



# Wie liest man MTF- Kurven ?

von

H. H. Nasse

## Vorwort

***„ Die Gesetze der Optik sind komplex und widerwärtig!“***

Dies ist ein schöner, ehrlicher Satz aus einer Foren-Diskussion zum Thema ‚Wie liest man MTF-Kurven?‘, mit dem ein Fotograf zum Ausdruck bringt, wie schwer es manchmal sein kann, diese Zahlenwelt zu begreifen.

Trotzdem möchte ich auf den folgenden Seiten versuchen zu zeigen, das alles halb so schlimm ist, und dass man die wesentlichen Zusammenhänge auch ohne Ausflüge in die höhere Mathematik der Fourier-Optik verstehen kann.

Sie werden nach der Lektüre mehr über die Eigenschaften eines Objektivs aus MTF-Daten ablesen können, die von Herstellern oder Testinstituten veröffentlicht werden. Sie werden aber auch etwas erfahren über die Grenzen von MTF, so dass Sie die Deutung solcher Daten kritischer lesen können.

Und wem das alles doch zu viele Kurven und Zahlen sind, der kann sich damit trösten, dass man die für gute Bilder eigentlich nicht braucht, denn Fotografie ist vor allem ein auf Erfahrung beruhendes Handwerk. Aber es macht natürlich Spaß, sein Werkzeug besser zu verstehen, und den wünsche ich Ihnen beim Lesen dieses ersten Teils. In einem zweiten Teil werden wir MTF an zahlreichen Bildbeispielen veranschaulichen.

## Punktbilder

Wenn ein Fotograf sein Motiv so naturgetreu wie möglich abbilden möchte, dann hätte er an seiner Kamera gern ein ideales Objektiv, das alle von einem Punkt des Gegenstandes ausgehenden Lichtstrahlen wieder exakt in einem Punkt des Bildes zusammentreffen lässt. Nun wissen wir allerdings, dass wir uns diesem Ideal mit realen Objektiven nur nähern können. Bildpunkte im geometrischen Sinn dieses Begriffes gibt es in Wirklichkeit nicht.

Abbildungsfehler der Linsensysteme, Fertigungstoleranzen und letzten Endes auch die Wellennatur des Lichtes sind die Ursachen dafür, dass das von einem Objektpunkt stammende Licht immer auf eine Fläche in der Umgebung des idealen Bildpunktes verteilt wird.

Diese Fläche ist gewissermaßen der kleinstmögliche Zerstreuungskreis; allerdings ist die Lichtverteilung darin nicht gleichmäßig, die Intensität nimmt meist von innen nach außen ab, und die Form ist selten kreisförmig. Man nennt diese Gebilde „**Punktbilder**“ oder im englischen noch treffender „**point spread function**“. Ihre Form und Größe bestimmt die Abbildungsqualität eines Objektivs. Wenn ein Vergleich mit der Malerei erlaubt ist, dann ist das Punktbild die Handschrift, der Pinselstrich eines Objektivs. Und so wie man breite, flache, spitze oder auch struppige Pinsel kennt, haben auch Objektive sehr unterschiedliche Handschriften.

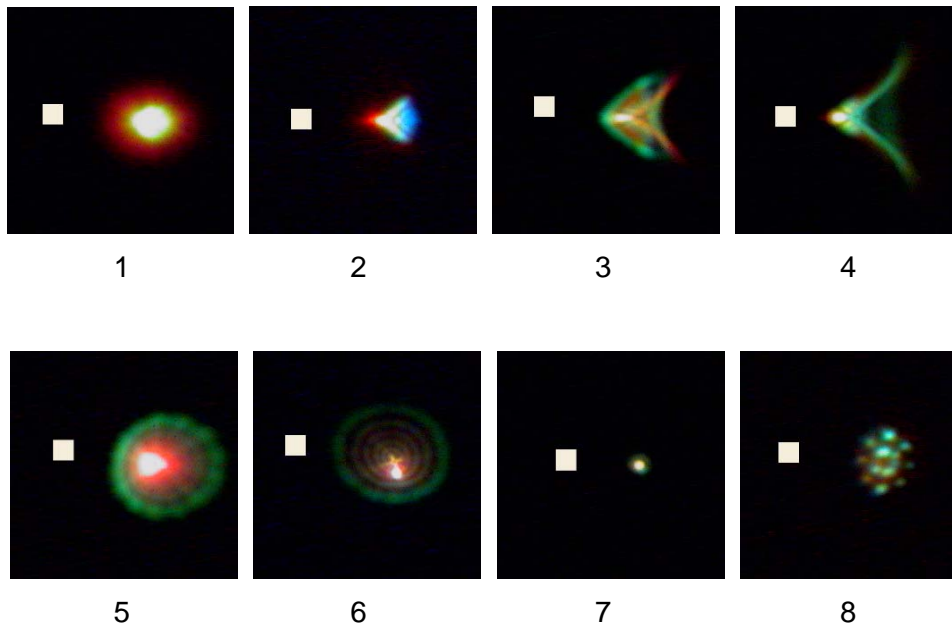


Warum benutzt man es aber trotzdem nicht, um Bildqualität quantitativ zu beschreiben?

Dafür gibt es **drei Gründe**:

Zunächst einmal ist die Form manchmal recht kompliziert und widersetzt sich deshalb einer einfachen zahlenmäßigen Beschreibung. Dies zeigen die folgenden, mit einem Mikroskop fotografierten Beispiele. Die **Bilder Nr. 1 bis 6** sind typisch für mäßige Abbildungsqualität, wie man sie bei lichtstarken Objektiven bei voller Öffnung findet,

bei Weitwinkelobjektiven am Rand, oder auch bei leichter Defokussierung. Als Größenvergleich ist in jedes Bild ein kleines weißes Quadrat einkopiert, es stellt eine  $8,5 \mu\text{m}$  große Pixelfläche dar, wie sie eine 12 MP Kleinbild-Vollformatkamera hat. Alle diese Punktbilder sind also erheblich größer als diese (relativ große) Pixelfläche.



Das **Bild Nr. 7** in der unteren Reihe der Punktbilder ist ein Beispiel für hervorragende Abbildungsleistung. Ein digitaler Sensor sieht allerdings in der Regel solche kleinen Punktbilder nicht. Das **Bild Nr. 8** ganz rechts in der unteren Reihe zeigt dasselbe Punktbild hinter einem Tiefpassfilter, der meist vor dem Sensor angeordnet ist und Moiré-Effekte unterdrücken soll. Im Tiefpassfilter wird also die Bildqualität künstlich verschlechtert, indem das Punktbild durch mehrere doppelbrechende Platten vervielfacht wird.

Der **zweite** Grund besteht darin, dass man solche einzelnen, isolierten Punktbilder fast nie sieht. Nur wenn man z.B. Sterne im schwarzen Nachthimmel fotografiert, macht man in der Praxis das gleiche wie wir hier im Labor getan haben. Die allermeisten Bilder entstehen in der Kamera auf eine komplizierte Art aus den Teilen sehr vieler einzelner Punktbilder.

Denn eine kleine Fläche des Gegenstandes besteht ja aus vielen dicht nebeneinanderliegenden Punkten, und denen entsprechen im Bild hinter dem Objektiv viele dicht nebeneinander liegende ideale Bildpunkte. Da die realen Punktbilder nicht unendlich klein sein können, bedeutet das aber, dass sich die einzelnen Punktbilder überlappen:

Die Intensität in einem Punkt des Bildes (man könnte auch sagen: **in einem Pixel**) entsteht durch eine zweidimensionale Summierung vieler Punktbilder. Es besteht also ein nicht so leicht überschaubarer mathematischer Zusammenhang zwischen dem „Pinselstrich“ und dem Bild, das wir sehen.

Der **dritte** Grund ist, dass sich die gesamte Abbildungskette vom Objektiv bis zum Auge viel eleganter beschreiben lässt mit der Methode, die ich nun erläutern möchte.

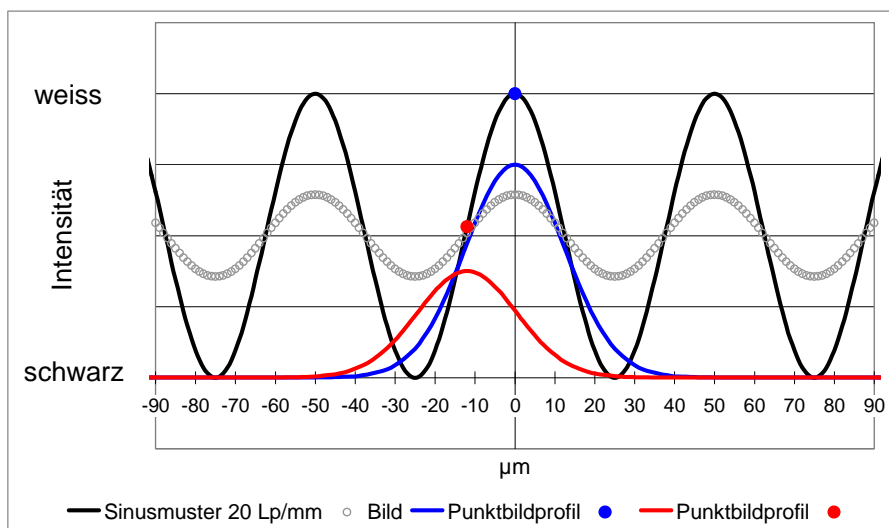
## Modulationsübertragung

Da wir uns vorwiegend dafür interessieren, wie ausgedehnte, im Gegensatz zu Sternen aus unendlich vielen Punkten bestehende Gegenstände abgebildet werden, müssen wir einen anderen Weg finden für eine quantitative Beschreibung der Bildqualität. Dazu untersuchen wir, wie ein möglichst einfach aussehender Gegenstand abgebildet wird, und zwar nehmen wir dafür eine **sinusförmige Helligkeitsverteilung**. Das ist ein Muster aus abwechselnd hellen und dunklen Streifen, bei dem aber der Übergang zwischen hell und dunkel allmählich und stetig erfolgt, eben sinusförmig, wie das bei der Spannung in unseren Steckdosen zeitlich der Fall ist. Das sinusförmige Streifenmuster nehmen wir deshalb, weil es die wunderbare Eigenschaft hat, dass das Ergebnis im Bild wieder ein sinusförmiges Muster ist,

egal wie kompliziert die Form des Punktbildes auch sein mag.

Auch einige seiner Eigenschaften bleiben unverändert oder haben zumindest mit der Abbildungsqualität nichts zu tun: die **Richtung** der Streifen ändert sich nicht, und die **Frequenz**, die Anzahl der Streifen pro Strecke, wird nur entsprechend dem Abbildungsmaßstab verändert.

Was aber nach der Abbildung nicht mehr identisch ist mit dem Original, das ist der **Helligkeitsunterschied** zwischen dunklen und hellen Streifen. Denn die ausgedehnten Punktbilder sorgen eben dafür, dass ein Teil des Lichtes statt an einer hellen Stelle des Streifenmusters an einer Stelle ankommt, die eigentlich ganz dunkel wäre.



Diese Grafik zeigt als Intensitätsprofil (also quer zu den Streifen durchgeschnitten) ein sinusförmiges Streifenmuster (schwarze Kurve). Es hat 20 Perioden pro Millimeter, eine Periode ist also 50 µm lang. Die rote und die blaue Kurve sind Querschnitte durch die Helligkeitsverteilung in einem Punktbild. Die Helligkeit, die bei idealer Abbildung in dem blau markierten Punkt des Sinusmusters vorhanden wäre, wird der blauen Kurve entsprechend in die Umgebung verteilt. Man sieht, dass deshalb in den dunklen „Tälern“ 25 µm links und rechts neben dem blauen Punkt etwas von diesem Licht ankommt.

Auch von dem roten Punkt auf der Flanke des Sinusmusters kommt Licht dort an. Auf der Flanke ist das Sinusmuster zwar dunkler, dafür kommt aber ein größerer Anteil bei -25 µm an, weil der rote Punkt nicht so weit entfernt ist.

So ist die Intensität an der dunklen Stelle des Musters die Summe vieler solcher Beiträge aus der Nachbarschaft. Das Ergebnis ist dann die schwächer modulierte Kurve, die mit „Bild“ bezeichnet ist. Die Helligkeit der dunklen Streifen wird durch die Abbildungsfehler angehoben, in den hellen Streifen wird sie kleiner.

Den Unterschied zwischen hell und dunkel nennt man in der Optik „**Kontrast**“. Allgemeiner heißt bei allen sinusförmig periodisch veränderlichen Größen der Unterschied zwischen Maximum und Minimum „**Modulation**“. Wenn wir die Modulation des Bildes mit der Modulation des Gegenstandes vergleichen, indem wir einfach diese beiden Zahlen durcheinander dividieren, dann haben wir eine einfache Zahl, die etwas über die Abbildungseigenschaft des Objektivs sagt: die **Modulationsübertragung** oder **Kontrastübertragung** (engl. *modulation transfer* – damit haben wir also schon zwei Buchstaben des Begriffs ‚MTF‘ verstanden). Es ist eine Zahl zwischen 0 und 1 oder zwischen 0 und 100 %.

Der Fotograf ist ja gewohnt, Hell-Dunkel-Unterschiede durch die Anzahl von Blendenstufen auszudrücken, was auch ganz vernünftig ist, weil die Wahrnehmung unseres Auges solchen logarithmischen Skalen folgt.

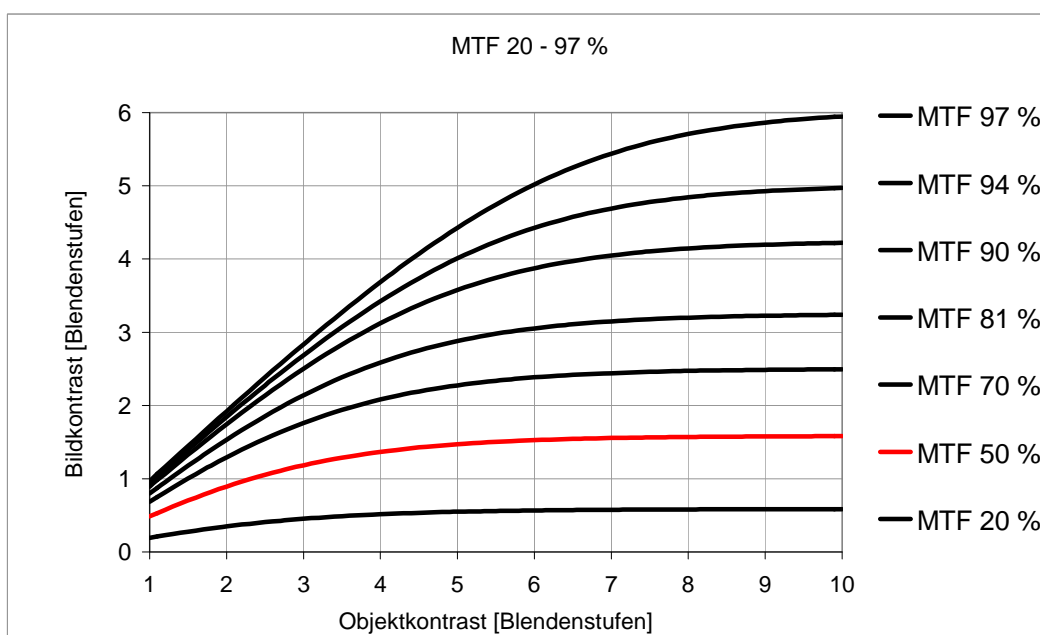
Was bedeutet nun aber z.B. eine Kontrastübertragung von 50%, wenn bei unserem Streifenmuster ein Unterschied von 6 Blendenstufen zwischen hellsten und dunkelsten Stellen besteht, d.h. ein Helligkeitsverhältnis von 1 zu  $2^6 = 1$  zu 64? Ist dann im Bild der Unterschied 3 Blendenstufen oder 1 zu 32, was 5 Blendenstufen entspräche?

Beides wäre falsch, denn in Wahrheit hätten wir im angenommenen Fall im Bild noch etwa 1.5 Blendenstufen Kontrast. Das liegt daran, dass die Größe „Kontrast“ in der Optik wie folgt definiert ist:

$$\text{Kontrast} = \frac{\text{Maximum} - \text{Minimum}}{\text{Maximum} + \text{Minimum}}$$

In unserem Beispiel ist also der Kontrast des Gegenstandes 63 geteilt durch 65, also etwa 0.97. Nach Abbildung mit Kontrastübertragung 50% ist der Kontrast im Bild nur noch halb so groß, also etwa 0.48. Dann verhält sich Minimum zu Maximum etwa wie 1:2.9 ( $1.9/3.9 = 0.48$ ).

Die folgende Grafik zeigt, wie Objektkontrast und Bildkontrast zusammenhängen, wenn man sie in Blendenstufen misst:



Wir können daran drei **wichtige Eigenschaften von MTF** erkennen, an die wir uns beim Lesen von MTF-Kurven wieder erinnern sollten:

1. Kleine Unterschiede hoher MTF-Werte sind bei hohen Objektkontrasten wichtig.
2. Schwache Tonwertvariationen von weniger als einer Blendenstufe benötigen hingegen keine besonders hohen MTF-Werte. Unterschiede oberhalb von 70-80% sind dann kaum relevant.
3. Bei sehr kleinen MTF-Werten ist es praktisch gleichgültig, wie groß der Objektkontrast ist, der Bildkontrast ist immer klein.

Das ist übrigens der Grund dafür, dass auf Datenblättern von Filmen immer das Auflösungsvermögen auch für den kleinen Kontrast 1:1.6 angegeben wurde. Die Auflösungswerte für den Kontrast 1:1000 können nur mit einer Kontaktbelichtung gemessen werden. Kein Objektiv der Welt kann bei feinsten Strukturen (also hohen Ortsfrequenzen) einen Kontrast von zehn Blendenstufen darstellen! Die Abschätzung des Informationsgehaltes von Filmbildern auf der Basis dieser höheren Auflösungswerte ist also zu optimistisch.

## Modulationsübertragungsfunktion, Auflösungsvermögen

Es leuchtet natürlich jedem ein, dass ein einziges Streifenmuster nicht ausreicht, um die Qualität eines Objektivs zu beschreiben. Ein sehr grobes Muster mit großen Abständen zwischen hellen und dunklen Streifen würde selbstverständlich auch von einem Objektiv mit relativ großem Punktbild gut wiedergegeben werden können. Wenn wir aber den Streifenabstand kleiner machen, so dass der Abstand von hell nach dunkel der Größe des Punktbildes nahe kommt, dann wird von einer hellen Zone sehr viel Licht in die dunkleren Zonen des Musters hineinstrahlen, und der Bildkontrast wird spürbar kleiner sein.

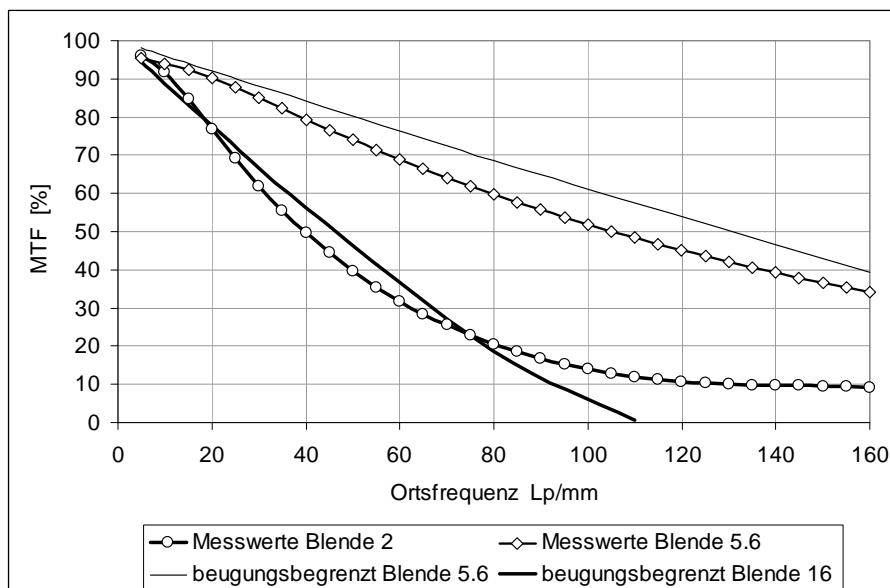
Wenn wir noch einmal den Vergleich mit der Malerei bemühen wollen: grobe Strukturen kann man gut mit einem dicken Pinsel malen, für feine Details aber braucht man den spitzen Haarpinsel.

Wir müssen also untersuchen, wie das Objektiv viele unterschiedlich feine Streifenmuster abbildet, d.h. wir müssen für jedes einzelne dieser Muster die Modulationsübertragung bestimmen.

Wir erhalten dann eine ganze Reihe von Zahlen, und wenn wir die grafisch über einem Parameter darstellen, der die Feinheit des Streifenmusters beschreibt, dann erhalten wir als eine Kurve die **Modulationsübertragungsfunktion**.

Die Feinheit des Streifenmusters messen wir, indem wir im Bild zählen, wie viele Perioden des Musters in einer Strecke von einem Millimeter enthalten sind.

Eine Periode ist der Abstand zwischen zwei hellen oder zwei dunklen Streifen, oder die Breite eines aus einem dunklen und einem hellen Streifen bestehenden Linienpaars. Die Anzahl der Perioden pro Millimeter in der Bildebene ist die **Ortsfrequenz**, angegeben in der Einheit **Linienpaare pro Millimeter**, abgekürzt **Lp/mm**.

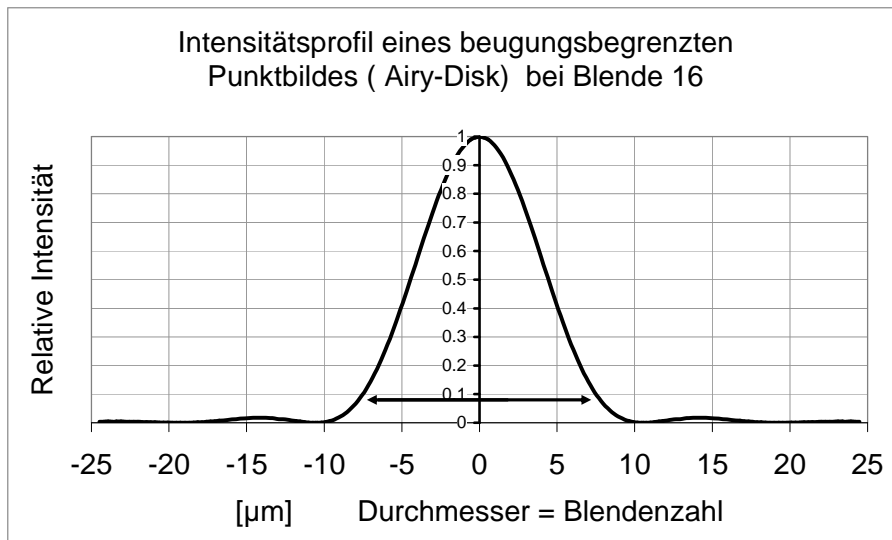


*Modulationsübertragungsfunktion eines 50mm-Kleinbildobjektivs in der Bildmitte, gemessen bei Blende 2 und Blende 5.6, zum Vergleich sind noch die beugungsbegrenzten Übertragungsfunktionen für Blende 5.6 und Blende 16 eingezeichnet (einfache Linien ohne Kreise). Die beugungsbegrenzte Abbildung ist die beste überhaupt mögliche. Auf der waagerechten Achse ist die Ortsfrequenz in Linienpaaren pro mm aufgetragen.*



Eine **beugungsbegrenzte** Abbildung besitzt eine fast vollkommen gerade MTF-Kurve, die proportional zur Ortsfrequenz abfällt. Den MTF-Wert Null erreicht sie bei der sogenannten **Grenzfrequenz**, welche durch die jeweilige Blendenzahl und die Wellenlänge des Lichtes bestimmt ist.

Als eine Faustformel für die mittleren Wellenlängen des sichtbaren Lichtes gilt: **die Breite des Punktbildes in  $\mu\text{m}$  entspricht der Blendenzahl, und die Grenzfrequenz ist etwa: 1500 geteilt durch die Blendenzahl.**



Bei **realen Objektiven** mit größeren Abbildungsfehlern fallen die MTF-Werte zunächst schnell ab und nähern sich dann ganz allmählich der Null-Linie. Die Kurven zeigen also einen ausgeprägten Durchhang. Im Beispiel auf der vorigen Seite sieht man das sehr schön an der Kurve für Blende 2; bei Blende 5.6 ist das Objektiv nicht weit entfernt vom physikalisch möglichen Optimum.

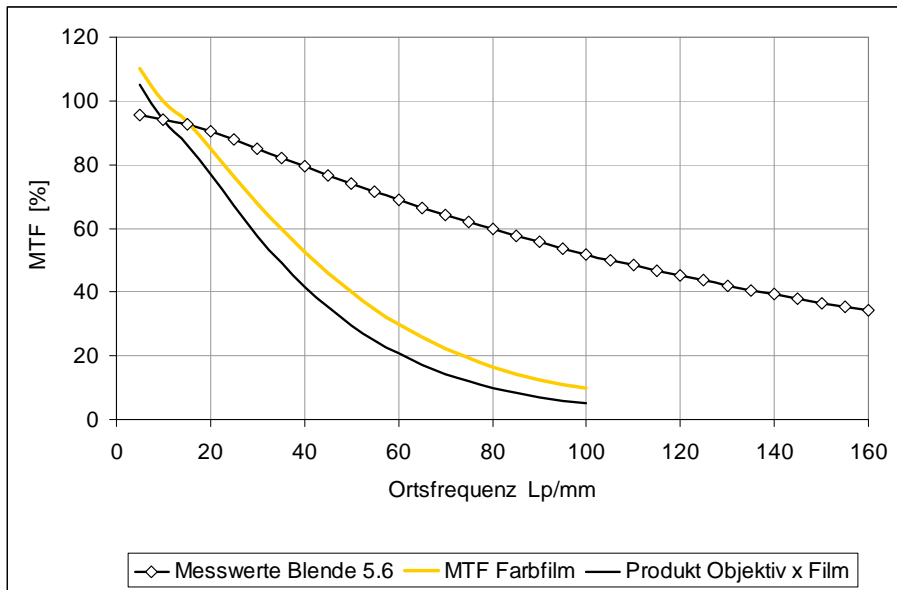
Die Ortsfrequenz, bei welcher der MTF-Wert Null erreicht oder einen kleinen Schwellenwert (z.B. 10%) unterschreitet, ist das **Auflösungsvermögen** des Objektivs **im Luftbild**. So fein dürfen periodische Streifenmuster werden, bevor ihr Bild in strukturloses Grau übergeht.

Gerade die obige Kurve für Blende 2 zeigt, dass diese Auflösungsgrenze schwer zu messen ist; denn wegen des sehr flachen Verlaufs im hohen Ortsfrequenz-Bereich hängt das Ergebnis sehr empfindlich vom geforderten Mindestkontrast ab. Die Messung ist also sehr unsicher. Das Auflösungsvermögen im Luftbild ist schon aus diesem Grund kein geeignetes Qualitätskriterium für Objektive!

Es sollte auch nicht verwechselt werden mit dem Auflösungsvermögen, das zusammen **mit einem Bildsensor** erreicht wird. Und damit kommen wir nun auf den anfangs angedeuteten dritten Grund zu sprechen, warum wir Bildqualität mit Modulationsübertragung beschreiben:

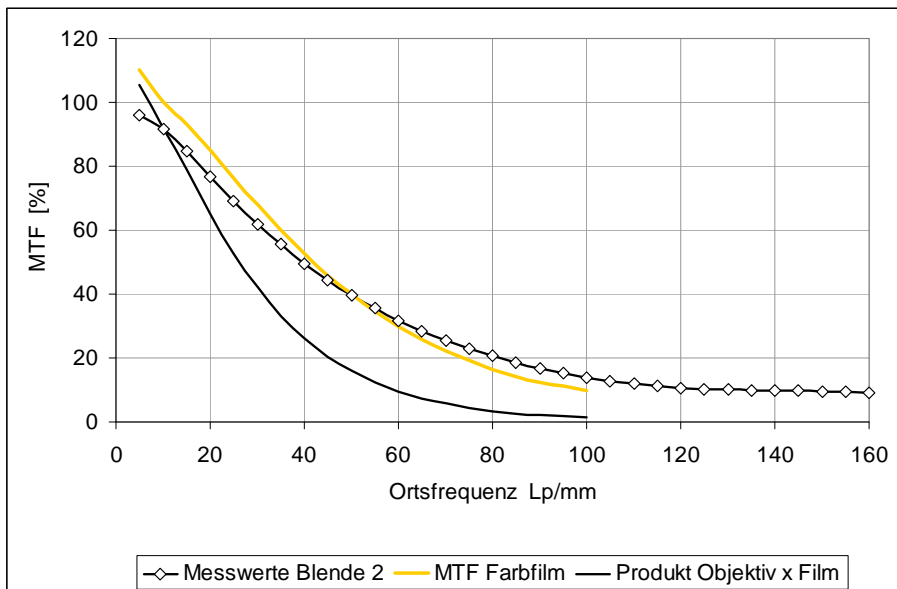
Wir betrachten ja nie das Bild des Objektivs direkt mit unserem Auge, sondern benötigen weitere Glieder der Abbildungskette: auf jeden Fall einen Bildsensor, analog oder digital, evtl. einen Scanner, einen Drucker oder eine Projektionsoptik.

Alle diese Komponenten, ja sogar das menschliche Auge, haben ihre eigenen Wiedergabeeigenschaften, die auch durch jeweils eine Übertragungsfunktion beschrieben werden können. Und die schöne Eigenschaft von MTF besteht nun darin, dass die MTF der gesamten Abbildungskette (näherungsweise) das **Produkt aller einzelnen MTF** ist. Betrachten wir ein paar typische Beispiele:



*Produkt von zwei Modulationsübertragungsfunktionen: sehr gutes Kleinbild-Objektiv und Farbnegativfilm. Das Produkt ist immer kleiner als der kleinste Faktor in der Abbildungskette.*

*In diesem Fall ist die Gesamtmodulation im Wesentlichen durch den Film limitiert. Wenn man mindestens 10% Modulationsübertragung fordert, dann muss man ein Auflösungsvermögen von 80-100 Lp/mm erwarten. Wenn weitere Glieder wie Projektionsoptik oder Auge berücksichtigt werden, liegt das Produkt noch etwas tiefer.*



*Produkt von zwei Modulationsübertragungsfunktionen: Kleinbildobjektiv mit moderater Leistung und Farbnegativfilm. Das Produkt wird jetzt etwa gleich stark von Objektiv und Film bestimmt.*

Wenn man den Verlauf des Produktes von nur zwei Übertragungsfunktionen betrachtet und bedenkt, dass eigentlich noch mehr Übertragungsfunktionen beteiligt sind, die das Produkt nur noch kleiner machen können, dann leuchtet es ein, dass man den ganzen Bereich der sehr hohen Ortsfrequenzen nicht betrachten muss.

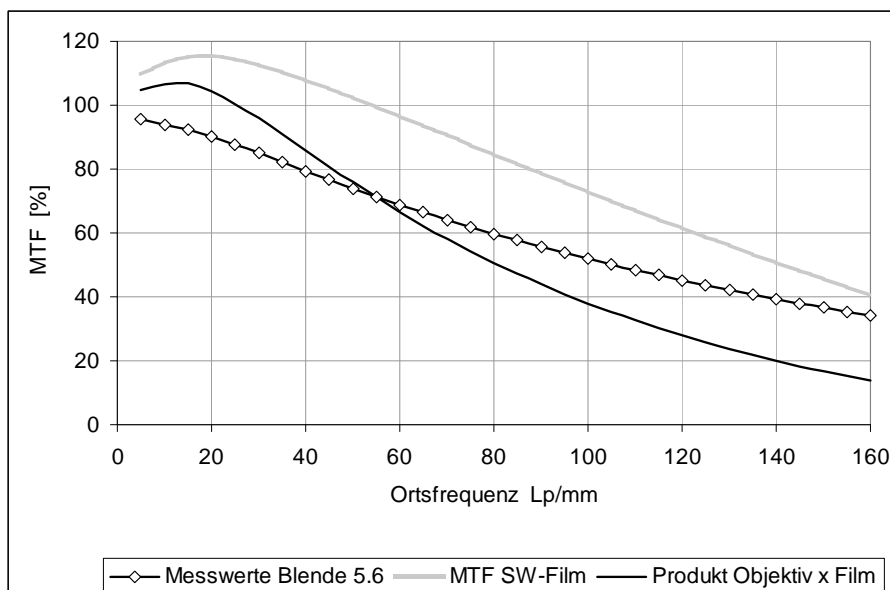
Digitale Sensoren mit ca. 24 Megapixeln im Kleinbildvollformat oder ca. 15 MP im APS-C Format haben Nyquist-Frequenzen von ca. 90 Lp/mm. Ihre theoretischen maximalen Auflösungen sind also ungefähr mit dem Farbnegativfilm vergleichbar. Deshalb genügt für diese Formate in aller Regel die Betrachtung der Ortsfrequenzen bis 40 Lp/mm, wobei aber bei großer Pixelzahl die 40 Lp/mm etwas wichtiger sind als sonst.

Auch eine andere Überlegung legt uns nahe, dass dies eine vernünftige Beschränkung ist: wenn man einen A4-Print aus 25 cm Entfernung betrachtet, also die Bildbreite unter einem Winkel von 60° sieht,

dann kann das menschliche Auge maximal 1600 Lp/Bildhöhe auflösen, weil es in dieser so genannten deutlichen Sehweite maximal 8 Lp/mm auflöst. Bezogen auf das Kleinbildformat mit 24 mm Bildhöhe entspricht das 66 Lp/mm. Die für das Auge wesentlichen Ortsfrequenzen liegen also auch in dem Bereich bis 40 Lp/mm.

Wenn man allerdings das betrachtete Bild wesentlich stärker vergrößert und trotzdem aus recht geringer Entfernung betrachtet, dann kann das Auge natürlich die höchsten Ortsfrequenzen des Systems nutzen und sieht plötzlich Schwächen, die bei normaler Bildbetrachtung nicht bemerkt würden. Das macht übrigens jeder, der seine digitalen Bilder auf einem großen Monitor in 100%-Darstellung ansieht. Da ist das Bild einer 12MP-Kamera ja über einen Meter breit.

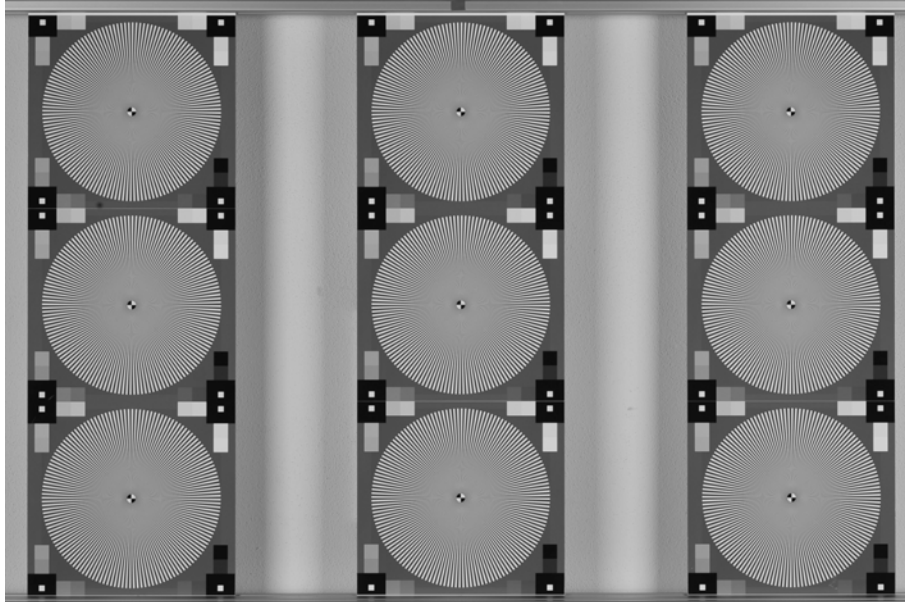
Ein Sensor, der die Objektivleistung auch bei höheren Frequenzen nutzen kann, ist übrigens einer der ältesten: der niedrigempfindliche Schwarz-Weiß Film.



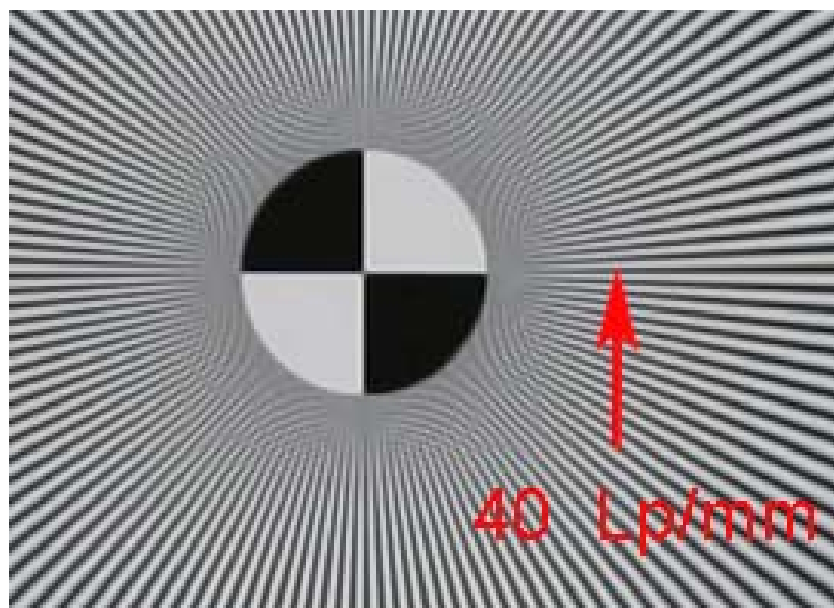
*Gutes Objektiv kombiniert mit hoch auflösendem SW-Film (hier Daten von T-Max 100)*

Dass 40 Lp/mm zumindest für das Kleinbildformat schon eine recht hohe Ortsfrequenz ist, versteht man anschaulich in den folgenden Bildern.

Sie zeigen eine Aufnahme der bekannten Siemenssterne, mit denen vielerorts Kameras getestet werden. Das ganze Bild einer 12 MP Kamera im Kleinbild-Vollformat enthält neun Sterne:



Ein stark vergrößerter Ausschnitt zeigt das Zentrum eines Siemenssterns, und wie dicht die Ortsfrequenz 40 Lp/mm an diesem Zentrum liegt:



## Kantenschärfe, Bildkontrast

Vielleicht sollten wir an dieser Stelle noch einmal kurz zusammenfassen: wir wissen jetzt, warum bei der optischen Abbildung und auch in den weiteren Stufen der Bilderzeugung bis zur Wahrnehmung die Modulation sinusförmiger Streifenmuster mit zunehmender Ortsfrequenz immer kleiner wird. Doch was sagen uns diese Zahlen über die Qualität realer Bilder? Was haben Begriffe wie **Schärfe, Brillanz, Detailauflösung** usw. mit diesen Zahlen zu tun?

Denn in unseren Motiven gibt es ja keine sinusförmigen Muster. Selbst im Labor kann man sie mit viel Aufwand nur näherungsweise erzeugen und verwendet üblicherweise andere Testobjekte, aus denen die Sinusmodulation mathematisch abgeleitet wird.

Streifenmuster mit rechteckförmigem Intensitätsprofil, also anders als bei Sinusmustern nicht mit allmählichem sondern mit sprunghaftem Wechsel zwischen schwarz und weiß,

gibt es häufig auf Testtafeln zum Prüfen von Objektiven und Kameras und zur Bestimmung des praktischen Auflösungsvermögens.

Für Rechteckmuster ist übrigens die Kontrastübertragung meist etwas höher als für ein Sinusmuster mit gleicher Ortsfrequenz. In realen Fotomotiven sind aber exakte Rechteckmuster ebenfalls eher selten zu finden.

Feine periodische Muster stellen überhaupt nur einen kleinen Teil der Motiveigenschaften dar, an denen unser Auge Bildqualität erkennt. Am wichtigsten sind eigentlich die **Kanten**, die Grenzlinien zwischen zwei Flächen mit unterschiedlicher Helligkeit oder Farbe.

Wir wollen daher jetzt verstehen, welcher Zusammenhang zwischen MTF und Kantenwiedergabe besteht, und dabei kehren wir dann doch wieder zu unserem Ausgangspunkt, zum Punktbild zurück.

*Die folgenden Grafiken zeigen **von links nach rechts**:*

### **Links:**

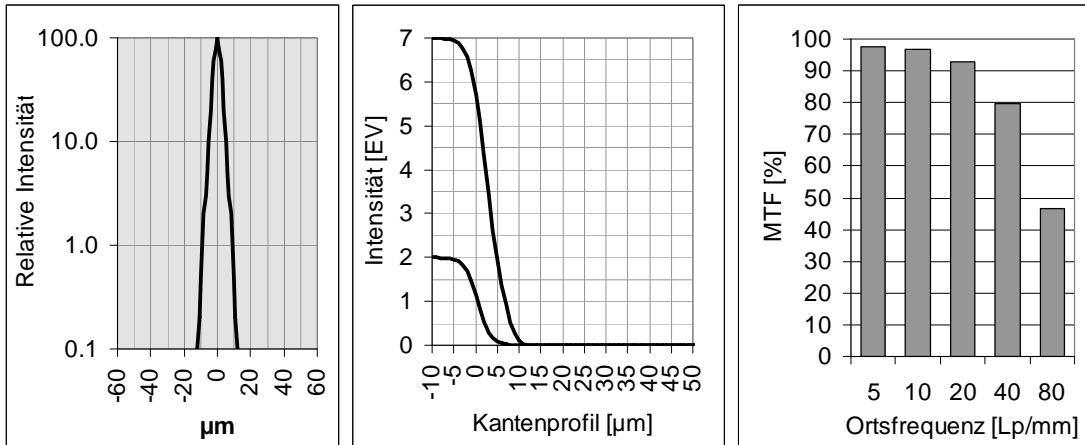
**Intensitätsprofil des Punktbildes**, mit logarithmischer Skala bis herunter zu  $1/1000$  der Maximalintensität in der Mitte. Die Breite des Punktbildes wird in  $\mu\text{m}$  angegeben,  $1 \mu\text{m}$  ist  $1/1000 \text{ mm}$ .

### **Mitte:**

**Intensitätsprofil von zwei Kantenbildern** mit großem und kleinem Helligkeitssprung. Die vertikale Skala ist die dem Fotografen vertraute logarithmische Blendenskala: jedes Skalenintervall bedeutet eine Halbierung der Intensität. Die waagerechte Skala misst wieder die Strecke im Bild in  $\mu\text{m}$ . Links ist die helle und rechts die dunkle Seite der Kante.

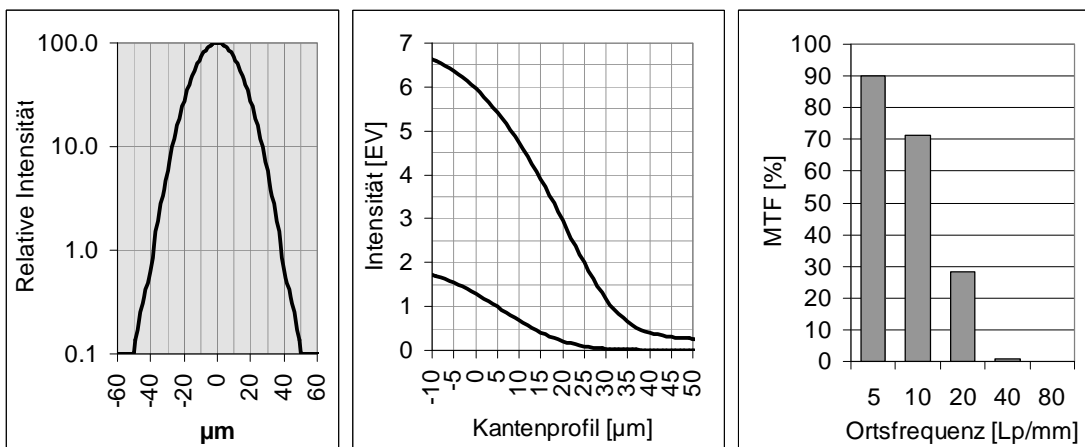
### **Rechts:**

Als Balkendiagramm die dazu gehörende **Modulationsübertragung** für fünf Ortsfrequenzen 5, 10, 20, 40 und 80 Lp/mm.

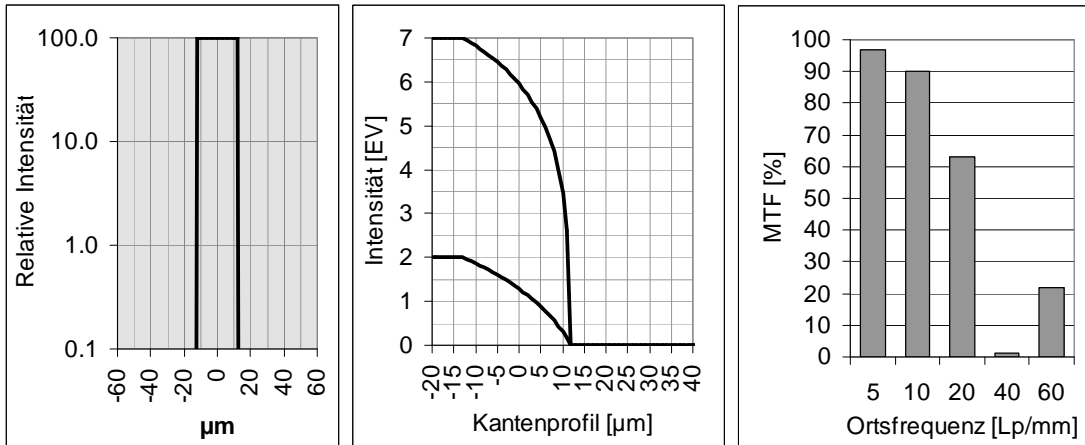


Dies ist ein Beispiel für sehr gute Abbildungsleistung im Kleinbildformat; das Punktbild ist schmal, der Übergang an einer Kante von weiß nach schwarz ist nicht breiter als etwa 10  $\mu\text{m}$ , also sehr steil. Der Fotograf sagt dann: das Bild der Kante ist scharf. In der Sprache der Modulationsübertragung erkennt man diese Eigenschaft daran, dass alle Werte bei den wichtigen Ortsfrequenzen sehr hoch sind und bei den höheren Frequenzen nicht so stark fallen.

Bei einem Objektiv mit solcher Abbildungsleistung ist die erzielte Bildqualität im Allgemeinen durch den Sensor begrenzt oder durch andere Einflüsse wie Fokussiergenauigkeit, Verwackeln usw.

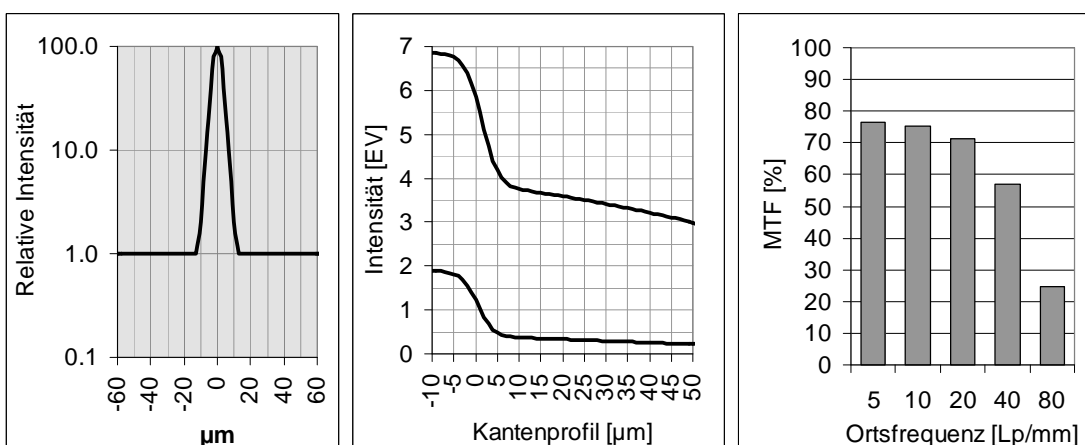


Hier ist der Durchmesser des Punktbildes deutlich größer; das Bild der Kante von weiß nach schwarz ist längst nicht so scharf, das Kantenprofil ist flach, denn der Übergang von maximaler Helligkeit bis zum Schwarz benötigt je nach Größe des Helligkeitssprungs 30 bis 50  $\mu\text{m}$ . Immerhin wird nach dieser Strecke ein tiefes Schwarz erreicht, der Kontrast zwischen den Enden der obigen Skala ist also hoch. Die MTF-Werte verraten uns diese Eigenschaften dadurch, dass sie bei den höheren Ortsfrequenzen schnell fallen, während sie bei der niedrigsten Frequenz nur wenig verändert sind im Vergleich zum vorigen Beispiel.



Ein breites, kastenförmiges Linienbild bedingt natürlich wieder eine geringe Kantenschärfe. Die MTF-Werte der niedrigen und mittleren Ortsfrequenzen bis 20 Lp/mm sind normal, sogar bei 60 Lp/mm ist noch eine akzeptable Kontrastübertragung vorhanden. Wenn man nur diese Frequenzen betrachten würde, hätte man den Eindruck einer recht ordentlichen Abbildungsleistung.

**Aber:** bei 40 Lp/mm ist kein Kontrast vorhanden! Die Kurve der Modulationsübertragung kann auf Null fallen und dann wieder ansteigen. Man spricht dann von ‚**Scheinauflösung**‘ (engl. ‚spurious resolution‘), was ein etwas unglücklicher Ausdruck ist, denn die Struktur mit 60 Lp/mm wird sauber aufgelöst wiedergegeben. Dass dabei schwarz und weiß vertauscht wird, merkt man ja meist nicht (außer bei Siemenssternen), und bei 80 Lp/mm käme die nächste Nullstelle und darüber wieder Auflösung, wo sogar schwarz und weiß wieder an der richtigen Stelle ist. Man möchte mit dem Begriff ‚Scheinauflösung‘ zum Ausdruck bringen, dass die isolierte Messung einer hohen Auflösung bei einer einzigen zufällig günstigen Ortsfrequenz eine Bildqualität vortäuschen kann, die gar nicht vorhanden ist. Diesen Typ findet man kaum in MTF-Kurven, er tritt aber in der Praxis auf bei Fokussierfehlern und bei Bewegungsunschärfe.



Hier ist das Punktbild ähnlich schlank wie im ersten Beispiel, aber mit einem schwachen Halo umgeben. Die Kantenschärfe ist teilweise hoch, aber gleichzeitig reicht ein breiter heller Saum in die dunkle Zone hinein. Der Fotograf sagt dann, das Objektiv zeige Überstrahlungen. Der Kontrast in der Umgebung der Kante ist klein.

Die MTF-Werte dieses 4. Typs zeichnen sich wie im ersten Beispiel dadurch aus, dass sie mit steigender Ortsfrequenz nur langsam abfallen. Aber die Werte der niedrigen Ortsfrequenzen 5 und 10 Lp/mm haben auffallend niedriges Niveau.

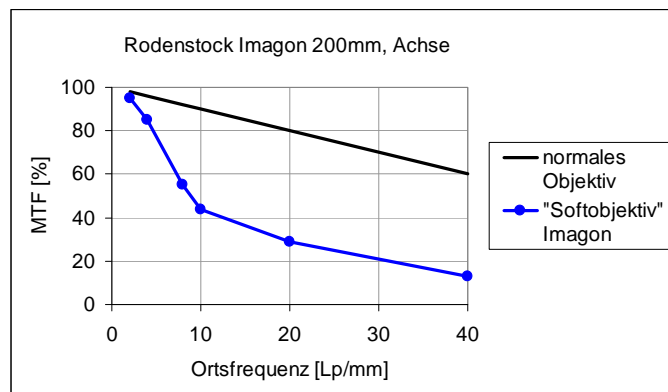
Die Abbildungseigenschaften eines Objektivs mit diesem Charakter können etwas widersprüchlich sein und werden auch je nach Bildinhalt unterschiedlich beurteilt.

Kanten mit niedrigem bis mittlerem Kontrast werden scharf wiedergegeben, insbesondere wenn man knapp belichtet. Kontrastreiche feine Strukturen erscheinen aber etwas flau, kontrastreiche Kanten und Lichter zeigen Überstrahlungen oder wirken bei reichlicher Belichtung sogar verbreitert

Lichtstarke Standard-Objektive aus den 60er Jahren waren bis auf wenige Ausnahmen bei den großen Öffnungen so korrigiert. Sie hatten bei 10 Lp/mm nur 60-70 % MTF, während heute bei diesem Typ 80-90 % üblich sind.

Man sagte damals, die Objektive seien ‚auf Auflösung optimiert‘, was nicht ganz richtig ist, denn sie hatten lediglich eine gute Kantenschärfe, während das Auflösungsvermögen für feine periodische Strukturen auch nicht besser war als bei anders ausgelegten Optiken. Mit anderen Worten: sie hatten ein Punktbild mit schmalen Kern und großem Halo. Als noch die Schwarz-Weiß Fotografie dominierte, konnte man die kontrastarme Wiedergabe dieser Objektive durch Vergrößerung auf Papier harter Gradation kompensieren. Die Farbfotografie mit ihren weniger flexiblen Laborprozessen verlangte dann eine Änderung der Korrektur hin zu besserer Kontrastwiedergabe.

Für manche fotografischen Themen sind so ausgelegte Objektive übrigens sehr schön. Das berühmte Porträt/Soft-Objektiv ‚Imagon‘ hat folgende Übertragungsfunktion:

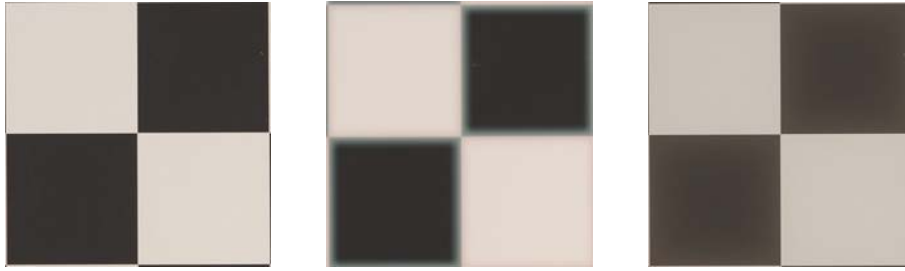


Es ist übrigens keineswegs so, dass man sich bei der Konstruktion eines Objektivs entscheiden muss zwischen hohem Auflösungsvermögen und einer guten Kontrastwiedergabe; bei gut korrigierten Objektiven ist beides in Ordnung.

Aber was heißt denn eigentlich ‚Kontrastwiedergabe‘? Wir dürfen nicht vergessen, dass wir hier immer über **Mikro-Kontrast** sprechen, wenn wir einfach ‚Kontrast‘ sagen, also über Strukturen, die wir z.B. in einem Dia gerade noch oder gerade nicht mehr mit bloßem Auge sehen können. Wenn wir aber z.B. ein Schachbrett formatfüllend fotografieren, dann hat der Kontrast zwischen den schwarzen und weißen Feldern damit gar nichts zu tun. MTF-Messungen sagen nichts über diesen

**Makro-Kontrast.** Sie beurteilen nur die Korrektur des Objektivs, also die kleinen Abweichungen der Lichtstrahlen, während der Makro-Kontrast vom Falschlichtverhalten des Objektivs abhängt, also von den großen Abweichungen, bei denen das Licht sehr weit entfernt von seinem ursprünglichen Ziel in der Bildebene ankommt. Diese entstehen durch unerwünschte Reflexionen zwischen den optischen Flächen und durch die Lichtstreuung an inneren Fassungssteilen. Alle diese Eigenschaften werden oft miteinander vermischt in dem Begriff ‚Brillanz des Bildes‘. Gute MTF-Werte bei niedrigen Ortsfrequenzen sind notwendig, aber sie sind noch keine Garantie für brillante Bilder.





*Ausschnitte aus formatfüllenden Bildern eines Schachbrettes, links mit perfekter Abbildungsqualität, in der Mitte mit niedrigem Mikro-Kontrast, rechts mit hohem Falschlicht.*



*Die Eigenschaften der obigen Bilder werden auch durch ihre Histogramme verdeutlicht: beim Bild von dem Objektiv mit schlechtem Mikro-Kontrast (Mitte) ist insbesondere der rechte Gipfel nach links zu niedrigeren Grauwerten verbreitert, weil das Weiß an den überstrahlten Kanten die eigentlich schwarzen Flächen aufhellt. Der Abstand der beiden Gipfel auf der Grauskala ist aber gleich groß wie beim guten Bild links.*

*Beim rechten Bild mit dem hohen Falschlichtniveau ist der linke Gipfel des Histogramms nach rechts verschoben, weil das Schwarz in der ganzen Fläche durch das Falschlicht aufgehellt wird.*

Die oben gezeigten vier Grundtypen von Punktbildern und zugehörigen MTF-Kurven findet man in allen Objektivdaten wieder, natürlich nicht immer in der hier vorgestellten exemplarischen Form, sondern in der Regel Mischungen und Kombinationen daraus.

Wir lernen aus diesen Beispielen auch, dass man MTF immer bei **mehreren** Ortsfrequenzen betrachten muss. Was ein Wert von 75% bei 10 Lp/mm bedeutet wäre nur bei der Abbildung eines sinusförmigen Musters völlig eindeutig. In realen Bildern kommt es immer auch darauf an, wie die Werte bei 20 und 40 Lp/mm sind.

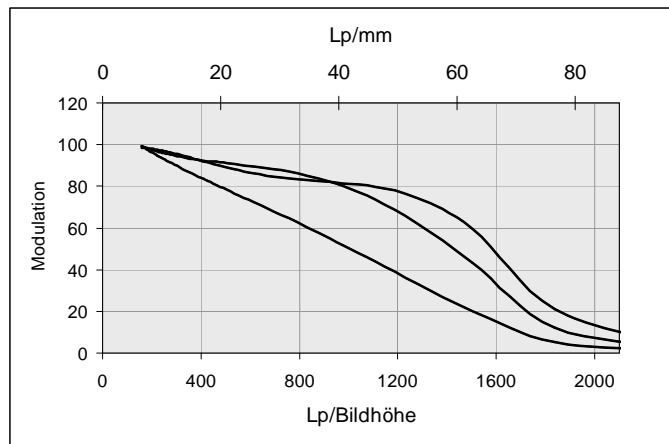
Sind sie sehr hoch, dann zeigt das Objektiv Überstrahlungen an kontrastreichen Kanten und Lichtern, wie unser 4. Beispiel. Sind sie aber ebenfalls niedriger als normal, dann ist das Objektiv einfach weniger scharf, vielleicht etwas defokussiert, aber es ist frei von Überstrahlungen.

Testverfahren, die nur einen Punkt der Modulationsübertragungsfunktion messen, z.B. die Auflösung oder die Ortsfrequenz, bei der 50% MTF erreicht wird, sind nicht viel Wert! Das ist in der Optik genauso wie bei einer HIFI-Anlage: wenn ich da weiß, welche Frequenz die Lautsprecher maximal übertragen oder wie laut 440Hz sind, weiß ich noch nicht, wie Musik klingt.

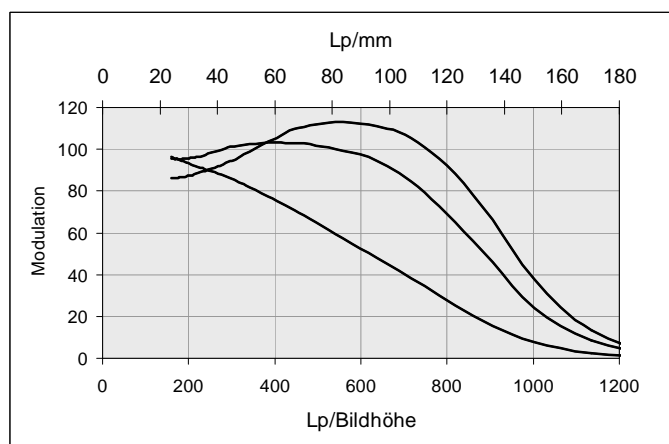
## Kantenschärfe in digitalen Bildern

Bei der digitalen Prozessierung von Bilddaten lässt sich die Übertragungsfunktion der Kamera stark beeinflussen. Beim **Schärfen** (edge enhancement) wird die helle Seite einer Kante noch etwas heller und die dunkle Seite noch etwas dunkler gemacht. Dadurch werden Mikro-Kontrast und Kantensteilheit erhöht und der subjektive Schärfeeindruck deutlich verbessert, ohne dass die Detailauflösung nennenswert erhöht wird. Das ist ein überzeugender Beweis dafür, dass Schärfe und Auflösung nicht dasselbe sind.

In der Übertragungsfunktion zeigt sich diese Manipulation darin, dass der normale Abfall mit steigender Ortsfrequenz teilweise oder ganz aufgehoben wird, ähnlich wie bei Objektiven mit hoher Kantenschärfe. Man kann diese Schärfung in der digitalen Bildprozessierung sogar übertreiben und eine Übertragungsfunktion erzeugen, die mit wachsender Ortsfrequenz ansteigt. In der Sprache der Übertragungstheorie hat sie dann einen partiellen Hochpass-Charakter – und solche Systeme zeigen deutliche **Artefakte an Kanten**.



*Modulation in Bildern einer DSLR im 35mm Format, 24MP, mit verschiedenen Parametern der Schärfung der Kamera -JPEG Prozessierung. Die Kurven mit flachem Verlauf bis ca. 50 Lp/mm gehören zu Bildern mit sehr hoher Kantenschärfe.*



*Modulation im Bild einer 2/3“-Kamera, mit kleinster, mittlerer und stärkster Schärfung. Hier muss bei der aufgewölbten Kurve mit deutlichen Artefakten gerechnet werden, meist treten neben den Kanten dunkler Flächen zusätzliche helle Linien auf.*

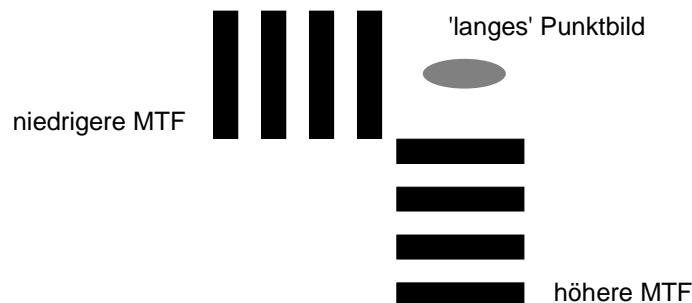
## Tangential und sagittal

Bisher haben wir uns nur mit der Frage beschäftigt, welcher Zusammenhang zwischen der Modulationsübertragung und dem Punktbild besteht. Wir haben gesehen, wie die Größe des Punktbildes und die Verteilung der Lichtintensität innerhalb seiner gesamten Fläche die Modulationsübertragung beeinflusst. Dazu haben wir MTF als Kurve über dem Parameter Ortsfrequenz dargestellt.

So eine Kurve gilt aber nur für einen einzigen Punkt im Bild, und selbst für diesen Punkt brauchen wir eigentlich mehrere Kurven.

Denn wir haben ja an unseren Punktbild-Beispielen gesehen, dass die nicht unbedingt kreisrund sind. Manche kann man eher mit einem Flachpinsel vergleichen, mit dem man nur in einer Richtung feine Linien zeichnen kann.

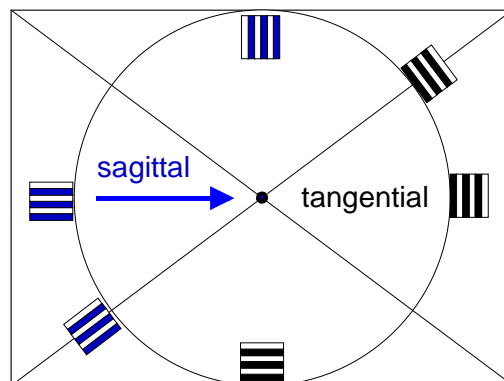
Wenn wir also die Richtung des Streifenmusters drehen, dann müssen wir unterschiedliche MTF-Kurven erwarten, je nachdem ob die kürzere oder die längere Ausdehnung des Punktbildes senkrecht zum Streifenmuster ist.



Weil Objektive ja rotationssymmetrisch sind, sind die Hauptrichtungen, also die kürzesten und längsten Ausdehnungen der Punktbilder, immer parallel oder senkrecht zum Radius des Bildkreises. Man nennt deshalb in der Optik Streifenmuster, bei denen die Längsrichtung der Streifen zur Mitte zeigt,

**radial** oder **sagittal** (*sagitta* = lat. der Pfeil). Meist zeigt diese Richtung die bessere Kontrastübertragung.

Die dazu senkrechten Streifen haben die gleiche Richtung wie eine Tangente an einem Kreis um den Bildmittelpunkt. Diese Streifenrichtung heißt deshalb **tangential** oder auch **meridional**.



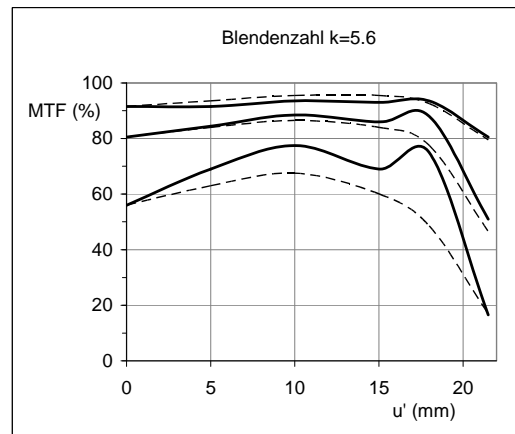
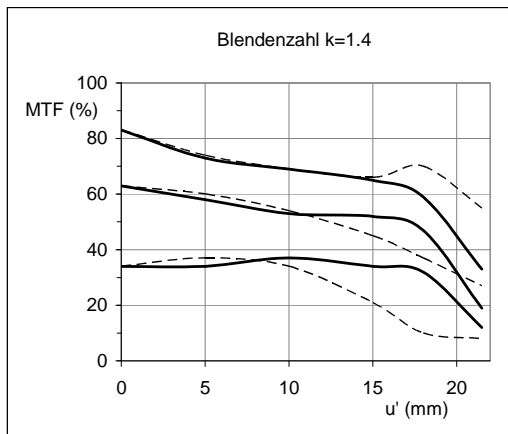
## MTF Kurven für Objektive

Da sich die Abbildungsqualität von Objektiven von der Mitte zum Rand hin ändert, und da uns gerade diese Unterschiede besonders interessieren, brauchen wir natürlich noch mehr Kurven als die zwei für tangentielle und sagittale Orientierung. Etwa ein halbes Dutzend Messpunkte zwischen Mitte und Ecke sollten es schon sein, um die örtlichen Änderungen der Abbildungseigenschaften genau genug zu beschreiben. Das wären also insgesamt 12 Kurven – nicht besonders übersichtlich und lesbar.

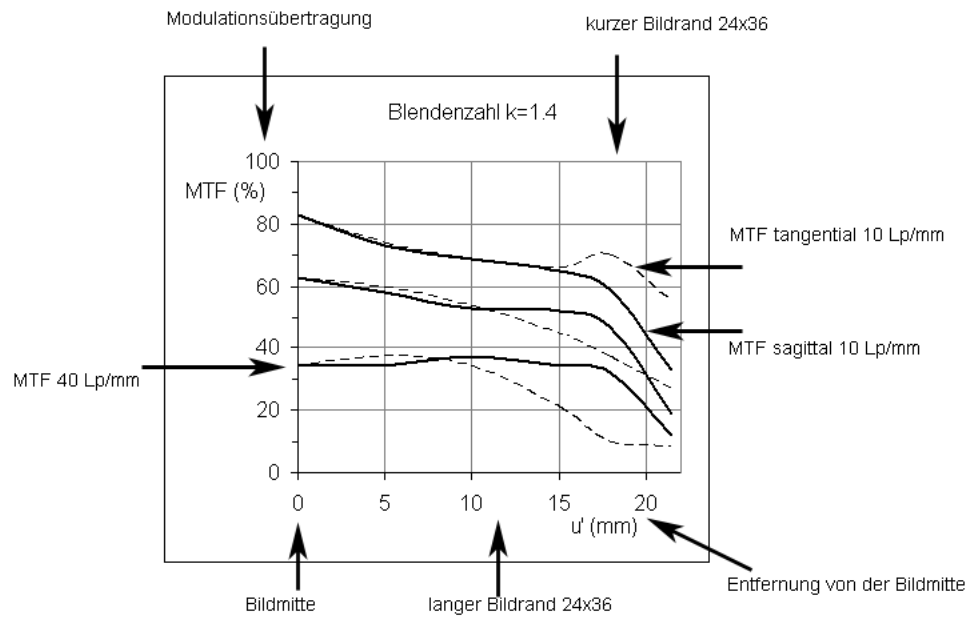
Deshalb sind die MTF-Kurven, die wir bisher kennen gelernt haben, bei denen wir nach oben die Modulationsübertragung und auf der waagerechten Achse die Ortsfrequenz aufgetragen haben, eigentlich nur für Sensoren gut geeignet, wo es keine örtlichen Veränderungen gibt. Für Objektive ist diese Darstellung nicht so günstig.

Da die MTF-Kurven über der Ortsfrequenz ja immer nach rechts fallende Kurven sind, genügt es ja, von jeder Kurve nur drei Zahlenwerte abzulesen, nämlich für drei hinreichend verschiedene Ortsfrequenzen, meist 10, 20 und 40 Lp/mm. Wenn man zeigt, wie sich diese MTF-Werte für drei Frequenzen in der Bildfläche verändern, dann kommt man zu einer grafischen Darstellung, die für Objektive viel besser geeignet ist.

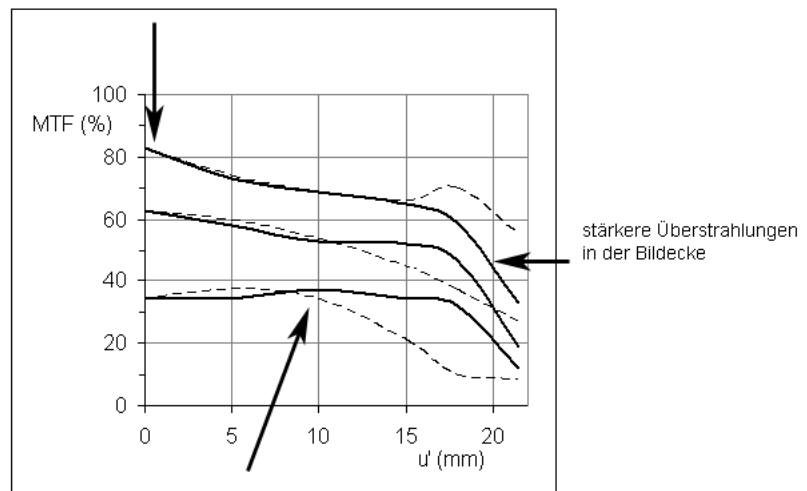
Deshalb finden Sie in unseren Datenblättern MTF-Kurven, bei denen nach oben die Modulationsübertragung und auf der waagerechten Achse die Bildhöhe, die Entfernung von der Bildmitte, aufgetragen sind. Die Grafik enthält sechs Kurven, nämlich jeweils tangentielle (gestrichelte Linien) und sagittale Werte (durchgezogene Linien) für drei Ortsfrequenzen. Selbstverständlich gelten die oberen der sechs Kurven immer für die niedrigste und die unteren für die höchste Ortsfrequenz.



*MTF-Kurven für das Objektiv **Planar 1.4/50 ZF**, für 10, 20 und 40 Lp/mm, weißes Licht und Aufnahmeentfernung Unendlich. Links für die volle Öffnung, rechts abgeblendet auf Blende 5.6.*



Guter Kontrast und mittlere Schärfe in der Bildmitte

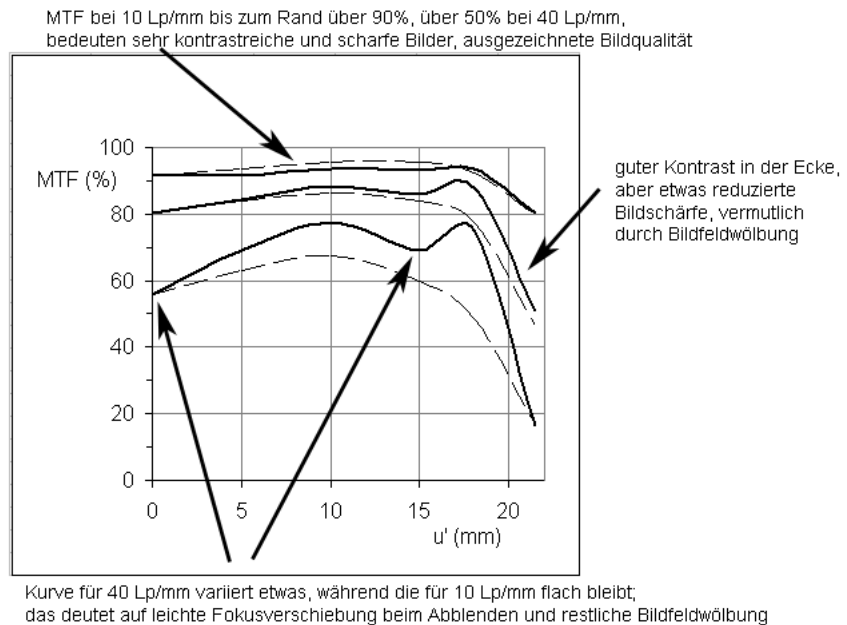


Gute Kantenschärfe, mäßiger Mikrokontrast,  
leichte Tendenz zu Überstrahlungen an kontrastreichen Kanten  
im Bildfeld bis zum Rand

In der Mitte erreicht dieses Objektiv schon bei voller Öffnung gut 80% MTF bei 10 Lp/mm und fällt auf knapp 40% bei 40 Lp/mm. Das bedeutet eine gute Kontrastwiedergabe und mittlere Schärfe, die erst bei stärkerer Vergrößerung des Bildes etwas weich wirkt.

Außerhalb der Mitte sinkt die MTF bei 10 Lp/mm auf 70%, die Tendenz zu Überstrahlungen an kontrastreichen Kanten nimmt also zu.

In der Bildecke verlaufen besonders die sagittalen Kurven dicht nebeneinander auf niedrigem Niveau, wir müssen deshalb dort bei offenen Lichtquellen mit deutlichen Überstrahlungen rechnen.



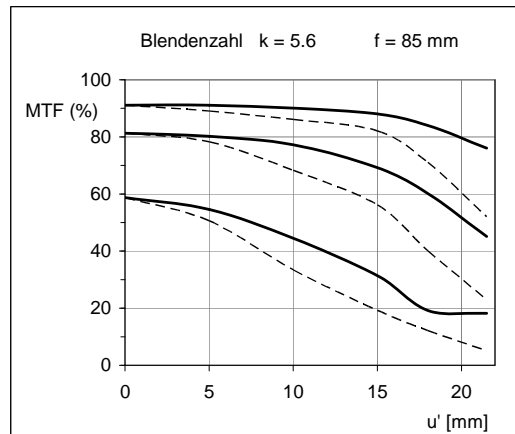
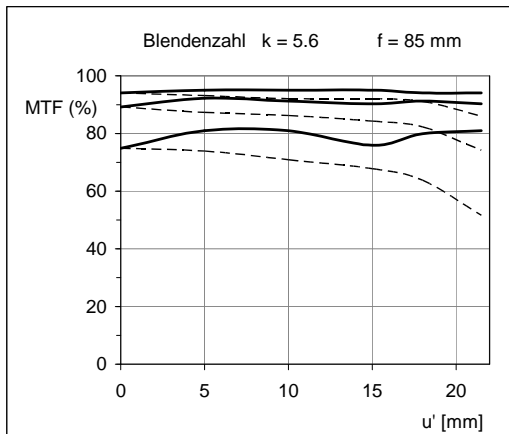
Wenn man das Objektiv abblendet, steigen alle MTF-Werte kräftig an; die Kurven verlaufen jetzt sehr dicht nebeneinander auf hohem Niveau. Die MTF-Werte fallen also mit steigender Ortsfrequenz nur relativ langsam. Das bedeutet ausgezeichnete Kantenschärfe und sehr guten Mikro-Kontrast bis hin zu den feinsten Strukturen, die Sensor oder Film wiedergeben können.

und dass in der Bildecke infolge der plötzlich einsetzenden Bildfeldwölbung eine Defokussierung vorliegt.

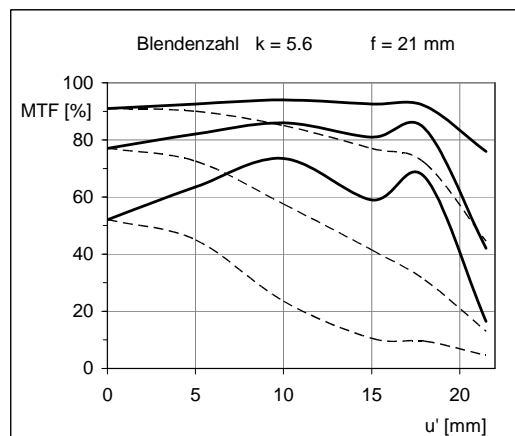
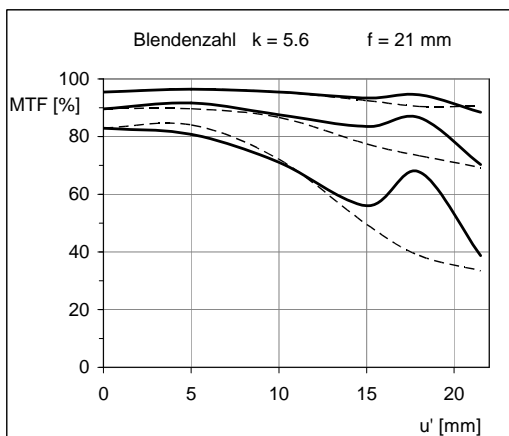
In der Bildecke fallen alle Kurven etwas ab, die für 10 Lp/mm wenig, die für die höheren Frequenzen mehr. Das deutet darauf hin, dass die sehr gute Ebnung des Bildfeldes bis etwa 18 mm Bildhöhe reicht

Die kleinen Schwankungen der Kurven für 40 Lp/mm sollte man nicht zu ernst nehmen, sie sind nur bei extremen Vergrößerungen des Bildes und bei Fotografie flacher Objekte sichtbar, in den meisten Bildern also nicht. Ihre Ursachen sind Bildfeldwölbung und Fokusverschiebung.

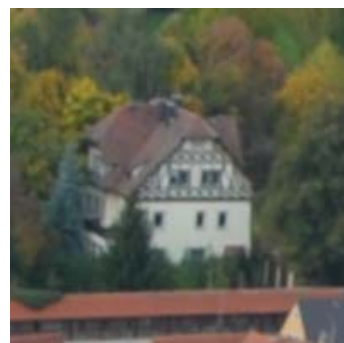
Warum die zu solchen Schwankungen führen, werde ich im Abschnitt über die dreidimensionalen Eigenschaften von MTF erläutern.



Ein Vergleich im kurzen Telebereich für das Kleinbildformat, abgeblendet auf Blende 5.6. Links eine Festbrennweite hoher Qualität (Planar 1.4/85 ZF), rechts ein preisgünstiges 5x Zoomobjektiv. Die Festbrennweite ist in der gesamten Bildfläche praktisch vom Sensor begrenzt und erlaubt höchste Vergrößerung des Bildes. Das Zoom ist in der Mitte ganz ordentlich, fällt aber zum Rand allmählich ab. Dabei darf man mit Ausnahme des äußeren Randes guten Bildkontrast erwarten, aber keine „knackige“ Schärfe, weil die die MTF von hohen Werten bei 10 Lp/mm bei höheren Frequenzen schnell auf kleine Werte abfällt. Das Objektiv ist nur für mäßige Vergrößerungen geeignet.



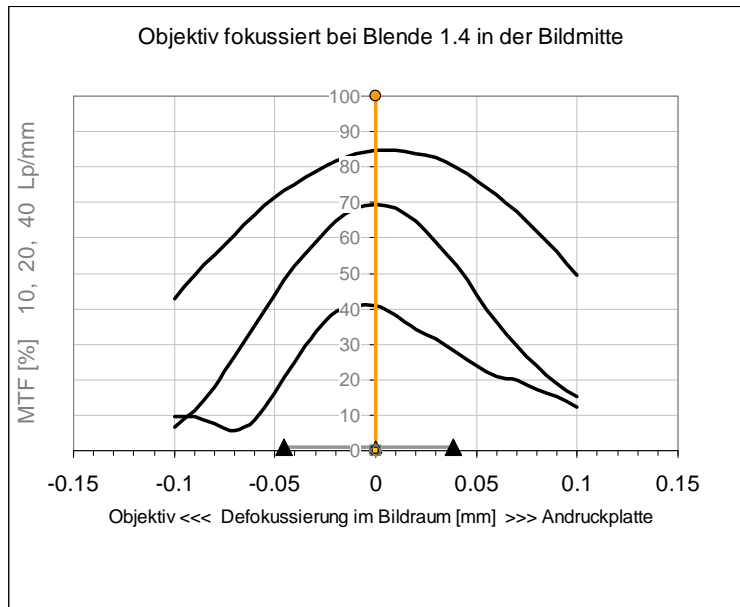
Ein Vergleich im schwieriger zu korrigierenden Superweitwinkelbereich, abgeblendet auf Blende 5.6. Links Daten eines Distagon 2.8/21 ZF, rechts die Daten eines Vergleichsobjektivs, bei dem der Farbquerfehler nicht so gut korrigiert ist. Seine sagittalen Werte zeigen merkbare Blendendifferenz, sind aber sonst gut. Aber die tangentialen Werte sind am Rand sehr niedrig; was das bedeutet, zeigen die folgenden Bildausschnitte ( 200x200 Pixel aus 12MP-Bild, Bildhöhe etwa 12 mm ):



## Dreidimensionale Eigenschaften

Dass Bildschärfe auch davon abhängt, ob das Objektiv korrekt fokussiert wurde, ist ja eine Binsenweisheit. Das muss man also auch durch MTF-Kurven beschreiben können; und deshalb lernen Sie jetzt noch eine dritte Art von MTF-Kurven kennen, die nicht so allgemein bekannt ist.

Dabei sind die MTF-Werte nicht über der Ortsfrequenz oder der Bildhöhe aufgetragen, sondern über einem Fokusparameter. Und zwar messen wir auf der Bildseite des Objektivs, wie sich MTF in der Längsrichtung ändert und erhalten dann solche Kurven:



Auf der vertikalen Achse ist wieder die MTF für 10, 20 und 40 Lp/mm aufgetragen. Auf der horizontalen Achse bezeichnet der Nullpunkt der Skala den besten Fokus: dort ist der MTF-Wert für die mittlere Frequenz 20 Lp/mm am größten, dort sollte also der Sensor oder der Film sein, was durch die gelbe Linie symbolisiert wird. Links davon befinden wir uns näher am Objektiv, rechts davon hinter dem Sensor.

Sie sehen nebenbei, dass der Toleranzbereich für die Nutzung der besten MTF-Werte bei dieser Öffnung nur wenige hundertstel Millimeter beträgt. Die beiden schwarzen Dreiecke zeigen die bildseitige Schärfentiefe, rein geometrisch berechnet für einen Zerstreuungskreis-Durchmesser von 0.03 mm.

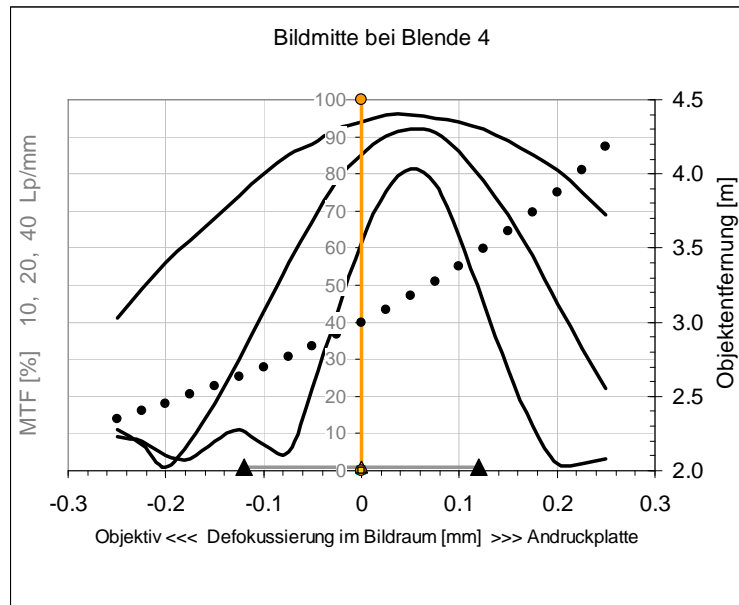
Bei diesem Kriterium für Schärfentiefe liegen übrigens die MTF-Werte an der Grenze des als scharf geltenden Raumes bei 40 Lp/mm so um die 20%.

Die Maxima für verschiedene Ortsfrequenzen können übrigens durchaus an verschiedenen Stellen liegen. Und die Kurven sind oft schief, was bedeutet, dass die Art der Unschärfe vor und hinter dem Fokus verschieden ist.

Was kann nun beim Ablenden des Objektivs passieren? Wir schließen deshalb die Blende dieses Objektivs um drei Stufen und wiederholen die Messung, ändern aber unsere Fokusskala nicht, d.h. der Nullpunkt bedeutet weiterhin:

*MTF-Maximum in der Bildmitte bei 20 Lp/mm und Blende 1.4.*





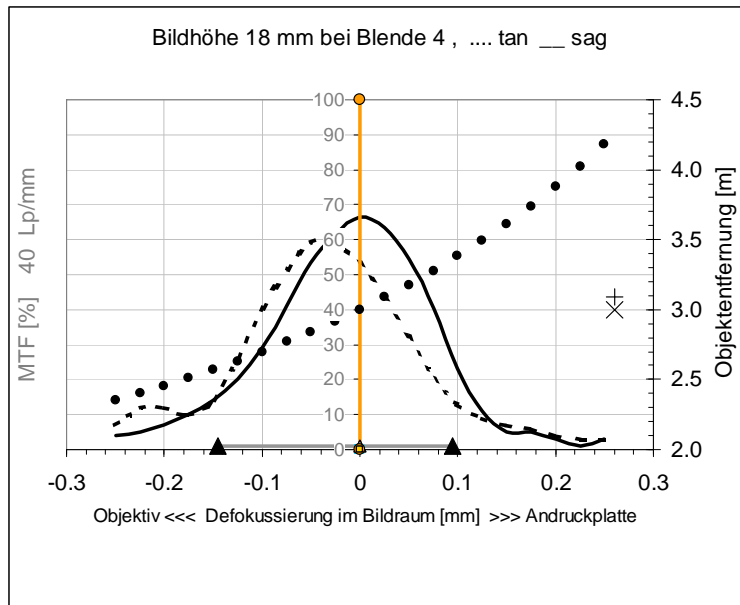
Weil durch das Abblenden die Restaberrationen stark verringert werden, steigen die Maximalwerte der MTF-Kurven natürlich deutlich an. Aber gleichzeitig beobachten wir auch eine Verschiebung der Kurven nach rechts, also weiter weg vom Objektiv. Jetzt ist das Objektiv also gar nicht optimal auf unsere Sensorposition (gelbe Linie) fokussiert, die MTF-Steigerung wird dort nicht voll wirksam. Die geometrisch berechnete bildseitige Schärfentiefe stimmt gar nicht, ihre Länge ist zwar richtig, aber die Lage ist falsch.

Dieses Phänomen nennt man ‚Blendendifferenz‘ (engl. focus shift); es ist bei sehr lichtstarken Objektiven meist stärker ausgeprägt und hängt zusammen mit der sphärischen Aberration, denn die bedeutet, dass Lichtstrahlen, die in unterschiedlichen Entfernungen von der optischen Achse durch die Blendenfläche gehen, unterschiedlichen Fokus haben.

Die Blendendifferenz beträgt hier etwa 0.05 mm. Die schwarzen Punkte in der obigen Grafik zeigen, wie diese Verschiebung im Bildraum zusammenhängt mit den Entfernungen im Objektraum vor der Kamera (Skala auf der rechten Seite). Wenn das Objektiv z.B. ursprünglich bei Blende 1.4 auf 3m Entfernung fokussiert war, dann ist jetzt der beste Fokus auf 3.25 m gewandert, wenn man das Objektiv nicht verstellt.

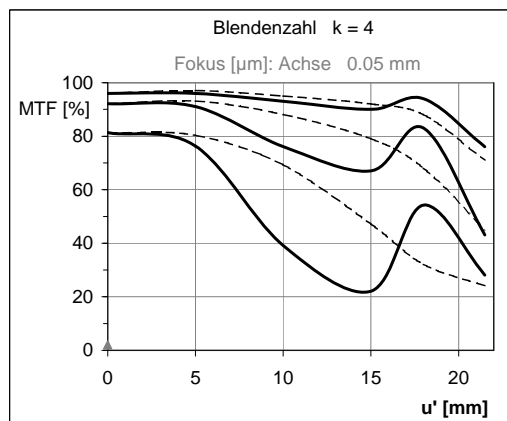
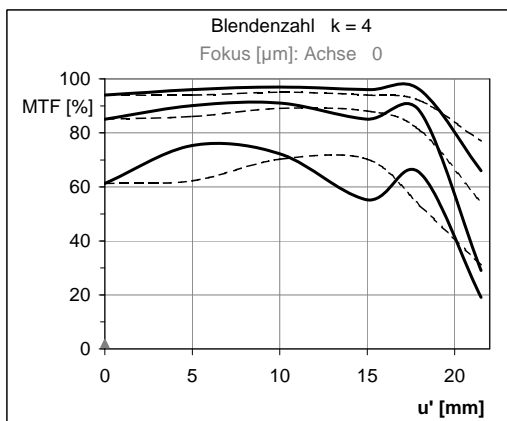
Sollte man diese Fokusverschiebung beim Fotografieren korrigieren? Eigentlich nicht, es sei denn, es käme wirklich auf die allerbeste Leistung in der Bildmitte an. Aber 0.05 mm sind ungefähr 20% der Strecke zwischen den Marken der Schärfentiefskala für Blende 4, also nicht so leicht zu kontrollieren. Und außerdem sieht die Sache im Bildfeld wieder ganz anders aus. Deshalb messen wir jetzt noch einmal MTF in Längsrichtung, aber nicht in der Bildmitte, sondern 10 mm entfernt davon.





Hier sind wir jetzt am Bildrand in 18 mm Entfernung von der Bildmitte angekommen, und wir sehen, dass das sagittale Maximum jetzt exakt zum Nullpunkt unserer Fokusskala zurückgekehrt ist. Die Bildfeldwölbung darf man sich also nicht als eine gleichmäßige Krümmung der Bildfläche vorstellen, sondern es gibt Umkehrpunkte.

Diese Kombination von restlicher Bildfeldwölbung und Blendendifferenz führt jedenfalls dazu, dass MTF-Kurven für dasselbe Objektiv ganz verschieden aussehen können, wenn wir nicht bei jeder Bildhöhe auf das dortige Maximum fokussieren, sondern streng in einer festen Ebene messen:



Diese beiden Grafiken bedeuten also keineswegs: „Das linke Objektiv ist in der Mitte etwas schlechter als im Bildfeld, das rechte Objektiv ist hingegen in der Bildmitte sehr gut, hat aber eine deutlich nachlassende Bildschärfe in der Zone um 15 mm Bildhöhe.“

Beide Messungen sind von demselben Objektiv, sie sind nur bei etwas unterschiedlicher Fokussierung gemacht worden.

Dieser Unterschied von 0.05 mm ist von derselben Größenordnung wie übliche mechanische Kameratoleranzen wie z.B. Justierung von AF und Einstellscheibe.

## Grenzen der Bedeutung von MTF-Kurven

Die im vorigen Abschnitt dargestellten Zusammenhänge sind eine geeignete Überleitung, um auf die Grenzen dieser Zahlenwelt zu sprechen zu kommen. Denn wenn das Aussehen der Kurven so empfindlich abhängt von kleinen Änderungen der Fokussierung, dann darf man natürlich nicht erwarten, dass man die Kurven in jedem Bild wieder findet, wenn der Gegenstand dreidimensional ist, wenn also schon die unterschiedlichen Entfernungen dafür sorgen, dass unterschiedliche Details mal mehr und mal weniger gut fokussiert sind.

Die Messbedingungen von MTF-Kurven sind also mit der Repro-Fotografie vergleichbar, wo streng eine Ebene in eine andere Ebene abgebildet wird. Nur die Fotografie weit entfernter Gegenstände mit kurzen Brennweiten gehört auch in diese Kategorie.

Für A4-Prints vom Kleinbildformat gilt die grobe Faustregel, dass man erst 20% Unterschied bei 40 Lp/mm deutlich sehen kann, während bei 10 Lp/mm schon 5% Unterschied sichtbar sind.

Ursachen für nicht empfindungsgerechte Skala liegen zum Teil darin, dass die MTF-Kurven von Objektiven ja nur das erste Glied der Abbildungskette beschreiben und die nachfolgenden nicht berücksichtigen.

Sensor, Scanner, Projektoren, das Auge, kurz alles was danach kommt, hat ja auch immer eine zu hohen Ortsfrequenzen abfallende Übertragungsfunktion. Und die sorgen dafür, dass die Variationen des Objektivs bei hohen Ortsfrequenzen weniger wirksam werden, weil man ja alle Übertragungsfunktionen multipliziert.

Nehmen wir die Diaprojektion als Beispiel: was die 40-Lp/mm Kurve macht, sieht das Auge nicht, wenn man hinter dem Projektor sitzt. Eine weitere Ursache besteht darin, dass die logarithmische

Die Skalen der Messgröße MTF sind nicht empfindungsgerecht. Man braucht einige Erfahrung, um das Bild der Kurven übersetzen zu können in eine Vorhersage der subjektiven Wahrnehmung des Bildes. Dabei muss man die Betrachtungsbedingungen berücksichtigen; es ist ein Unterschied, ob man einen A4-Ausdruck oder eine wesentlich größere 100%-Darstellung auf einem großen Monitor aus derselben Entfernung betrachtet.

Meist verleitet einen das grafische Erscheinungsbild der MTF-Kurven dazu, die Bedeutung der 40Lp-Kurve für normale Bildgrößen zu überschätzen und die Bedeutung der 10Lp-Kurve zu unterschätzen. Wenn man z.B. ein projiziertes Bild betrachtet, ungefähr aus der Projektorentfernung bei den üblichen Projektions-Brennweiten, dann kann das normale menschliche Auge maximal gut 20 Lp/mm aus einem Kleinbildformat auflösen.

Wahrnehmung von Helligkeit durch unser Auge nicht berücksichtigt wird.

Es hat daher schon zahlreiche Untersuchungen zu der Frage gegeben, wie man MTF-Messdaten auf eine der subjektiven Wahrnehmung angepasste Skala übersetzen kann, dazu gehören die **Heynacher-Zahlen** aus unserem eigenen Hause, aber auch andere psychophysikalisch begründete Größen wie **SQF** (subjective quality factor), **MTFA** (modulation transfer area), **SQRI** (square root integral). Allen gemeinsam ist, dass sie Flächen unter der Kurve 'Modulation über Ortsfrequenz' ausrechnen.

Damit haben sie ebenfalls gemeinsam, dass sie die Qualität an einem Bildpunkt durch eine einzige Zahl zu beschreiben versuchen. Wie wir weiter oben gesehen haben, ist das natürlich manchmal eine unzulässige Vereinfachung der Daten. Näher kann ich im Rahmen dieses Artikels leider darauf nicht eingehen.

## Phasenübertragungsfunktion

Es entspringt ebenfalls dem Wunsch nach Vereinfachung, dass ich dem Leser bisher verschwiegen habe, dass die MTF-Zahlen noch längst nicht die ganze Wahrheit über den Korrektionszustand eines Objektivs darstellen.

Eigentlich sollte das aber auch niemanden überraschen, dass man ein so komplexes System wie ein Objektiv nicht mit den wenigen Zahlen vollständig beschreiben kann. Die Leistungsdaten eines Objektivs, egal ob im Computer berechnet oder im Labor gemessen, füllen einen kleinen Aktenordner.

Man muss also vereinfachen, um die Sache verdaulich und übersichtlich zu machen, muss dabei natürlich in Kauf nehmen, dass die Präzision der Beschreibung leidet.

Soviel als Vorbemerkung, und nun wieder konkreter: es kann einem passieren, dass man mit zwei Objektiven, die gleiche MTF-Daten haben, von einem Detail des Gegenstandes ganz verschiedene Bilder erhält, nicht zufällig, sondern systematisch – hier ein Beispiel:



*Aufnahmen mit zwei lichtstarken Weitwinkelobjektiven bei voller Öffnung, randnahe Ausschnitte. Die MTF-Werte sind links und rechts identisch.*

Das Bild oben zeigt ein Hausdach und einen Baum vor hellem Himmel, also eine typische kontrastreiche Horizontaufnahme. An den Kanten der Vordergrundobjekte kommt es besonders auf die MTF bei niedrigen Ortsfrequenzen an, denn die bestimmt an solchen Kanten das Ausmaß der Überstrahlung. In der linken Aufnahme zeigt das Dach keine Überstrahlungen, dafür aber der Baum, rechts ist es umgekehrt. Gäbe es den Baum in diesem Bild nicht, würde man die linke Aufnahme als besser beurteilen (jedenfalls in Schwarz-Weiß). Beide Objektive haben aber bei diesen Randbildhöhen gleiche MTF-Werte bei allen Ortsfrequenzen.

Die **MTF** sagt uns nichts über diesen Unterschied, weil sie die Eigenschaften der Punktbilder noch nicht vollständig beschreibt.

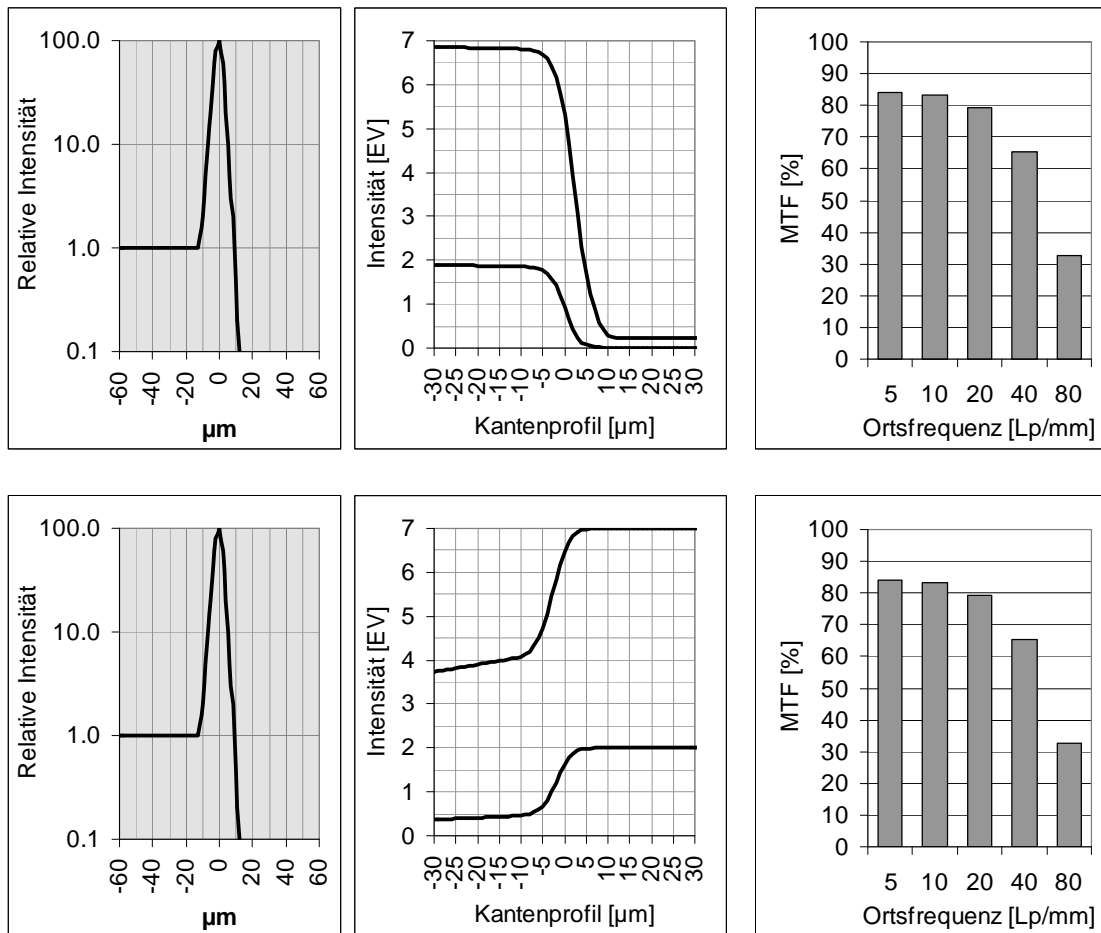
Die wirklich vollständige **Optische Übertragungsfunktion OTF** hat noch einen nicht so bekannten zweiten Anteil, die **Phasenübertragungsfunktion PTF**, die man üblicherweise unterschlägt. Sie hat etwas mit der Symmetrie des Punktbildes zu tun.

Wir hatten bisher berücksichtigt, dass Punktbilder länglich sein können, dass sie also in tangentialer Richtung und in sagittaler Richtung unterschiedliche Ausdehnung haben. Deshalb messen wir für jeden Bildpunkt zwei MTF-Kurven.

Wir haben aber in den bisherigen Beispielen einfach angenommen, dass die Helligkeitsverteilung in einer Querschnittsrichtung durch das Punktbild symmetrisch ist. Das ist aber in Wirklichkeit oft nicht der Fall.

Punktbilder können so schief sein, wie in dem folgenden Beispiel. Häufigste Ursache sind Koma-Fehler,

die Punktbilder mit einem Schweif in radialer Richtung erzeugen.



Bei so einem schiefen Punktbild-Intensitätsprofil kommt es natürlich darauf an, welche Richtung eine Kante hat. Das Punktbild hat auf der linken Seite einen Halo von 1% der Maximalintensität, rechts hört es sozusagen schlagartig auf. Wenn deshalb bei einer Kante die helle Seite rechts ist, dann wird sie nach links ausstrahlen (untere Grafik).

Ist aber umgekehrt die linke Seite der Kante hell (obere Grafik), dann ist der Kontrast des Kantenbildes hoch, weil ja das Punktbild nach rechts nur eine kurze Reichweite hat.

Die MTF-Werte berücksichtigen diese Richtungsempfindlichkeit, also die Unsymmetrie des Punktbildes, nicht. Man deshalb muss zusätzlich die **Phasenübertragungsfunktion** kennen, die je nach Richtung des „Schweifes“ am Punktbild verschieden ist.

Der Name kommt daher, dass so ein schiefes Punktbild die Phase des sinusförmigen Musters, also die Lage seiner Maxima und Minima seitlich verschiebt.

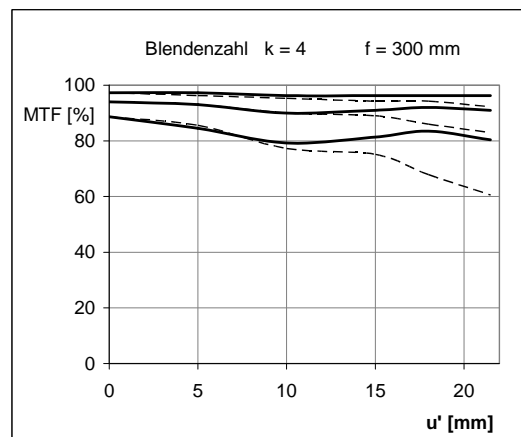
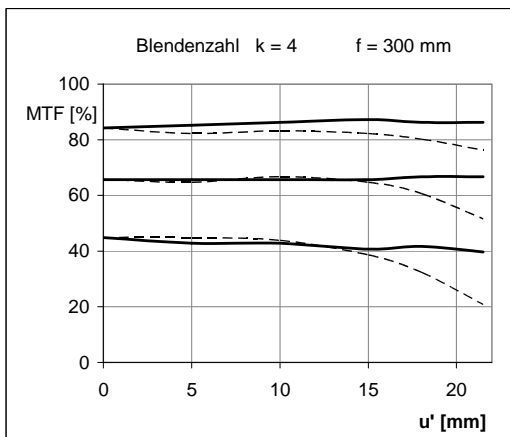
## Farbkorrektion

Dass die optischen Eigenschaften von Glas von der Wellenlänge des Lichtes abhängen, sehen wir auch in unseren Bildern: Objektive haben Farbfehler. Zwar enthält jedes Objektiv ein ausgeklügeltes System der Kompensation durch Kombination verschiedener Glasarten, so dass dieser Typ von Aberration meist nicht mehr stört, aber gewisse Reste sind immer noch vorhanden.

Es gibt Objektive, in denen die Farbfehler eine größere Rolle spielen; das sind vor allem die längeren Brennweiten, wo man erst in der jüngeren Vergangenheit durch Entwicklung völlig neuer Glasarten die Bildqualität deutlich verbessern konnte.

Lange Teleobjektive ohne diese Gläser mit extrem niedriger Dispersion oder anomaler Teildispersion haben nur mittelmäßige MTF-Werte. Trotzdem erzielt man mit vielen Motiven erstaunlich gute Bildergebnisse.

Das liegt daran, dass bei diesen Objektiven MTF sehr stark von der spektralen Zusammensetzung des Lichtes abhängt. Wenn man statt des üblichen weißen Lichtes, in dem alle Wellenlängen des sichtbaren Spektrums mit einer gewissen Gewichtung vorkommen, mit grünem Licht misst, dann sehen die MTF-Kurven dramatisch anders aus:



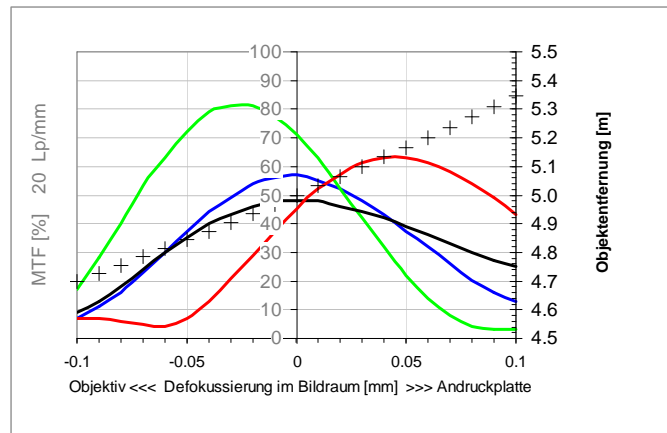
*MTF-Kurven eines 300mm-Teleobjektivs, links mit weißem Licht gemessen, rechts mit grünem Licht, Bandbreite 100 nm.*

Aus diesem Grund gab es für die Schwarz-Weiß Fotografie Grünfilter als wichtiges Zubehör. Aber dieser Effekt wirkt natürlich genauso in der Farbfotografie, wenn das Motiv eher monochrom ist (Naturaufnahmen, rote Dächer). Das ist also ein weiterer Grund, warum man MTF-Kurven nicht 1:1 im Bild wieder findet.

Es ist aber nicht immer so, dass MTF-Kurven ein Objektiv zu pessimistisch beurteilen. Es kann umgekehrt auch so sein, dass eine Schwäche der Farbkorrektion in den MTF-Daten für weißes Licht nicht sichtbar wird. Mit anderen Worten: MTF sagt wenig über Farbsäume.

Wenn man MTF in weißem und in farbigem Licht vergleicht, dann versteht man die Entstehung von Farbsäumen an kontrastreichen Kanten oder Spitzlichtern.

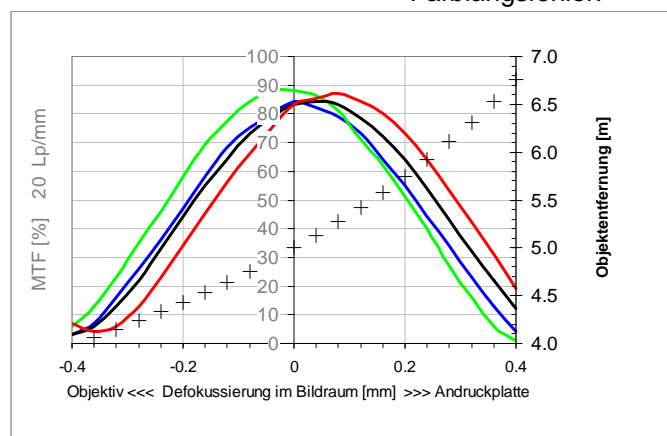
Die folgenden Messkurven illustrieren den Farblängsfehler eines lichtstarken kurzen Teleobjektivs durch Messung der MTF-Werte in Abhängigkeit von der Fokussierung:



Fokus-MTF Kurven des Planar 1.4/85 ZA bei Blende 1.4 in weißem Licht (schwarze Kurve) und in blauem, grünem und rotem Licht. Die Kreuze stellen den Zusammenhang her zwischen Bildlage (waagerechte Skala) und Objektentfernung (vertikale Skala rechts), dabei ist das Objektiv in weißem Licht auf 5m fokussiert.

Die MTF-Werte im farbigem Licht sind höher als im weißen Licht, aber gleichzeitig liegen die Maxima an verschiedenen Orten, sie haben keinen gemeinsamen Fokus. Im besten Fokus für weißes Licht, bei 0 auf der waagerechten Skala, ist der rote MTF-Wert am kleinsten. Das heißt, dass das rote Punktbild den größten Durchmesser hat, das Objektiv zeigt also einen leichten roten Farbsaum. Der wird noch stärker, wenn man auf etwas kürzere Entfernung fokussiert, wo der MTF-Wert für grünes Licht maximal wird. Deshalb zeigen solche hoch geöffneten Objektive an Spitzlichtern Farbsäume, die rot oder purpurn sind, wenn das Objekt vor der Fokusebene liegt, und die grün sind,

wenn es etwas hinter der Fokusebene liegt. Wie stark und satt diese Farben sind, hängt davon ab, wie groß der Abstand zwischen den Maxima der farbigen MTF ist, aber auch davon, ob die Kurven steil oder eher flach verlaufen. Bei monochromatisch schlechter korrigierten Objektiven verlaufen die Fokus-MTF Kurven flach, und die Farbsäume sind blass. Gerade hoch korrigierte Objektive zeigen oft stärkere Farben, wenn sie lichtstark sind. Da man die Abstände der farbigen MTF-Maxima nicht beliebig klein machen kann, hilft nur Abblenden, um die Farbsäume verschwinden zu lassen. Denn dann wird die bildseitige Schärfentiefe groß im Vergleich zum Farblängsfehler.



Fokus-MTF Kurven des Planar 1.4/85 ZA bei Blende 5.6



## Bokeh

Als ideale MTF-Kurven werden oft solche bezeichnet, bei denen tangentiale und sagittale Werte im ganzen Bildfeld möglichst identisch sind, weil dann das „Bokeh“, also die Wiedergabe des deutlich unscharfen Hintergrundes, besonders gut sei.

Solche Behauptungen sind mit Vorsicht zu betrachten. MTF macht eigentlich nur Aussagen über die Schärfenebene oder die unmittelbare Umgebung.

Und dort ist ein rundes Punktbild in der Tat von Vorteil, weil es kleine Details am originalgetreuesten wiedergibt, mit größter Ähnlichkeit der Form. Das ist z.B. wichtig für die Lesbarkeit von Schrift.

Aber über die Helligkeitsverteilung im stark defokussierten Punktbild kann man aus MTF-Daten keine Schlüsse ziehen. Es gibt Objektive mit schön parallel verlaufenden tangentialen und sagittalen MTF-Kurven, die aber sphärisch stark überkorrigiert sind. Dieser Korrektionszustand verursacht ringförmige defokussierte Punktbilder, die in Spitzlichtern und in Doppellinien sichtbar werden und einen unruhig wirkenden Hintergrund erzeugen. Den MTF-Daten sieht man aber diese unschöne Eigenschaft nicht an.

## Vergleichbarkeit von MTF-Daten

MTF-Daten werden an vielen Stellen veröffentlicht, von Herstellern und inzwischen auch in vielen unabhängigen Tests. Leider muss man beim Vergleich dieser Daten sehr zurückhaltend sein, weil die Messbedingungen sehr unterschiedlich sein können. Wenn man übersieht, dass die Ortsfrequenzen verschieden sind, ist das noch das harmloseste Problem. Ebenso können aber auch unterschiedliche spektrale Gewichtungen innerhalb des sichtbaren Lichtes einen Vergleich hinken lassen.

Es gibt auch Hersteller, die sich nicht scheuen, Werte zu veröffentlichen, die über den Beugungsgrenzen liegen, also physikalisch gar nicht möglich sind.

Das verrät Ihnen, dass diese Werte nur aus dem Computer stammen und dort sogar nur schlicht geometrisch optisch, ohne Berücksichtigung der Wellennatur des Lichtes, berechnet wurden. Wenn dann die Objektive hoch korrigiert sind, kleben die Werte an der 100%-Linie. Glauben Sie aber bitte nicht, dass diese Zahlen realistisch seien. Reale Objektive sind immer auch ein wenig schlechter als die Rechnung im optischen Designprogramm.

Die von Zeiss veröffentlichten MTF-Daten stammen von gemessenen Objektiven.