: