

MTF - Messung

A. Grundlagen / Messprinzip / Messanlage

1. Einführung

Frage zur Einstimmung in das Thema: Was erwarten Sie von einem „guten Foto“? Notieren Sie mindestens drei Kriterien, in denen die Abbildung (das Foto) dem Objekt möglichst ähnlich sein soll?



Ein Punkt in Ihrer Aufzählung wird sicher sein: das Bild muss scharf sein.

Quelle: www.player.de Test: Canon EOS 650D – berührende Momente

Was bedeutet Bildschärfe?

Sie können antworten: die Fähigkeit zur Auflösung feinsten Details. Und das Maß dafür? Man nehme einen Teststreifen (Auflösungstest), bestehend aus abwechselnd dunklen und hellen Balken (Linien) gleicher Breite und mit verschiedener Feinheit der Strukturen, also Linienpaare, wie dies z.B. die nachfolgende Abbildung (in vereinfachter Form) zeigt.

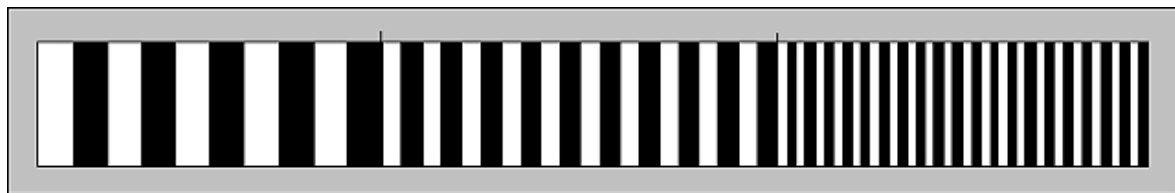


Abb. 1: Ein Balkentest (Auflösungstest)

Das Maß für die Feinheit der Strukturen ist hier die Anzahl der schwarz/weißen Linienpaare pro Längeneinheit, also z.B. 5 Linienpaare pro Millimeter (= Ortsfrequenz 5 Lp /mm). Insgesamt sind dies 10 Linien (schwarz oder weiß) auf einen Millimeter.

Einen solchen Teststreifen fotografiere man mit dem zu bewertenden Objektiv auf einen möglichst hochauflösenden Film und stellt auf diesem dann fest (mit Lupe oder Mikroskop), welche Anzahl von Linienpaaren pro Längeneinheit gerade noch zu erkennen ist. Wenn man dazu den Abbildungsmaßstab noch berücksichtigt, ergibt dies ein Urteil für die Bildschärfe der eingesetzten Optik. Da das Bild meistens verkleinert wird, gibt man diese Auflösungsgrenze in der Filmebene in Linienpaaren pro Millimeter an.

Diesen Versuch wollen wir nun einmal nachvollziehen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 2. Unser Testobjekt ist wieder der Auflösungstest aus Abb. 1. Die Optik bildet diesen in die Filmebene ab und macht daraus ein Ergebnis, wie es in der Abb. 2 unter "Bild des Testmusters" zu sehen ist. Mit zunehmender Feinheit der Strukturen (Linienpaare pro Millimeter) wird das Bild immer "flauer", also kontrastärmer. Bei den feinsten Strukturen sind diese gerade noch zu erkennen und stellen damit die Auflösungsgrenze der Optik dar.

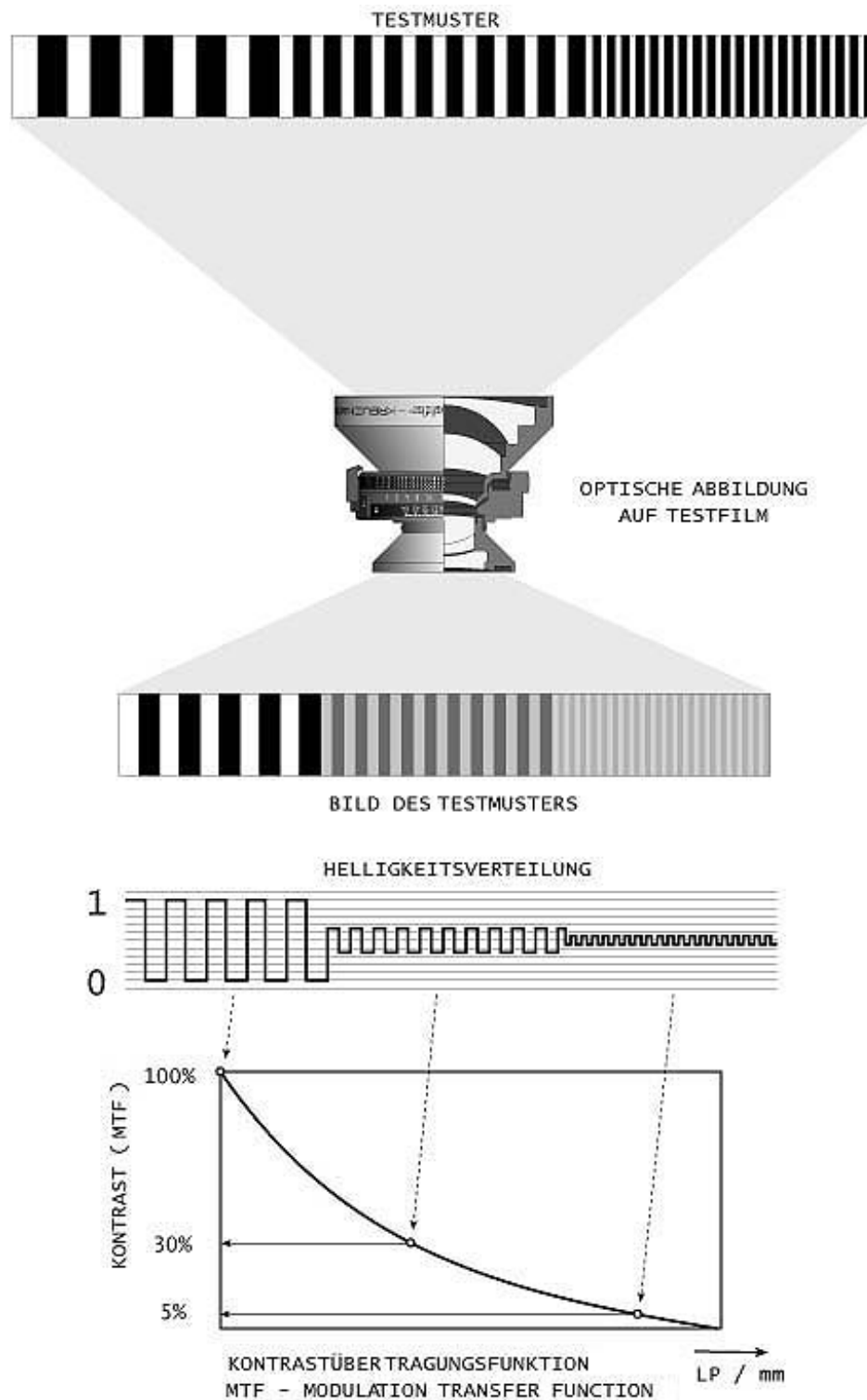


Abb. 2: Abbildung des Balkentests durch Objektiv und Film

Kontrast

Bezeichnet man die Helligkeit des reinen Papierweiß mit "1" und die Dunkelheit der Druckerschwärze mit Helligkeit "0", so wird der Unterschied im Bild mit zunehmender Linienpaarzahl immer geringer. Dies ist in der Abbildung 2 durch das darunterliegende Diagramm dargestellt:

Für die groben Strukturen ist der Unterschied (Differenz) zwischen hell und dunkel noch gleich eins, für die mittleren Strukturen nur noch $0,65 - 0,35 = 0,3$, also 30 %. Und für die ganz feinen Strukturen beträgt dieser Unterschied nur noch 5 %! Eigentlich wollte man aber auch die ganz feinen Strukturen mit großem Hell/Dunkel Unterschied, also mit großem Kontrast, abbilden, damit sie gut sichtbar bleiben!

Die Auflösungsgrenze ist somit kein Maß für die Bildschärfe allein. Es muss auch noch angegeben werden, mit welchem Kontrast die Strukturen (in Linienpaaren pro Millimeter) wiedergegeben werden. Je höher dieser Kontrast, umso besser ist die Optik!

Die Definition des Kontrastes (Modulationsgrad): $C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$

ergibt im obigen Beispiel: $C = \frac{0,65 - 0,35}{0,65 + 0,35} = 0,3 = 30\%$.

Wir müssen also den Kontrast der Wiedergabe in Abhängigkeit von der Feinheit der Strukturen (in Linienpaaren/Millimeter) in einem Diagramm angeben. Dies zeigt die Abb. 2 ganz unten, wobei die Kontrastwiedergabe für die drei im Beispiel gezeigten Linienpaare/mm mit Kreisen eingezeichnet sind.

Das Ergebnis unserer Erkenntnis ist die Kontrastübertragungsfunktion oder, wie man im Englischen sagt: "Modulation Transfer Function", mit der Abkürzung "MTF", welche auch im deutschen Sprachgebrauch üblich ist. Die MTF stellt den Zusammenhang zwischen der Feinheit der Strukturen (in Lp/mm) und deren wiedergegebenem Kontrast dar.

Zum Nachdenken: Überlegen Sie, von welchen Parametern oder Einflüssen der Kontrast im Bildraum abhängig ist? Notieren Sie ihre Ergebnisse. Was bewirkt eine Veränderung der wirksamen Öffnung (der Blende k) des Objektivs bezüglich der Modulationsübertragung? Welche gegenläufigen Effekte wirken dabei?

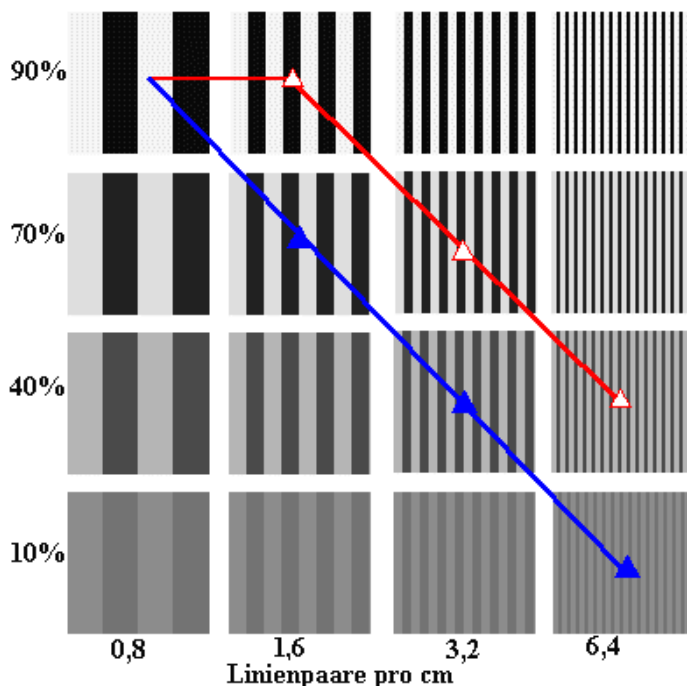


Abb 3: Strukturfeinheit und Kontrast von zwei Objektiven - blaues („schlechtes“) und rote („gutes“) Objektiv

Von unten nach oben zeigen die Testgitter zunehmenden Kontrast (in Prozent), von links nach rechts mit zunehmender Strukturfeinheit (hier in Linienpaaren pro cm).

2. Grenzauflösung des Auges

Nun muss noch die sehr wichtige Frage geklärt werden, bis zu welchen Strukturfeinheiten eine Kontrastübertragung überhaupt sinnvoll ist. Soll das Endbild letztlich mit dem Auge aufgelöst werden, brauchen auch feinere Details (höhere Raumfrequenzen) als das Auge wahrnehmen kann, nicht übertragen (abgebildet) zu werden. Dies ist bei Fotoobjektiven ein entscheidendes Kriterium.

Wir gehen bei unserer Überlegung von einem Fotoausdruck in DIN A4 - Größe (Breite: ca. **300 mm**) aus. Dieser wird im Abstand der deutlichen Sehweite (250 mm) betrachtet. Dies ist zugleich auch der max. Gesichtsfeldwinkel, bei dem wir das Foto ohne zusätzliche Kopfbewegung farbgetreu wahrnehmen können (ca. 60°). Beim Betrachtungsabstand von 250 mm können bei mittlerem Kontrast Linien erst ab einer **Raumfrequenz von 5 LP/mm** aufgelöst werden. Das bedeutet, dass die weißen und schwarzen Linien eine Dicke von jeweils **100 µm** aufweisen müssen.

Damit bei der Bildaufnahme mit **Kleinbildformat (Breite: 36 mm)** die entsprechende Detailauflösung erreicht wird, müssen also die Pixel um den Faktor **8 (300 mm/36 mm)** kleiner sein. Die Pixelgröße ergibt sich zu **12,5 µm**. Dem entspricht einer Raumfrequenz **auf dem Sensor** von **8 x 5 LP/mm = 40 LP/mm**.

Das heißt, dass es bei Verwendung von Kleinbild-Format-Sensoren reicht, wenn das Objektiv bis zur einer Auflösung von 40 Lp/ mm mit hinreichend gutem Kontrast Raumfrequenzen überträgt.

Wichtig ist also

- Möglichst hohe Kontrastwiedergabe für grobe und feine Objektstrukturen (ausgedrückt in Linienpaaren pro mm) bis zu einer von der Anwendung abhängigen höchsten Linienpaarzahl.
- Diese Grenze ist abhängig vom Aufnahmeformat und der beabsichtigten Gesamtvergrößerung und wird entscheidend mitbestimmt von der höchsten Linienpaarzahl, welche das Auge bei der Gesamtvergrößerung noch erkennen kann (ca. 5 Lp/mm bei 250 mm Betrachtungsabstand).

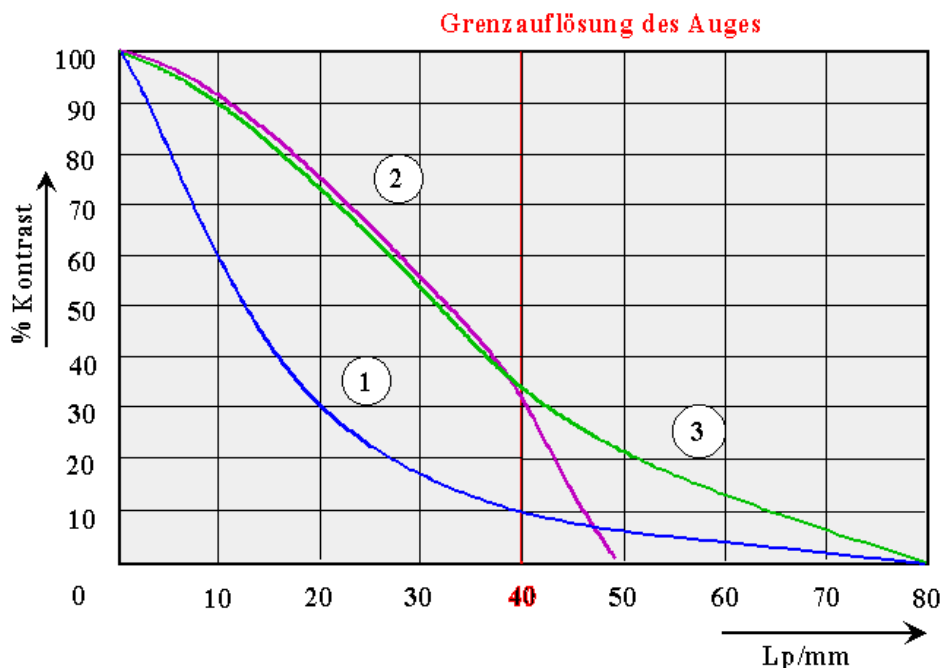


Abb 4: MTF-Charakteristika versch. Objektive / **Grenzauflösung angegeben für KB- Bildsensor:**

- 1) niedriger Kontrast, hohe Auflösung,
- 2) hoher Kontrast, geringe Auflösung > bessere Qualität,
- 3) hoher Kontrast, hohe Auflösung, keine Qualitätsverbesserung.



3. Grenzauflösung bei einem Anwendungsbeispiel in der industriellen Bildverarbeitung

Wir haben gelernt, dass die Ansprüche an das Übertragungsverhalten eines Objektivs (MTF) entscheidend von der jeweiligen Anwendung, also der gewünschten Bildauflösung abhängen.

Da das im Praktikum verwendete C-Mount Objektiv typischerweise auch in der industriellen Bildverarbeitung eingesetzt werden kann, soll die geforderte Grenzauflösung hier beispielhaft durchgerechnet werden.

geg.: 1/2" CCD-Sensor (Breite: 6,4 mm; Höhe: 4,8 mm), 1,3 MPixel

ges.: Seitenlänge a der quadratischen Pixel, max. Ortsfrequenz, max. Bildhöhe $y'_{\max}$

Erg.:

Sensorfläche = 30,7 Mio. μm^2 ;

bei 1,3 Mio. Pixel ergibt sich eine Fläche pro Pixel von $23,6 \mu\text{m}^2 \Rightarrow a \approx 5 \mu\text{m}$

$\Rightarrow$ räuml. Abtastfrequenz = 200 1/mm $\Rightarrow$

$\Rightarrow$ Nyquist-Frequenz = $0,5 \times$ Abtastfrequenz = 100 1/mm $\Rightarrow$ max. Ortsfrequenz = **100 Lp/mm**,

Dies bedeutet für die Messung im Praktikum, dass es reicht bis zu dieser Größe jeweils die MTF zu bestimmen.

max. Bildhöhe = $y'_{\max} = 0,5 \times \sqrt{(B^2 + H^2)} = \mathbf{4,0 \text{ mm}}$,

d.h. bis zu dieser Höhe sollte auch die MTF im Feld gemessen werden

4. Fourier-Analyse

Sie werden nun fragen: was haben obige Tests mit einfachen Balkengittern mit der Wirklichkeit zu tun, wo komplizierte Strukturen mit weichen Tonübergängen, aber auch feine Oberflächendetails wie z.B. eine seitlich beleuchtete Sandoberfläche gleichermaßen vorkommen können? Die Antwort ist - nimmt man es wissenschaftlich exakt - ziemlich kompliziert, kann aber auf einen einfachen Nenner gebracht werden:

Jede Helligkeits- und Strukturverteilung im Objekt kann man sich zusammengesetzt denken als eine Summe von sehr vielen periodischen Strukturen verschiedener Feinheit und Orientierung (= Fourier-Integral), wobei die Balkengitter-Tests dafür nur ein einfaches Beispiel sind. Anstelle der abrupten Hell-Dunkel-Übergänge müssen nur weichere Übergänge betrachtet werden mit "harmonischerem" Verlauf, genauer: sinusförmigem Verlauf.

5. Messung der MTF durch Fourier-Transformation des Linienbildes

Zur direkten Messung der MTF sind als Objekte homogen beleuchtete Gitter, welche eine sinusförmige Transparenz aufweisen, mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen nötig.

Die gleiche Funktion erfüllt mathematisch gesehen auch ein Delta-Impuls, der gemäß der Fourier-Analyse Schwingungen aller Ortsfrequenzen mit der gleichen Intensität, also das gesamte Spektrum, enthält.

Das Punktbild dieses Delta-Impulses durch das Objektiv ist die Punktbild-Verwaschungsfunktion des optischen Systems. Das Gesamtbild B' entsteht aus der Faltung der Objektstruktur O mit der Punktbild-Verwaschungsfunktion P .

Dies lässt sich nach einer Fourier-Transformation auch so darstellen:

$$F(B') = F(O) \cdot F(P)$$

In Worten: Das Frequenzspektrum der Intensitätsverteilung in der Bildebene ist gleich dem Produkt aus dem Frequenzspektrum der Intensitätsverteilung in der Objektebene und der Transformaten der Verwaschungsfunktion.

Interessant für uns ist nun, dass der Betrag der **Fourier-Transformierten der Punktbild-Verwaschungsfunktion $F(P)$** , normiert auf den Gleichlichtanteil $F(P_0)$ gleich der **gesuchten MTF** ist.

In der MTF-Messanlage ImageMaster HR der Fa. Trioptics, s. a. Abb. 5, dient als Objekt anstelle eines Punktes ein sehr schmaler, hell beleuchteter Spalt, also eine Linie, als die physikalisch realisierte Annäherung des Dirac-Impulses. Dieser beleuchtete Spalt befindet sich auf dem drehbaren Spaltrad der MTF-Messanlage, s. a. Abb. 6. Das Spaltbild, also die Linien-Verwaschungsfunktion (auch als Line Spread Function, LSF bekannt), wird mittels einer mikroskopischen Abbildungsstufe auf die Kamera des ImageMaster HR abgebildet.

Die Analyse der detektierten Linien-Verwaschungsfunktion (Line Spread Function, LSF) erfolgt durch die numerisch ausgeführte schnelle, diskrete Fourier-Transformation (FFT oder DFT) im Rechner der MTF-Messanlage Image Master HR.

Das Ergebnis dieser diskreten Fourier-Transformation ist die Optische Übertragungsfunktion (OTF) in Form der Modulations-(Kontrast-)übertragung (MTF) und der Phasenübertragungsfunktion (PTF).

6. MTF-Messanlage mit Funktionsskizzen

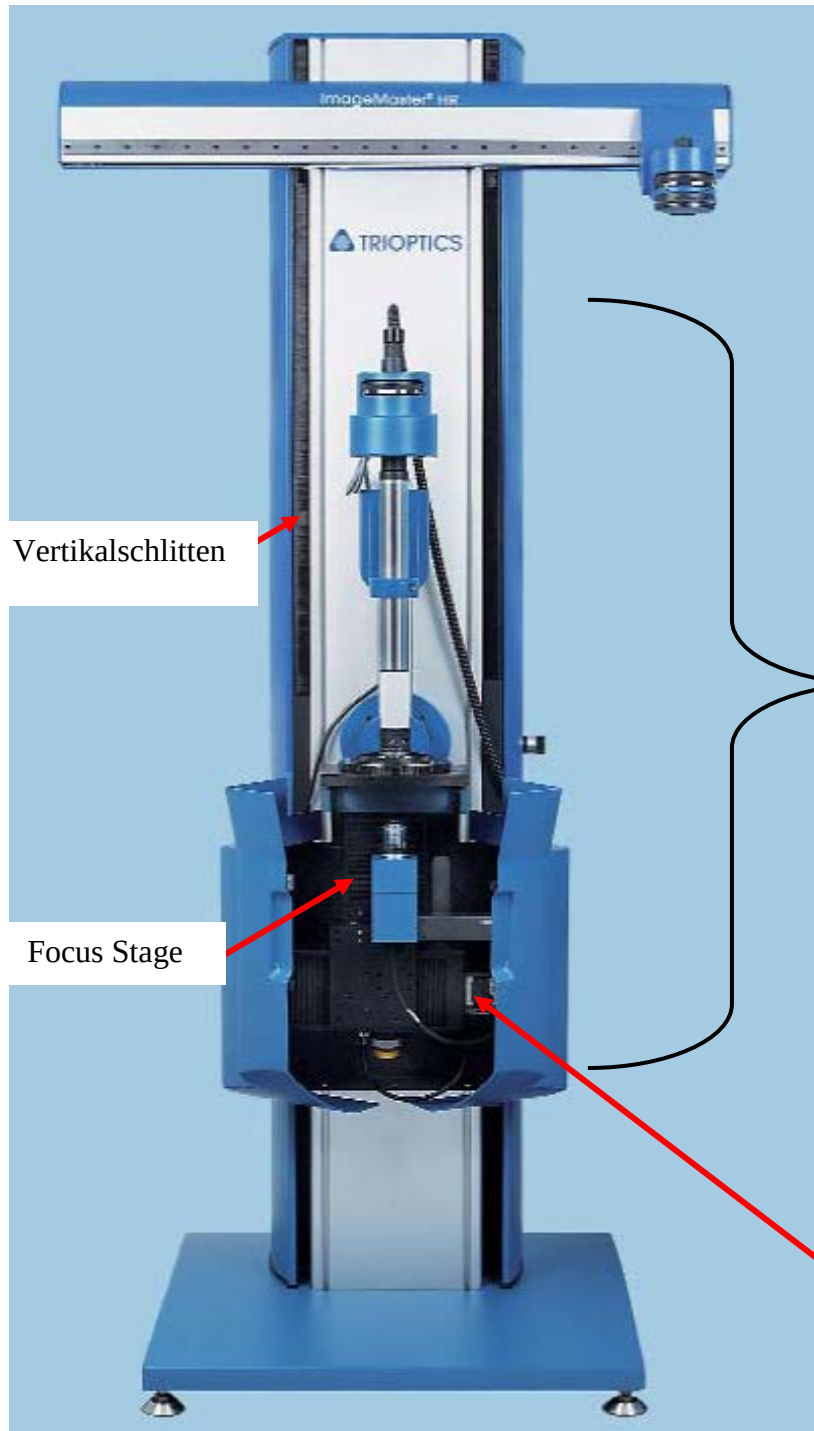


Abb. 5: Für MTF-Praktikum
genutzter Teil der MTF-
Messanlage Image Master HR

Image Field Stage

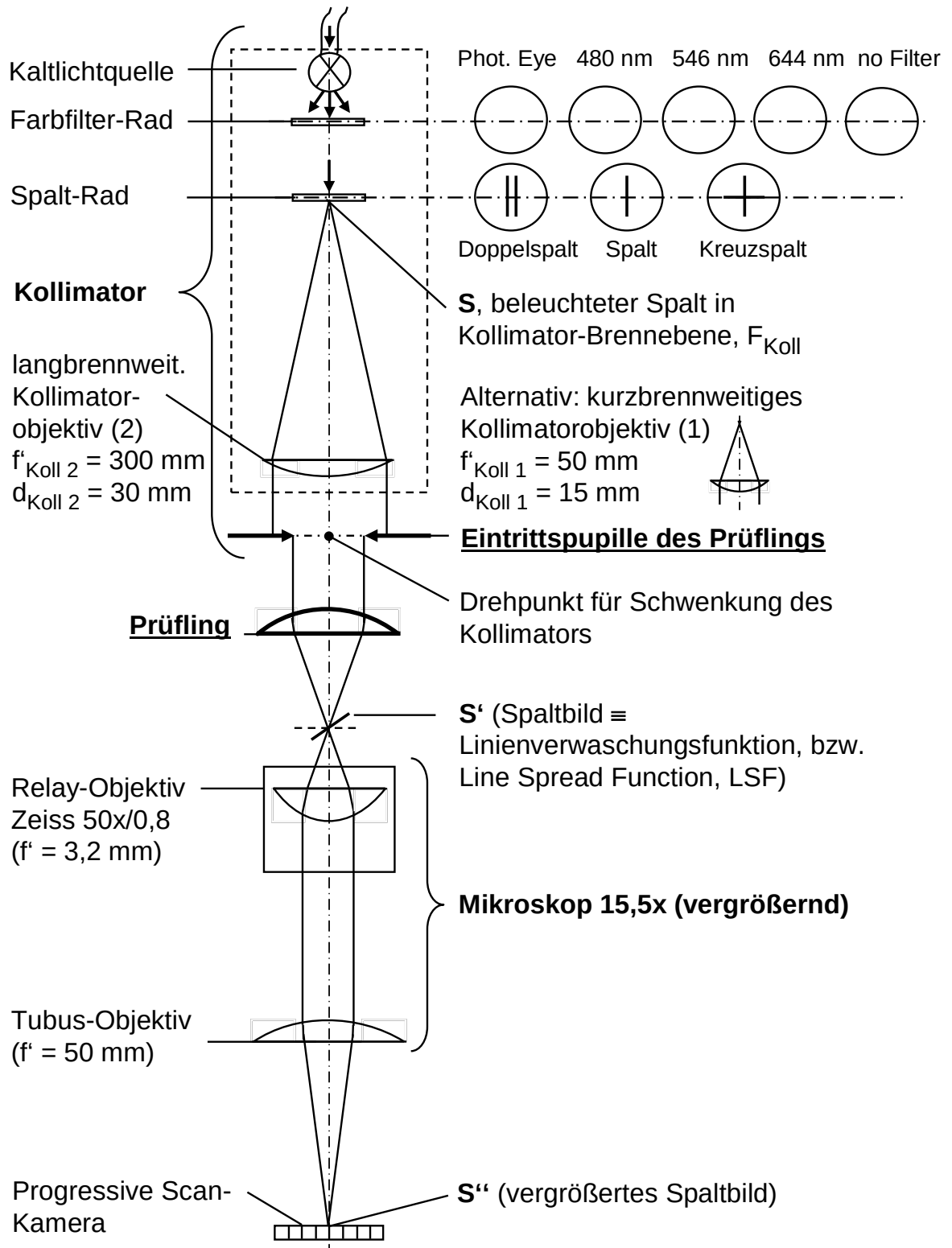


Abb. 6: MTF-Messanlage „ImageMaster HR“ in Infinite-Finite-Nullstellung für MTF - Messungen auf der Achse

Wichtiger Hinweis: Bei der Abbildung des Objektes S in das Endbild S'' wirkt eine **optische Übertragungskette**. Die **Gesamt-MTF** ergibt sich aus dem **Produkt der Einzel-MTFs**. Die Messobjektive müssen also deutlich besser als der Prüfling sein.

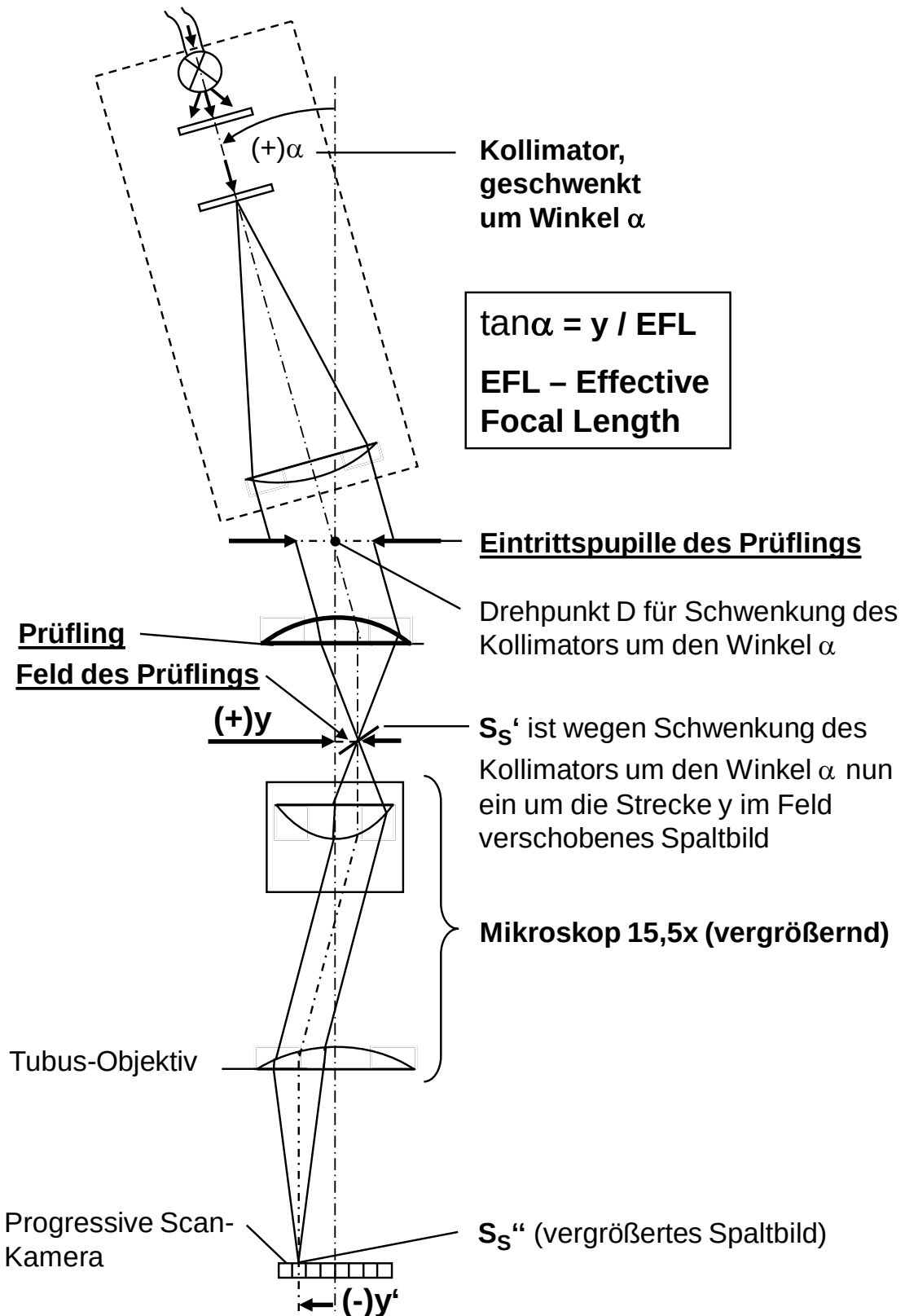


Abb. 7: MTF-Messanlage „ImageMaster HR“ in Infinite-Finite-Schwenkstellung (α) für MTF - Messungen im Feld

B. Messaufgaben / Auswertung

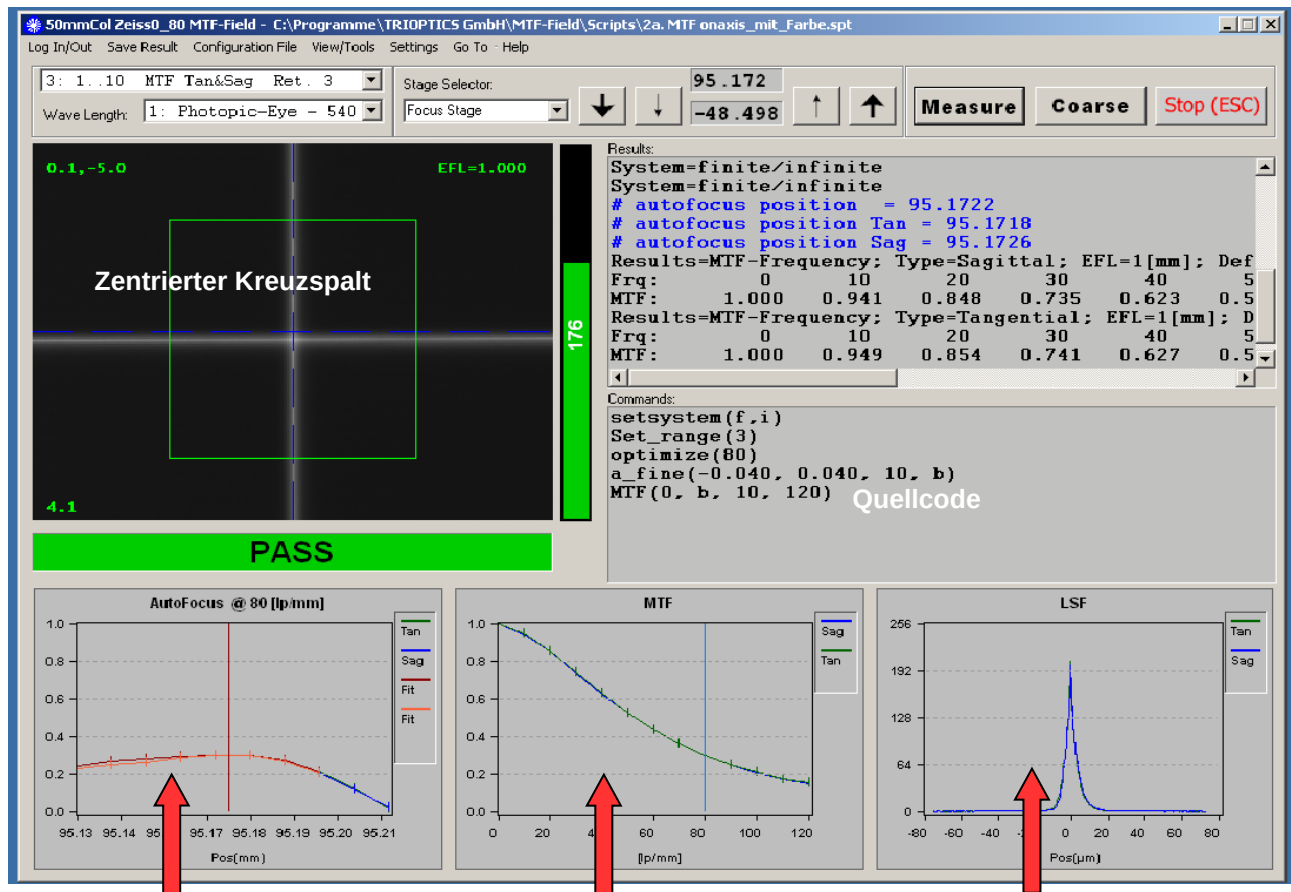
1. Stichpunkte zum Einstellen der MTF-Anlage ImageMaster HR

a) MTF-Messung des Prüflings auf der optischen Achse mit unendlicher Objektentfernung (Infinite-Finite-Messung) (siehe dazu auch Abb. 8)

1. Einsetzen des zu prüfenden Objektivs, z.B. ein $f' = 8,5$ mm Kleinobjektiv.
2. Stelle am Filterrad auf „no Filter“ ein und maximiere die Lichtintensität an der Kaltlichtquelle.
3. Überprüfe die Wahl des eingebauten Kollimatorobjektivs. Das Kollimatorobjektiv $f' = 50$ mm ist für Prüflingsobjektive von $f' = 1$ mm bis 10 mm und das Kollimatorobjektiv $f' = 300$ mm ist für Prüflingsobjektive von $f' = 10$ mm bis 100 mm geeignet.
4. Wähle auf dem Spaltrad durch Anklicken von Nr. 3 im Pull-down-Menü den Kreuzspalt.
5. Fokussiere mittels „Focus Stage“ bis ein Lichtfleck im Menü-Fenster (Life-Bild) auftaucht und die Kamera „anspricht“. Versuche durch vorsichtiges Feinfokussieren (slow motion) das Kreuzspaltbild scharf zu bekommen.
6. Benutze im Menü die Funktion „Tools/Align collimator“ Die Anlage stellt sich automatisch auf den Vertikalspalt ein. Verdrehe den gesamten Kollimator nach Lösen der Klemmschraube bis der angezeigte Wert kleiner als 0,2 ist. Es wird herstellerseitig empfohlen, den Kollimator mit seiner unteren Kante in Höhe der horizontalen Markierung zu stellen. Stelle anschließend wieder auf Kreuzspalt ein.
7. Zentrierung des Prüfobjektivs: Lasse dazu den gesamten Prüflingshalter rechnergesteuert (Funktion: „Sample Rotation“) rotieren und minimiere den Radialschlag auf weniger als 20 μm durch Stellen an den Rändelschrauben am Prüflingshalter.
8. Nach diesen Justagen sollte das Kreuzspaltbild nahe am „blauen Kreuz“ des Menüfensters sein. Wenn nicht, bewege rechnergesteuert die „Image Field Stage“ (Motorschlitten) bis eine hinreichend gute Annäherung an das „blaue Kreuz“ erreicht ist.
9. Gehe im Pull-down-Menü zu „Go To“ und verwende die Funktion „Zero Image Field Stage“. Damit ist die MTF-Anlage in der Nullposition.
10. Stelle eine zur Kamera-Aussteuerung geeignete Lichtintensität an der Kaltlichtquelle ein. Versuche in den Bereich 2 ms bis 10 ms Kamera-Integrationszeit zu kommen, was im Fenster unten links in Echtzeit angezeigt wird.

b) Außeraxiale Messung / Feldmessung des Prüflingobjektivs

Dazu ist es jetzt wichtig den Drehpunkt D des Schwenkarms etwa in die (vermutete) Eintrittspupillenebene zu bringen, s. Abb. 7. Dies geschieht durch axiales Verschieben des unteren Messmoduls am großen Rändelrad rechts.



Findung der optimalen Fokuslage

MTF-Kurve
(Kontrast über LP/mm)

Intensitätsverlauf
über das Zentrierkreuz

Abb. 8: Benutzeroberfläche des Bearbeitungsprogramms nach einer Messung



2. Messen von MTF-Kurven:

Die entsprechenden Programmblocke für die einzelnen Messprozeduren werden an der MTF-Anlage vermittelt.

1. Messen auf der Achse in der besten Fokusebene mit tangentialem und sagittalem Spalt mit **weißem** Licht. Wähle dazu mechanisch am Filterrada das Photopic Eye-Filter. **Variiere die Blende k** des Objektivs auf die Werte 1,3; 2; 4; 8 und 16. Ergibt also 5 Messungen. Vergleiche die Ergebnisse. (Commando-Aufruf: mtf_on_axis)
2. MTF-Messung bei Verwendung **verschiedener Farbfilter mit Durchfokussieren**, um die spektrale Charakteristik des Prüflingsobjektivs kennenzulernen. Wähle dazu den sagittalen Spalt. Verwende zunächst den Weißfilter, dann den Blau-, Grün- und Rotfilter.
Die Blende des Messobjektivs sei dabei **$k = 4$** .
Ergibt also auch 4 Messungen.
Notiere die jeweiligen Brennweiten. Vergleiche die Ergebnisse.
(Commando-Aufruf: mtf_through_axis)
3. Messen der MTF-Kurven im **Feld**, um die Abhängigkeit der MTF vom Feld (Objektfeldwinkel) kennenzulernen. Verwende Blende $k = 4$ und weißes Licht (photopic eye filter).
(Commando-Aufruf: mtf_off_axis). Max. Feldgröße: 4 mm.

3. Auswerten:

Speichern Sie sich die gemessenen MTF-Kurven auf einem Stick und erstellen Sie ein Praktikumsprotokoll, bei dem die gewonnenen MTF-Kurven unter Angabe der verwendeten Einstellparameter dargestellt werden. Kommentieren Sie diese jeweils kurz. Erwähnen Sie Besonderheiten in den MTF-Kurven, die Ihnen auffallen. Optimieren Sie die Darstellung der MTF-Kurven, um eine hohe Anschaulichkeit zu gewährleisten.

Weiterführende Literatur:

[http://www.zeiss.de/C12567A8003B8B6F/EmbedTitelIntern/CLN_30_MTF_de/\\$File/CLN_MTF_Kurven_DE.pdf](http://www.zeiss.de/C12567A8003B8B6F/EmbedTitelIntern/CLN_30_MTF_de/$File/CLN_MTF_Kurven_DE.pdf)

[http://www.zeiss.de/C12567A8003B8B6F/EmbedTitelIntern/CLN_31_MTF_de/\\$File/CLN_MTF_Kurven_2_de.pdf](http://www.zeiss.de/C12567A8003B8B6F/EmbedTitelIntern/CLN_31_MTF_de/$File/CLN_MTF_Kurven_2_de.pdf)