

DIN ISO 15529

ICS 17.180.01; 37.020

**Optik und Photonik –
Optische Übertragungsfunktion –
Messung der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) von abtastenden
Abbildungssystemen (ISO 15529:2010)**

Optics and photonics –

Optical transfer function –

Principles of measurement of modulation transfer function (MTF) of sampled imaging systems (ISO 15529:2010)

Optique et photonique –

Fonction de transfert optique –

Principes de mesure de la fonction de transfert de modulation (MTF) des systèmes de formation d'image échantillonnés (ISO 15529:2010)

Gesamtumfang 35 Seiten

Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO) im DIN

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise.....	5
Einleitung.....	6
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe und Symbole.....	8
3.1 Begriffe	8
3.2 Symbole	11
4 Theoretische Beziehungen	12
4.1 Fourier-Transformierte des Bildes eines (feststehenden) Objektpaltes.....	12
4.1.1 Allgemeiner Fall	12
4.1.2 Spezialfälle	12
4.2 Fourier-Transformierte des Ausgangssignals einer einzelnen Abtastapertur für einen über diese Apertur hinweg bewegten Objektpalt	14
4.3 Fourier-Transformierte der gemittelten LSF für verschiedene Positionen des Objektpaltes	15
5 Verfahren für die Messung der MTF für abtastende Abbildungssysteme	16
5.1 Allgemeines	16
5.1.1 Anwendungsbereich	16
5.1.2 Ergänzende Betrachtungen zur Messung	16
5.1.3 Bestimmung der entsprechenden MTF	16
5.1.4 Prüfbedingungen	16
5.2 Prüfazimut	16
5.2.1 Abtastende Detektoren und rasternde Geräte	16
5.2.2 Faseroptische Frontplatten, Kanalelektronenvervielfacher und ähnliche Bauelemente	17
5.3 Messung von der MTF des Systems, $T_{\text{sys}}(r)$, eines abtastenden Abbildungsgerätes oder eines kompletten Systems.....	17
5.3.1 Messung mit einer oberen Schranke der Ortsfrequenz $ F_{\text{in}}(r) $ kleiner als die Nyquist-Frequenz — anwendbar auf die meisten Gerätetypen	17
5.3.2 Messung mit einer oberen Schranke der Ortsfrequenz $ F_{\text{in}}(r) $, kleiner oder gleich $1/a$, d. h. der doppelten Nyquist-Frequenz	18
5.3.3 Messung der gemittelten LSF für verschiedene Positionen des Objektpaltes relativ zum Abtastraster unter Nutzung eines feststehenden Objektpaltes	20
5.3.4 Messung der gemittelten LSF für verschiedene Positionen des Objektpaltes relativ zum Abtastraster unter Nutzung eines bewegten Objektpaltes	24
5.4 MTF Messung der Abtastapertur T_{ap}	24
5.4.1 Allgemeines	24
5.4.2 Messung des Ausgangssignals einer einzelnen Abtastapertur	24
6 Verfahren zur Messung der Übersprech-Funktion, des Übersprech-Verhältnisses und des Übersprech-Potentials	25
Anhang A (informativ) Hintergrund Theorie	26
A.1 Abtastsysteme und Isoplanasie	26
A.2 Erläuterung der grundlegenden Gleichungen	26
A.2.1 Allgemeines	26
A.2.2 Obere Schranke der Ortsfrequenz von $ F_{\text{in}}(r) $ kleiner oder gleich der Nyquist-Frequenz $1/(2a)$	27
A.2.3 Obere Schranke der Ortsfrequenz von $ F_{\text{in}}(r) $ kleiner oder gleich der doppelten Nyquist-Frequenz (d. h. $1/a$)	27

A.2.4	Fourier-Transformierte des Ausgangssignals einer einzelnen Abtastapertur für einen über diese Apertur hinweg bewegten Objektspace.....	28
A.2.5	Die Fourier-Transformierte der gemittelten LSF für verschiedene Positionen des Objektspace.....	28
Anhang B (informativ)	Übersprechen in abtastenden Abbildungssystemen	29
B.1	Allgemeines	29
B.2	Die Ursache des Übersprechens	29
B.3	Maße für das Übersprechen	31
B.3.1	Allgemeines	31
B.3.2	Übersprech-Funktion	31
B.3.3	Das Übersprech-Verhältnis	31
B.3.4	Das Übersprech-Potential.....	32
Literaturhinweise		35

Nationales Vorwort

Die Internationale Norm ISO 15529:2010 wurde vom ISO/TC 172/SC1 „Fundamental standards“ (Sekretariat; DIN, Deutschland) unter Beteiligung deutscher Experten ausgearbeitet. Im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. war hierfür der Arbeitsausschuss NA 027-01-02 AA „Grundnormen der Optik“ im Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO) zuständig.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezügliche Patentrechte zu identifizieren.

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

ISO 9334	siehe	DIN ISO 9334
ISO 9335	siehe	DIN ISO 9335
ISO 11421	siehe	DIN ISO 11421

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 9334, *Optik und Photonik — Optische Übertragungsfunktion — Begriffe und mathematische Zusammenhänge*

DIN ISO 9335, *Optik und Photonik — Optische Übertragungsfunktion — Prinzipien und Messverfahren*

DIN ISO 11421, *Optik und optische Instrumente — Genauigkeit von Messungen der optischen Übertragungsfunktion*

Optik und Photonik — Optische Übertragungsfunktion — Messung der Modulationsübertragungsfunktion von abtastenden Abbildungssystemen

Einleitung

Eines der wichtigsten Kriterien zur Beschreibung der Abbildungsqualität von optischen Systemen bzw. Geräten ist die Modulationsübertragungsfunktion (MTF). Die Bedingungen, die von einem optischen System erfüllt sein müssen, damit das MTF-Konzept zur Anwendung kommen kann, sind in der ISO 9334 festgelegt. Das optische System muss sich demnach sowohl linear als auch isoplanatisch verhalten.

Damit ein System als isoplanatisch bezeichnet werden kann, muss das Bild eines Objektpunktes (d. h. die Punktbildfunktion) innerhalb einer vorgegebenen Genauigkeit unabhängig von seiner Lage in der Objektebene sein. Es gibt Arten von optischen Systemen, bei denen diese Bedingung nicht in aller Strenge erfüllt ist. Es handelt sich hierbei um Systeme, bei denen die Intensitätsverteilung im Objekt nicht durch eine kontinuierliche Anzahl von Stützstellen sondern nur an diskreten Stützstellen bzw. Linien abgetastet wird.

Beispiele für diese Art von Geräten bzw. Systemen sind: faseroptische Frontplatten (FOFP); kohärente Faserbündel; Kameras, die abtastende Detektoren (en: detector arrays) wie CCD Sensoren verwenden; zeilenförmig abtastende Systeme wie thermische Empfänger (deren Abtastung senkrecht zu den Linien erfolgt), usw.

Bei dem Versuch die MTF eines derartigen Systems durch Messung der Linienbildfunktion eines statischen, linienförmigen Objektes und Berechnung des Betrages der Fourier-Transformierten zu bestimmen, ergibt sich, dass die resultierende MTF-Kurve kritisch von der exakten Position und Orientierung des linienförmigen Objektes, zum Raster der Abtastpunkte, abhängt (siehe Anhang A).

Diese Internationale Norm legt eine „MTF“ für derartige Systeme fest und beschreibt mehrere geeignete Messverfahren dazu. Die hiermit festgelegte MTF genügt den folgenden wichtigen Kriterien:

- die MTF beschreibt die Abbildungsqualität eines bilderzeugenden Systems;
- die MTF liefert eindeutige Messwerte, unabhängig von der verwendeten Messapparatur (d. h. der Effekt der endlichen Objektpaltbreite, usw kann durch eine Entfaltungsoperation korrigiert werden);
- grundsätzlich kann die MTF dazu genutzt werden, um die Intensitätsverteilung im Bild eines gegebenen Objektes zu ermitteln, obwohl dieses Verfahren nicht denselben Gesetzmäßigkeiten unterliegt, wie dies bei einem nichtabtastenden Abbildungssystem der Fall ist.

Diese Internationale Norm legt MTF's auch für Abbildungsuntereinheiten oder Einzelglieder der Abbildungskette fest, welche ein derartiges Gesamtsystem ergeben. Die oben festgelegten Kriterien bleiben damit erfüllt.

Ein sehr wichtiger Aspekt bei abtastenden Abbildungssystemen stellt das Übersprechen (en: Aliasing) dar, das mit derartigen Systemen fest verknüpft ist. Die Bedeutung liegt darin, dass Ortsfrequenzen oberhalb der Nyquist-Frequenz, im Endbild als niederfrequente Störungen auftreten. Dies führt im Endbild zu Artefakten, welche als eine Art von Rauschen betrachtet werden können. Wie stark sich diese Art von Rauschen als störend auswirkt, hängt von den Eigenschaften des abzutastenden Bildes ab. Bilder, die sehr regelmäßige Strukturen oberhalb der Nyquist-Frequenz beinhalten (z. B. Webtexturen in Bekleidungsstücken), führen beispielsweise zu stark sichtbaren Streifenmustern im Bild, typischerweise auch als Moirémuster bezeichnet. Diese Streifenmuster sind in den meisten Anwendungen inakzeptabel, wenn sie aufgrund eines hohen

Kontrastes für den Betrachter sichtbar sind. Aber auch wenn keine regelmäßigen Objektstrukturen vorliegen, führt das Übersprechen (en: Aliasing) zu einem ortsfrequenzabhängigen Rauschen, das zu einer Bildverschlechterung beiträgt.

Ein quantitatives Maß des Übersprechens (en: Aliasing) kann durch MTF Messungen erhalten werden, welche unter speziellen Bedingungen durchzuführen sind. Diese Internationale Norm definiert derartige Maße und beschreibt die Bedingungen, unter denen diese Messungen durchzuführen sind.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt die grundlegenden MTF's für abtastende Abbildungssysteme fest. Die zugehörigen Begriffe werden definiert und mehrere geeignete Verfahren zur Messung der MTF angegeben. Diese Norm definiert weiterhin ein Maß für das Übersprechen^{N1)} (en: aliasing) derartiger Systeme.

Diese Internationale Norm gilt insbesondere für elektronische Abbildungssysteme wie digitale Stehbild- und Videokameras und abtastende Detektoren, die sie beinhalten.

Obwohl hier eine Reihe von MTF Messverfahren beschrieben werden, ist es nicht das Ziel, andere Verfahren auszuschließen, die eine korrekte Messung der Parameter gewährleisten, sofern diese den in ISO 9334 und ISO 9335 beschriebenen allgemeinen Definitionen und Vorgaben an eine MTF Messung genügen. Statt der Linienbildfunktion (LSF) sei insbesondere die Nutzung der Kantenbildfunktion als ein weiterer Ausgangspunkt zur Ermittlung der OTF/MTF von abbildenden Systemen genannt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 9334, *Optics and photonics — Optical transfer function — Definitions and mathematical relationships*

ISO 9335, *Optics and optical instruments — Optical transfer function — Principles and procedures of measurement*

ISO 11421, *Optics and optical instruments — Accuracy of optical transfer function (OTF) measurement*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 9334 und die folgenden Begriffe.

3.1.1

abtastende Abbildungssysteme

Abbildungssystem oder -gerät, bei dem man das Bild durch Abtastung eines Objektes mittels eines Rasters von Punkten an diskreten Stützstellen oder mittels einer Reihe diskreter Linien erzeugt, im Gegensatz zur kontinuierlichen Messwertaufnahme

ANMERKUNG 1 Die punktweise Abtastung erfolgt, indem eine Abtastapertur oder -fläche von endlicher Größe benutzt wird.

ANMERKUNG 2 Für viele Geräte ist „das Objekt“ sogar ein Bild, das von einem Objektiv oder einem anderen Abbildungssystem erzeugt wurde (z. B. wenn das Gerät ein abtastender Detektor ist).

3.1.2

Abtastperiode

a

Abstand zwischen den Abtastpunkten oder -linien

ANMERKUNG Die Abtastung basiert üblicherweise auf einem gleichförmigen Raster von Abtastpunkten oder -linien. Die Abtastperiode kann in zwei zueinander orthogonalen Richtungen unterschiedlich sein.

N1) Nationale Fußnote: Unter Übersprechen (en: aliasing) versteht man die Überlagerung von benachbarten Ortsfrequenzbändern.

3.1.3

Nyquist-Grenzfrequenz

maximale Ortsfrequenz einer Sinuswelle, die das System im Bild erzeugen kann, gleich $1/(2a)$

ANMERKUNG Siehe auch 3.1.9.

3.1.4

Linienbildfunktion (LSF) der Abtastapertur eines abtastenden Abbildungssystems

$L_{ap}(u)$

Variation der abgetasteten Intensität oder des abgetasteten Signals einer einzelnen Abtastapertur oder -linie des Abtastrasters, wenn ein schmales, linienförmiges Objekt^{N2)} über diese Apertur oder Linie und den benachbarten Aperturen oder Linien hinweg bewegt wird

ANMERKUNG 1 Wobei die Richtung der Bewegung senkrecht zur Länge des schmalen Linienobjektes ist und im Falle von Systemen, die über diskrete Linien abtasten, ebenfalls senkrecht zu diesen Linien ist.

ANMERKUNG 2 $L_{ap}(u)$ ist eine eindimensionale Funktion an der Stelle u in der Objektebene, oder der dazu äquivalenten Position im Bild.

3.1.5

Optische Übertragungsfunktion (OTF) einer Abtastapertur

$D_{ap}(r)$

Fourier-Transformierte der Linienbildfunktion, $L_{ap}(u)$, einer Abtastapertur

$$D_{ap}(r) = \int L_{ap}(u) \cdot \exp(-i2\pi ur) du$$

dabei ist r die Ortsfrequenz

3.1.6

Modulationsübertragungsfunktion (MTF) einer Abtastapertur

$T_{ap}(r)$

Betrag von $D_{ap}(r)$

3.1.7

Rekonstruktionsfunktion

Funktion, die das Ausgangssignal von jedem Abtastpunkt, Apertur oder Linie in eine Intensitätsverteilung im Bild überführt

ANMERKUNG Die Rekonstruktionsfunktion hat eine OTF und MTF, die mit ihr verknüpft sind und mit $D_{rf}(r)$ bzw. $T_{rf}(r)$ bezeichnet werden.

3.1.8

MTF eines abtastenden Abbildungssystems

$T_{sys}(r)$

Produkt von der MTF einer Abtastapertur, $T_{ap}(r)$, und der MTF der Rekonstruktionsfunktion, $T_{rf}(r)$, mit der MTF von einem beliebigen zusätzlichen Eingangssystem (z. B. ein Objektiv) und Ausgabegerät (z. B. ein Röhrenmonitor), die als Bestandteile des Abbildungssystems betrachtet werden

ANMERKUNG Bei der Angabe eines Wertes für T_{sys} sollte verdeutlicht werden, aus welchen Komponenten das System zusammengesetzt ist. Das System könnte beispielsweise nur ein abtastender Detektor mit zugehöriger Ansteuerungs- und Ausgabeelektronik sein oder eine komplette Digitalkamera mit Bildschirm.

N2) Nationale Fußnote: Unter einem „schmalen linienförmigen Objekt“ ist das Bild eines beleuchteten, schmalen Spaltes zu verstehen.

3.1.9**Fourier-Transformierte des Bildes eines schmalen Spaltes, das vom Abbildungssystem erzeugt wird** $F_{\text{img}}(r)$

Diese ist gegeben durch:

$$F_{\text{img}}(r) = \int L_{\text{img}}(u) \cdot \exp(-i2\pi ur) du$$

dabei ist die Linienbildfunktion des Systems, $L_{\text{img}}(u)$, die Variation der abgetasteten Intensität oder des Signals quer zu dem Bild eines schmalen Objektpaltes, das vom kompletten System erzeugt wird

ANMERKUNG $L_{\text{img}}(u)$ unterscheidet sich je nach Position des Objektpaltes relativ zum Abtastraster.

3.1.10**Übersprech-Funktion eines abtastenden Abbildungssystems** $A_{\text{F, sys}}(r)$

Hälfte der Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Wert von $|F_{\text{img}}(r)|$ [d. h. dem Betrag von $F_{\text{img}}(r)$], wobei das Bild des MTF Testspaltes über eine Strecke bewegt wird, die gleich oder größer einer Abtastperiode ist

$$A_{\text{F, sys}}(r) = \frac{|F_{\text{img}}(r)|_{\text{max}} - |F_{\text{img}}(r)|_{\text{min}}}{2}$$

ANMERKUNG 1 Es wird der Grenzwert für diese Differenz angenommen, wenn die Breite des Testspaltes gegen Null geht (d. h. dessen Fourier-Transformierte den Wert Eins erreicht).

ANMERKUNG 2 $A_{\text{F, sys}}(r)$ ist ein Maß dafür, bis zu welchem Grad das System auf Ortsfrequenzen oberhalb der Nyquist-Frequenz reagiert und damit falsche, niedere Frequenzen im Bild generiert.

3.1.11**Übersprech-Verhältnis eines abtastenden Abbildungssystems** $A_{\text{R, sys}}(r)$

Verhältnis von $A_{\text{F, sys}}(r)/|F_{\text{img}}(r)|_{\text{av}}$, wobei $|F_{\text{img}}(r)|_{\text{av}}$ dem Mittelwert aus höchstem und niedrigstem Wert von $|F_{\text{img}}(r)|$ entspricht, während das Bild des MTF Testspaltes über eine Distanz bewegt wird, die gleich oder größer einer Abtastperiode ist

ANMERKUNG $A_{\text{R, sys}}(r)$ kann als ein Maß für das Rausch/Signal-Verhältnis betrachtet werden, wobei $A_{\text{F, sys}}(r)$ ein Maß für die Rauschkomponente und $|F_{\text{img}}(r)|_{\text{av}}$ ein Maß für das Signal ist.

3.1.12**MTF eines Bildaufnahme — Teilsystems** $T_{\text{imp}}(r)$

Produkt von der MTF einer Abtastapertur, $T_{\text{ap}}(r)$, und der MTF der Linse, $T_{\text{lens}}(r)$, wobei die MTF der Linse die Wirkung aller optischen Tiefpassfilter beinhaltet, die Bestandteile des Systems sind und das Bild auf dem Abtastraster erzeugt

3.1.13**Übersprech-Potential eines abtastenden Abbildungssystems** $A_{\text{P, imp}}$

Verhältnis der Fläche unter der MTF eines Bildaufnahme-Teilsystems, $T_{\text{imp}}(r)$, zwischen $r = 0,5$ und $r = 1$ zur Fläche unter derselben Kurve zwischen $r = 0$ und $r = 0,5$, wobei die Ortsfrequenz r so normiert ist, dass $1/a$ zu Eins wird

3.2 Symbole

Siehe Tabelle 1.

Tabelle 1 — benutzte Symbole

Symbol	Parameter	Einheit
$A_{F, \text{sys}}(r)$	Übersprech-Funktion das dem kompletten Abbildungssystem zugehörig ist	1
$A_{P, \text{imp}}$	Übersprech-Potential das dem Abbildungs-Teilsystem zugehörig ist	1
$A_{R, \text{sys}}(r)$	Übersprech-Verhältnis, das dem kompletten Abbildungssystem zugehörig ist	1
a	Abtastperiode	mm, mrad, grad
$1/(2a)$	Nyquist-Grenzfrequenz	mm^{-1} , mrad^{-1} , grad^{-1}
$D_{\text{ap}}(r)$	Optische Übertragungsfunktion einer Abtastapertur	1
$D_{\text{lens}}(r)$	Optische Übertragungsfunktion des optischen Systems, das alle optischen Tiefpassfilter beinhaltet	1
$D_{\text{rf}}(r)$	Optische Übertragungsfunktion der Rekonstruktionsfunktion	1
$F_{\text{av}}(r)$	Fourier-Transformierte von $L_{\text{av}}(u)$	1
$F_{\text{img}}(r)$	Fourier-Transformierte des Endbildes vom Objektspalt	1
$F_{\text{in}}(r)$	Fourier-Transformierte von $L_{\text{in}}(u)$	1
$F_{\text{slit}}(r)$	Fourier-Transformierte des Objektspaltes	1
$L_{\text{ap}}(u)$	Linienbildfunktion einer Abtastapertur	1
$L_{\text{av}}(u)$	Linienbildfunktion, die sich aus der gemittelten LSF bei verschiedenen Positionen des Objektspaltes relativ zum Abtastraster ergibt	1
$L_{\text{img}}(u)$	Linienbildfunktion, die dem kompletten Abbildungssystem zugehörig ist	1
$L_{\text{in}}(u)$	Linienbildfunktion der Kombination aus Objektspalt, optisches System, das alle optischen Tiefpassfilter enthält und Abtastapertur	1
r	Ortsfrequenz	mm^{-1} , mrad^{-1} , grad^{-1}
$T_{\text{ap}}(r)$	Modulationsübertragungsfunktion einer Abtastapertur	1
$T_{\text{imp}}(r)$	Modulationsübertragungsfunktion eines Bildaufnahme-Teilsystems	1
$T_{\text{lens}}(r)$	Modulationsübertragungsfunktion des optischen Systems, das alle optischen Tiefpassfilter beinhaltet	1
$T_{\text{rf}}(r)$	Modulationsübertragungsfunktion der Rekonstruktionsfunktion	1
$T_{\text{sys}}(r)$	Modulationsübertragungsfunktion eines abtastenden Abbildungssystems	1
u	lokale Bildfeldkoordinate	mm, mrad, grad