



# 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.

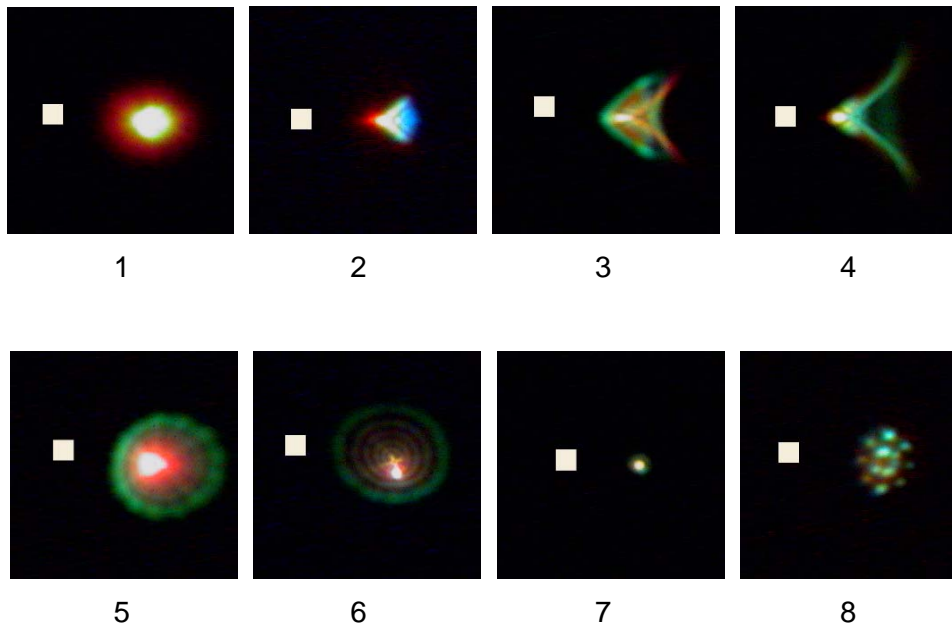


Warum benutzt man es aber trotzdem nicht, um Bildqualität quantitativ zu beschreiben?

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.

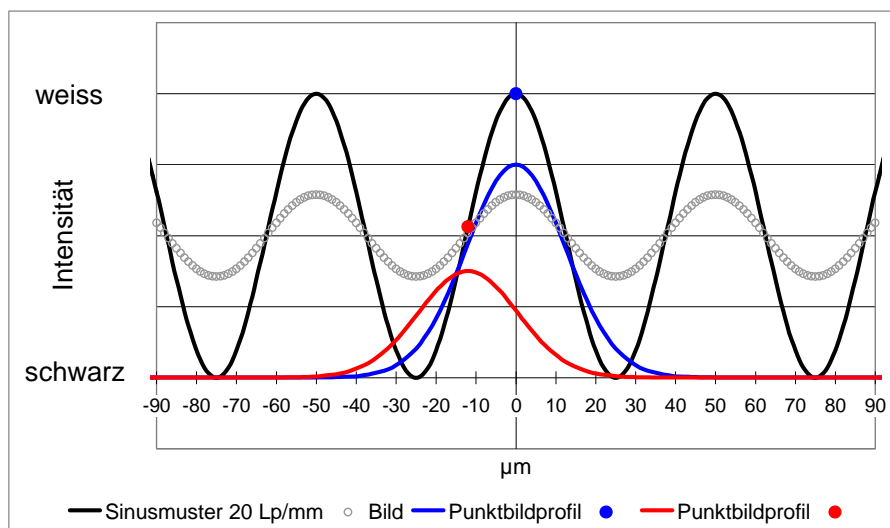
## Modulationsübertragung

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  $50 \mu\text{m}$  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“  $25 \mu\text{m}$  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  $-25 \mu\text{m}$  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.

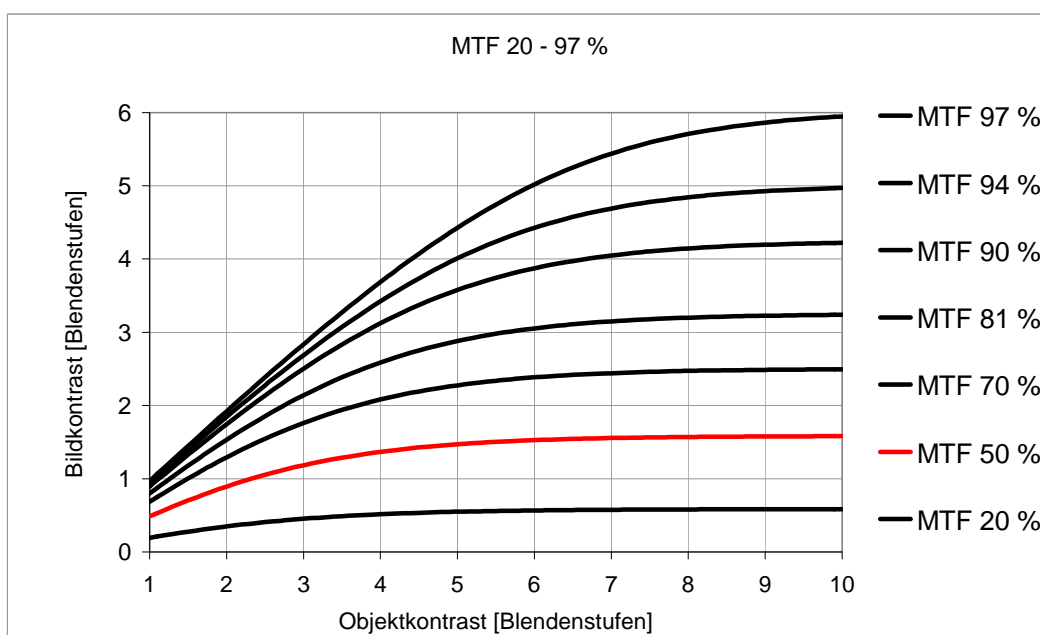
Was bedeutet nun aber z.B. eine Kontrastübertragung von 50%, wenn bei unserem Streifenmuster ein Unterschied von 6 Blendenstufen zwischen hellsten und dunkelsten Stellen besteht, d.h. ein Helligkeitsverhältnis von 1 zu  $2^6 = 1$  zu 64? Ist dann im Bild der Unterschied 3 Blendenstufen oder 1 zu 32,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

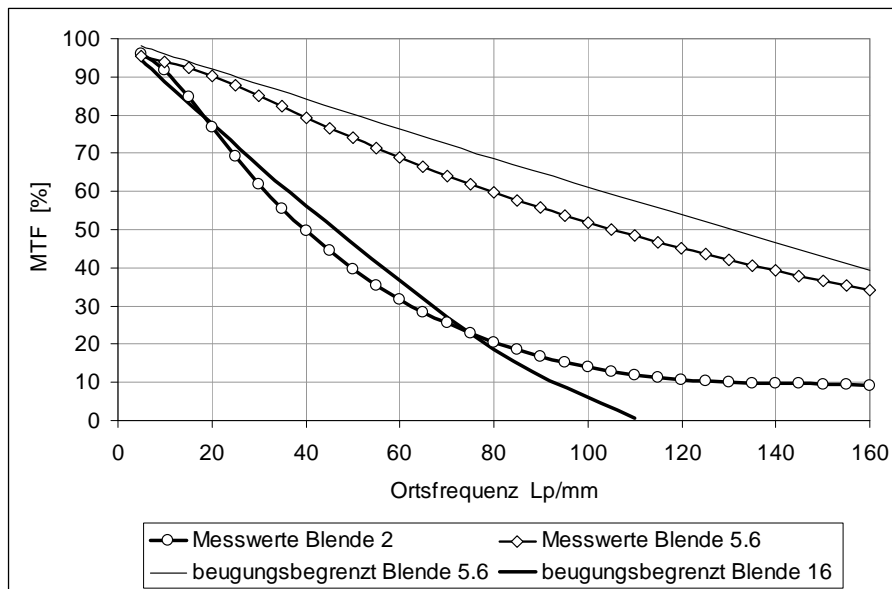
Wenn wir noch einmal den Vergleich mit der Malerei bemühen wollen: grobe Strukturen kann man gut mit einem dicken Pinsel malen, für feine Details aber braucht man den spitzen Haarpinsel.

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**.

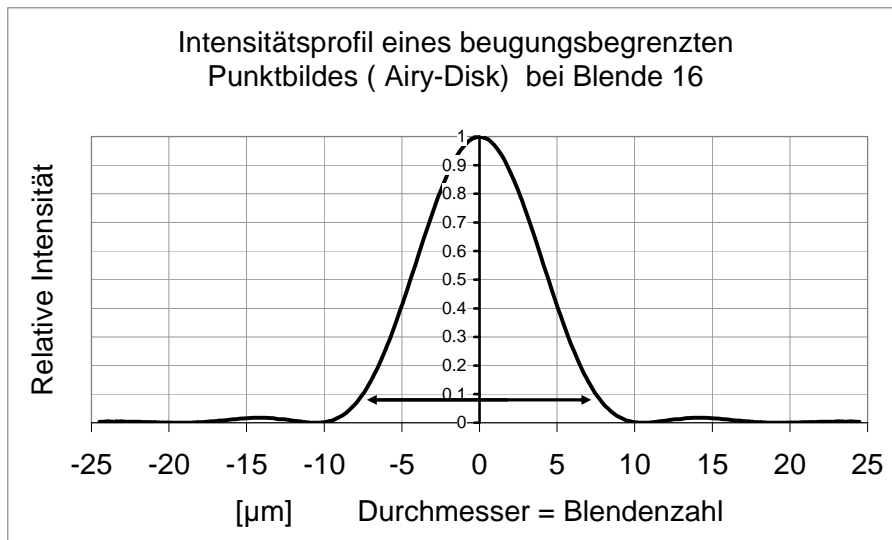


*Modulationsübertragungsfunktion eines 50mm-Kleinbildobjektivs in der Bildmitte, gemessen bei Blende 2 und Blende 5.6, zum Vergleich sind noch die beugungsbegrenzten Übertragungsfunktionen für Blende 5.6 und Blende 16 eingezeichnet (einfache Linien ohne Kreise). Die beugungsbegrenzte Abbildung ist die 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.

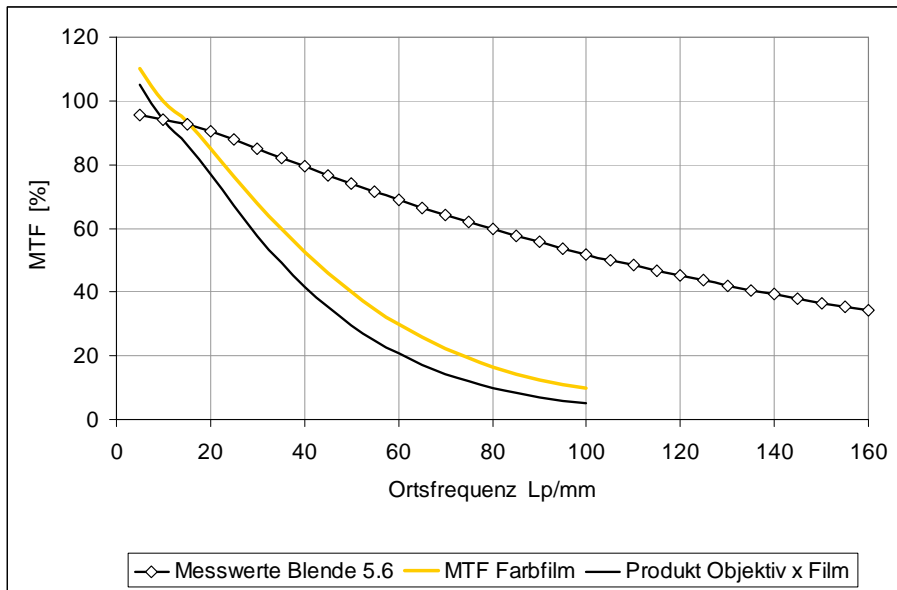
Die Ortsfrequenz, bei welcher der MTF-Wert Null erreicht oder einen kleinen Schwellenwert (z.B. 10%) unterschreitet, ist das **Auflösungsvermögen** des Objektivs **im Luftbild**. So fein dürfen periodische Streifenmuster werden, bevor ihr Bild in strukturloses Grau übergeht.

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:

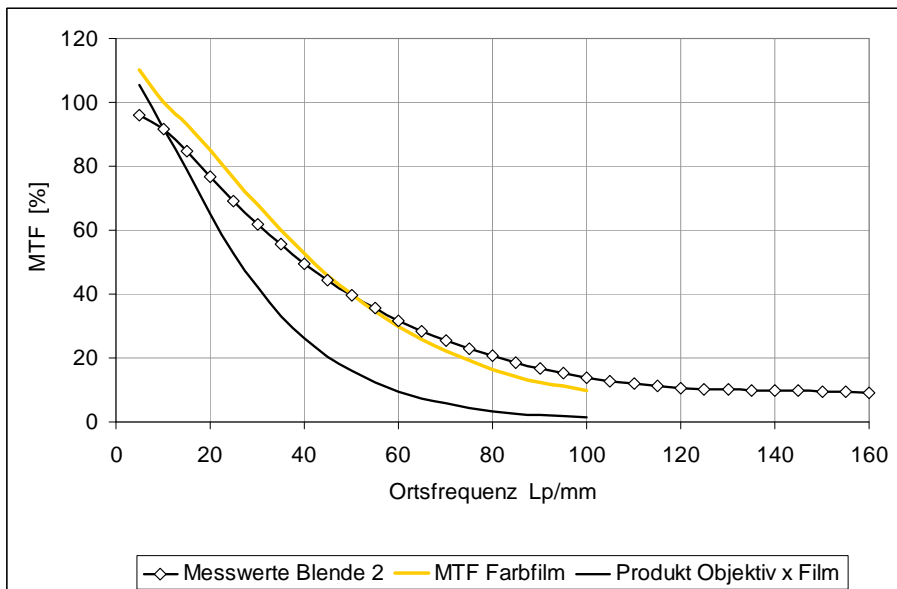
Wir betrachten ja nie das Bild des Objektivs direkt mit unserem Auge, sondern benötigen weitere Glieder der Abbildungskette: auf jeden Fall einen Bildsensor, analog oder digital, evtl. einen Scanner, einen Drucker oder eine Projektionsoptik.

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.

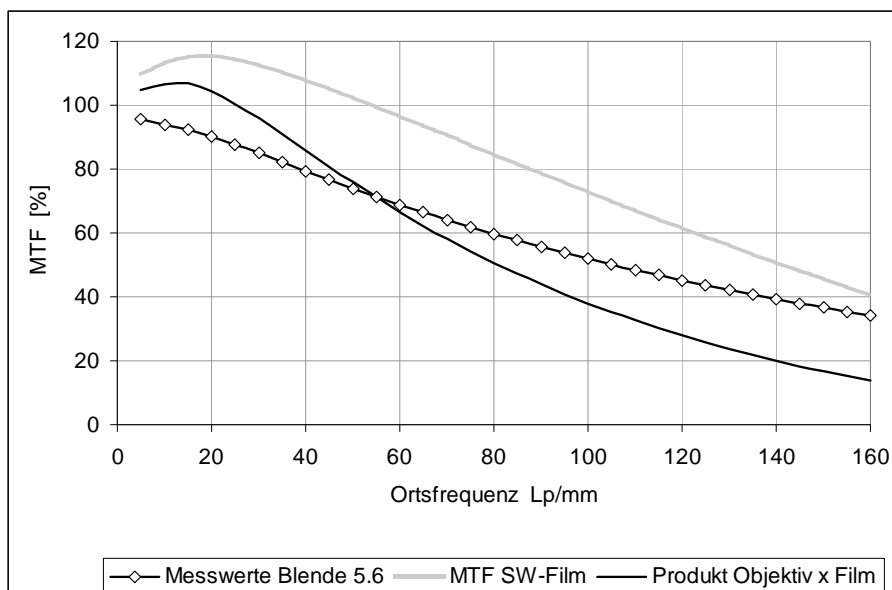
Digitale Sensoren mit ca. 24 Megapixeln im Kleinbildvollformat oder ca. 15 MP im APS-C Format haben Nyquist-Frequenzen von ca. 90 Lp/mm. Ihre theoretischen maximalen Auflösungen sind also ungefähr mit dem Farbnegativfilm vergleichbar. Deshalb genügt für diese Formate in aller Regel die Betrachtung der 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.

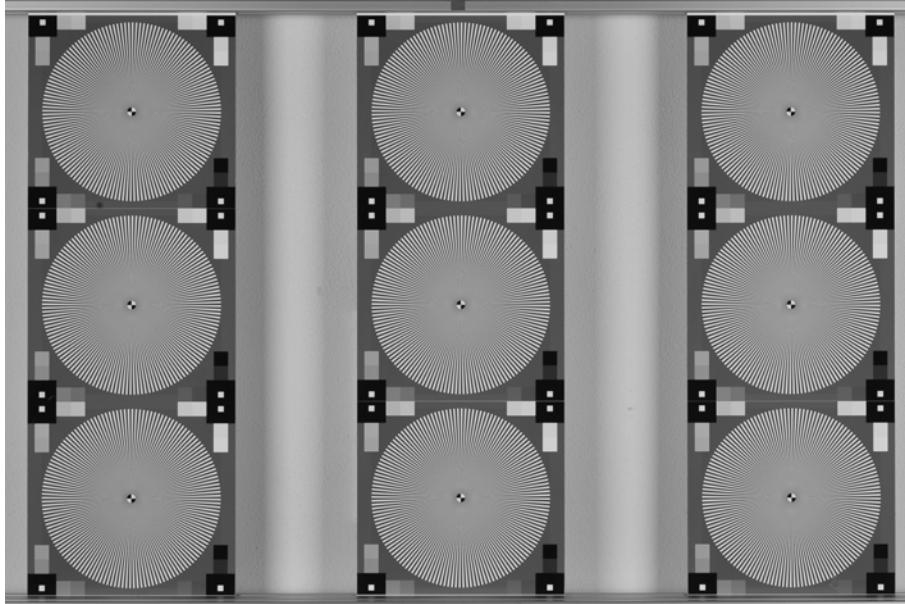
Ein Sensor, der die Objektivleistung auch bei höheren Frequenzen nutzen kann, ist übrigens einer der ältesten: der niedrigempfindliche Schwarz-Weiß Film.



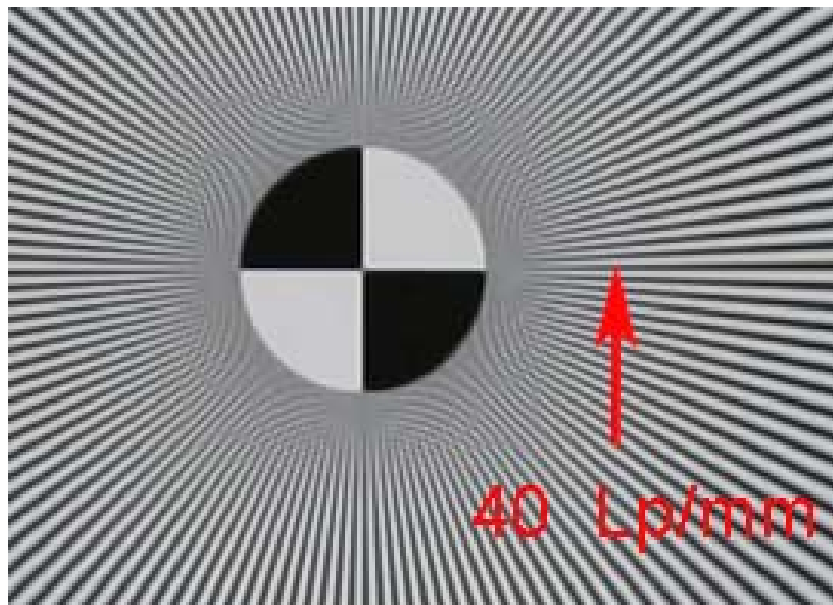
*Gutes Objektiv kombiniert mit hoch auflösendem SW-Film (hier Daten von T-Max 100)*

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:**

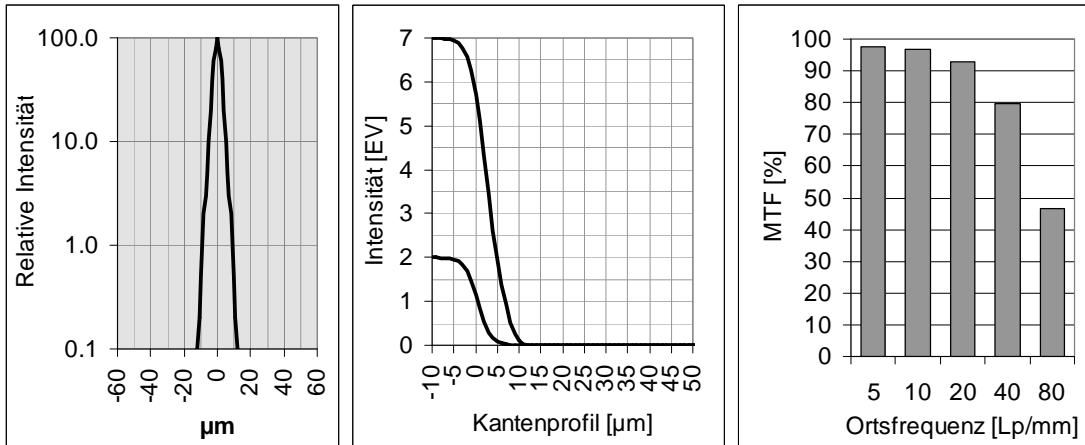
**Intensitätsprofil des Punktbildes**, mit logarithmischer Skala bis herunter zu  $1/1000$  der Maximalintensität in der Mitte. Die Breite des Punktbildes wird in  $\mu\text{m}$  angegeben,  $1 \mu\text{m}$  ist  $1/1000 \text{ mm}$ .

### **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.

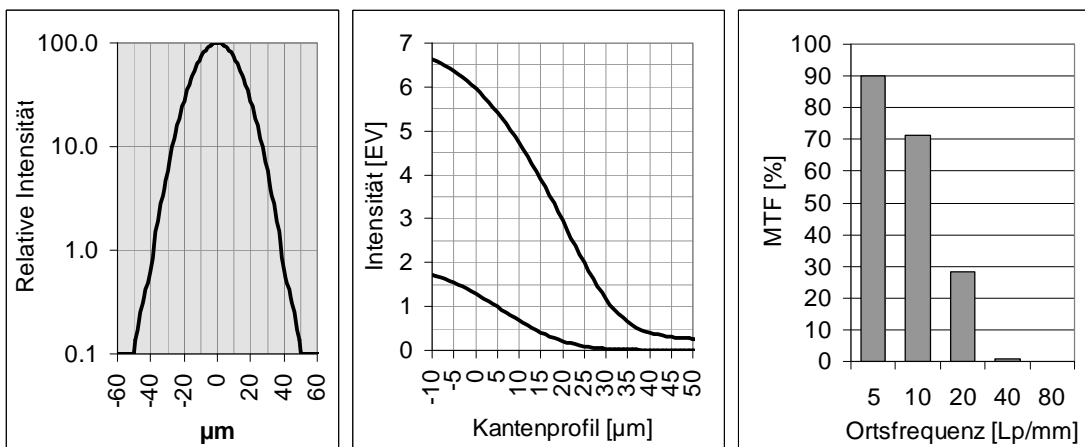
### **Rechts:**

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

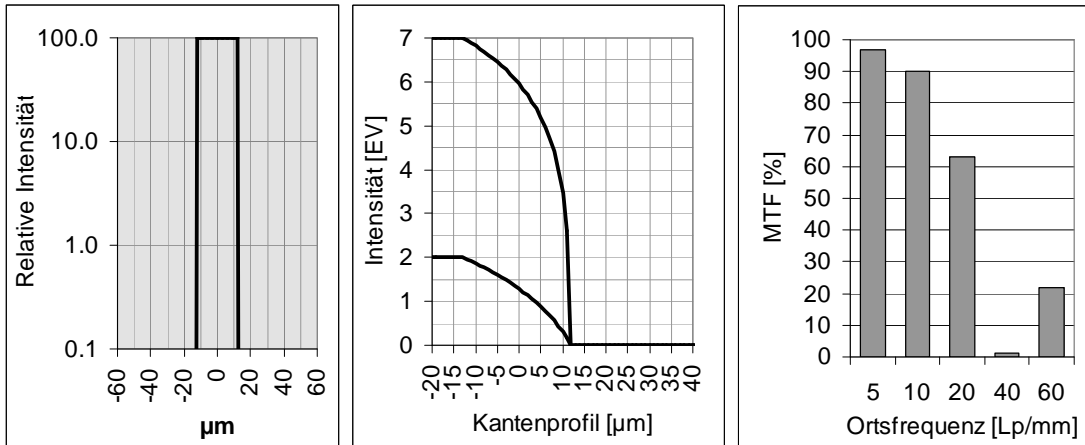


Dies ist ein Beispiel für sehr gute Abbildungsleistung im Kleinbildformat; das Punktbild ist schmal, der Übergang an einer Kante von weiß nach schwarz ist nicht breiter als etwa 10  $\mu\text{m}$ , also sehr steil. Der Fotograf sagt dann: das Bild der Kante ist scharf. In der Sprache der Modulationsübertragung 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.

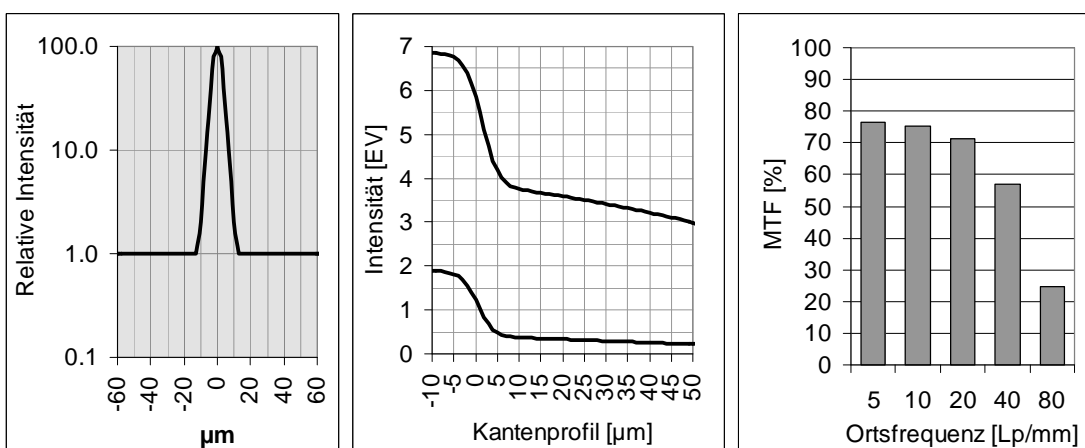


Hier ist der Durchmesser des Punktbildes deutlich größer; das Bild der Kante von weiß nach schwarz ist längst nicht so scharf, das Kantenprofil ist flach, denn der Übergang von maximaler Helligkeit bis zum Schwarz benötigt je nach Größe des Helligkeitssprungs 30 bis 50  $\mu\text{m}$ . Immerhin wird 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.

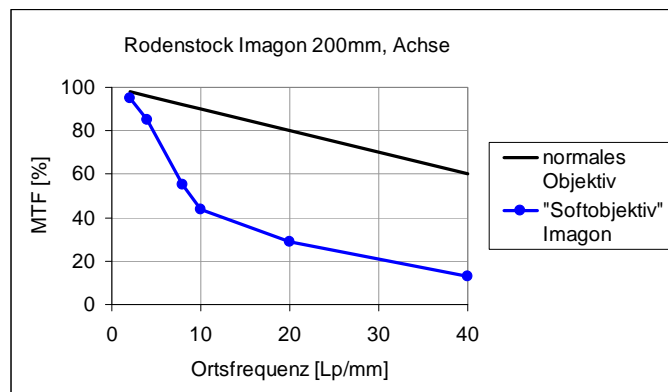
Die Abbildungseigenschaften eines Objektivs mit diesem Charakter können etwas widersprüchlich sein und werden auch je nach Bildinhalt unterschiedlich beurteilt.

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:

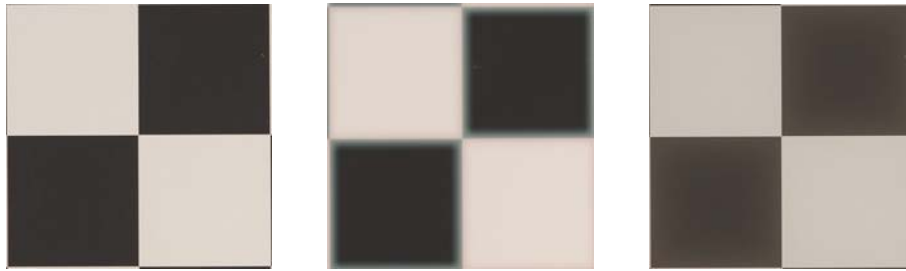


Es ist übrigens keineswegs so, dass man sich bei der Konstruktion eines Objektivs entscheiden muss zwischen hohem Auflösungsvermögen und einer guten Kontrastwiedergabe; bei gut korrigierten Objektiven ist beides in Ordnung.

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 Fassungsstellen. 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.

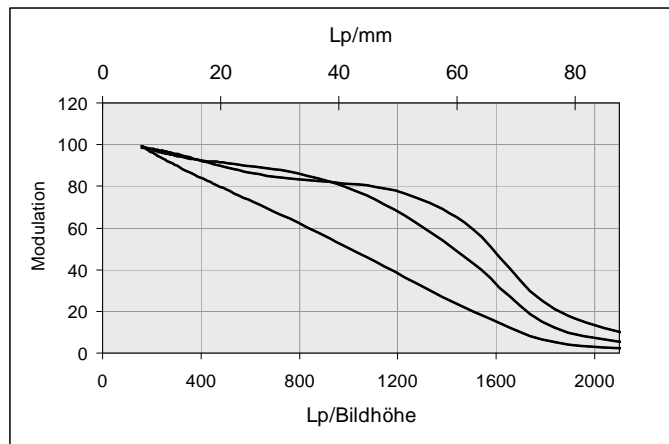
Sind sie sehr hoch, dann zeigt das Objektiv Überstrahlungen an kontrastreichen Kanten und Lichtern, wie unser 4. Beispiel. Sind sie aber ebenfalls niedriger als normal, dann ist das Objektiv einfach weniger scharf, vielleicht etwas defokussiert, aber es ist frei von Überstrahlungen.

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.

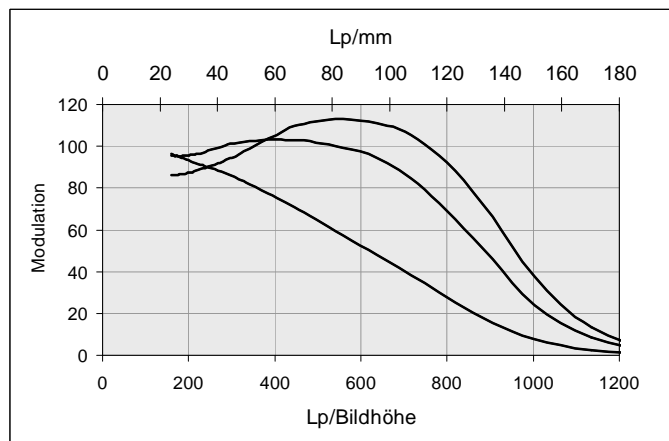
## Kantenschärfe in digitalen Bildern

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.*

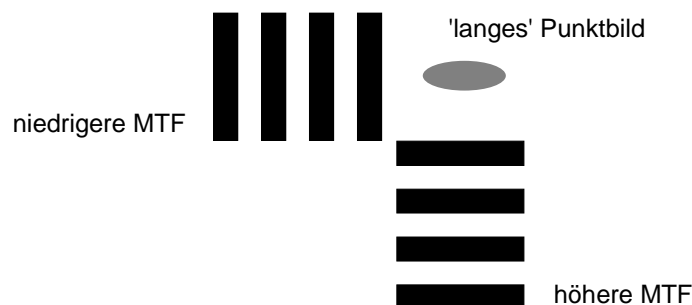
## Tangential und sagittal

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.

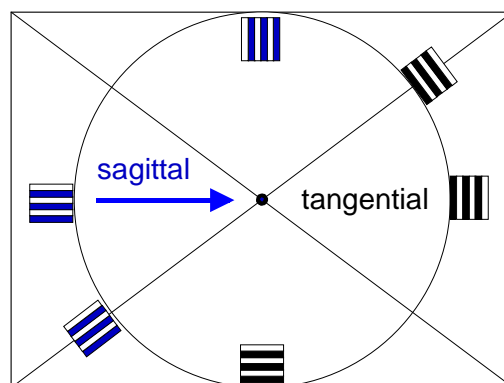
Wenn wir also die Richtung des Streifenmusters drehen, dann müssen wir unterschiedliche MTF-Kurven erwarten, je nachdem ob die kürzere oder die längere Ausdehnung des Punktbildes senkrecht zum Streifenmuster ist.



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**.



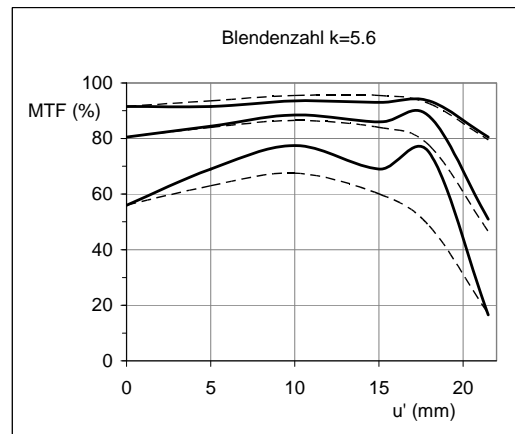
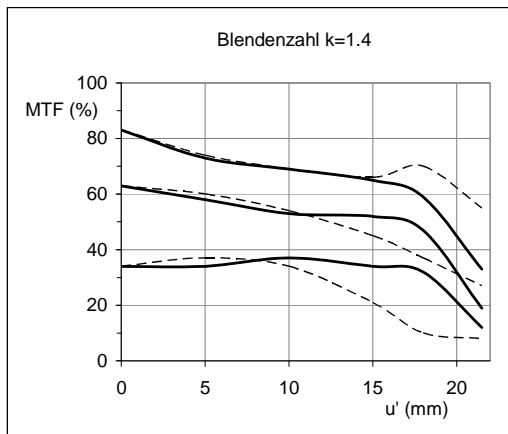
## MTF Kurven für Objektive

Da sich die Abbildungsqualität von Objektivenden 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.

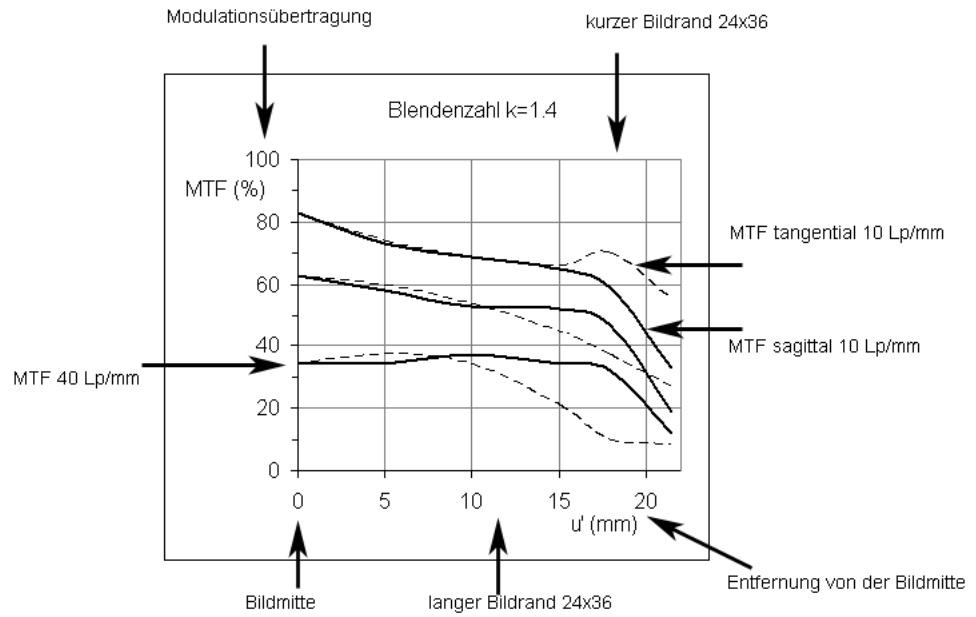
Deshalb sind die MTF-Kurven, die wir bisher kennen gelernt haben, bei denen wir nach oben die Modulationsübertragung und auf der waagerechten Achse die Ortsfrequenz aufgetragen haben, eigentlich nur für Sensoren gut geeignet, wo es keine örtlichen Veränderungen gibt. Für Objektive ist diese Darstellung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

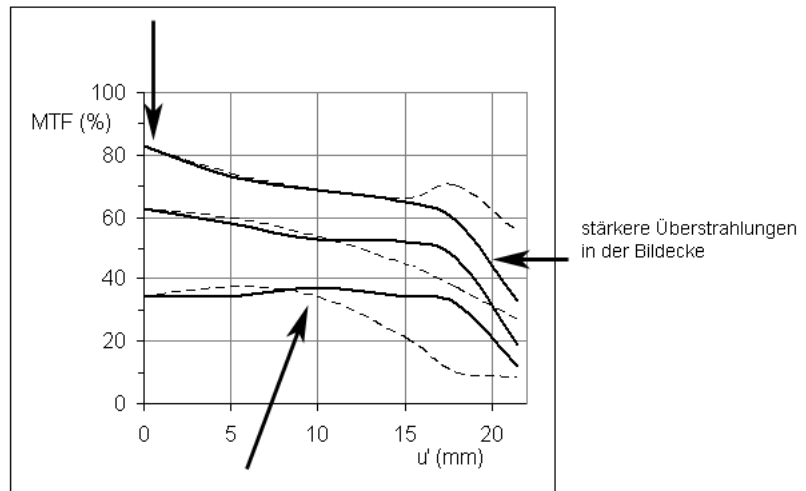
Deshalb finden Sie in unseren Datenblättern MTF-Kurven, bei denen nach oben die Modulationsübertragung und auf der waagerechten Achse die Bildhöhe, die Entfernung von der Bildmitte, aufgetragen sind. Die Grafik enthält sechs Kurven, nämlich jeweils tangentielle (gestrichelte Linien) und sagittale Werte (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

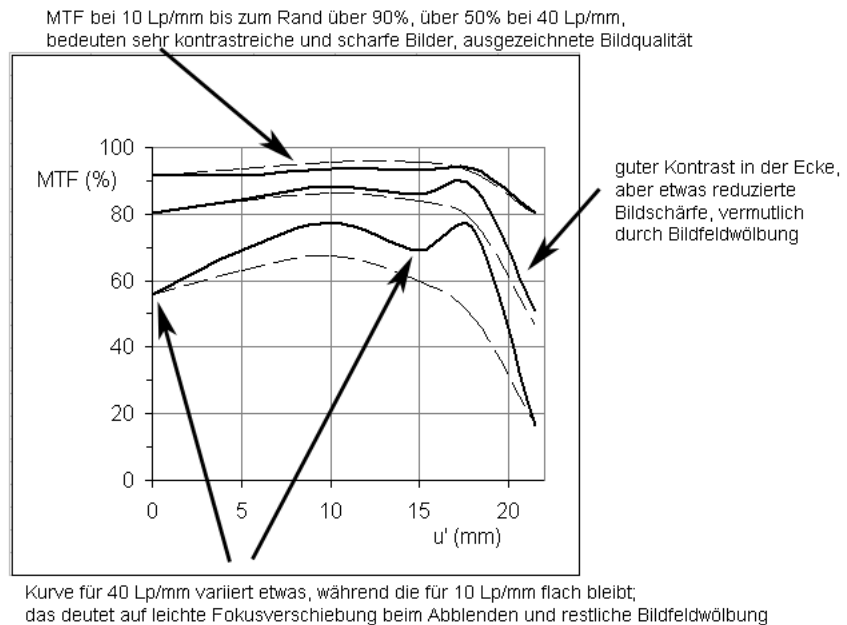


Gute Kantenschärfe, mäßiger Mikrokontrast,  
leichte Tendenz zu Überstrahlungen an kontrastreichen Kanten  
im Bildfeld bis zum Rand

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.



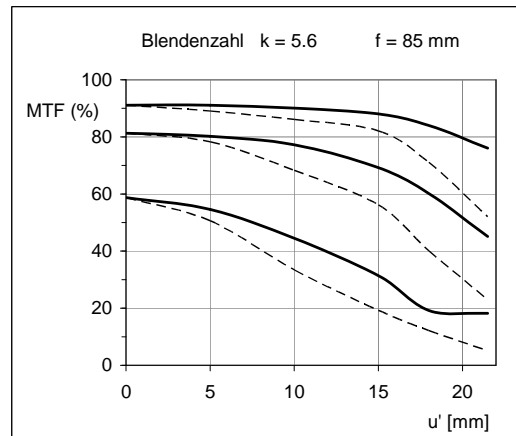
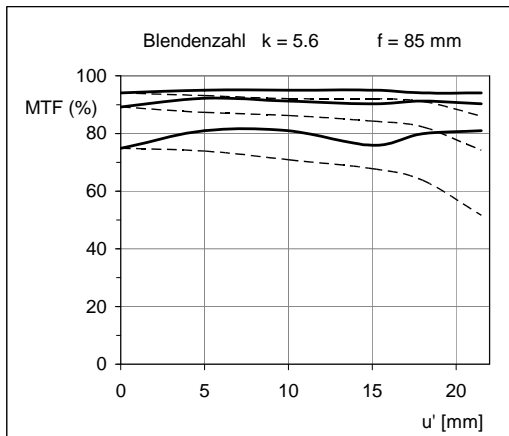
Wenn man das Objektiv abblendet, steigen alle MTF-Werte kräftig an; die Kurven verlaufen jetzt sehr dicht nebeneinander auf hohem Niveau. Die MTF-Werte fallen also mit steigender Ortsfrequenz nur relativ langsam. Das bedeutet ausgezeichnete Kantenschärfe und sehr guten Mikro-Kontrast bis hin zu den feinsten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

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

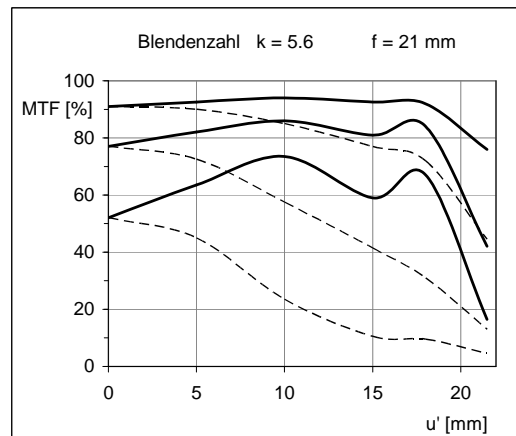
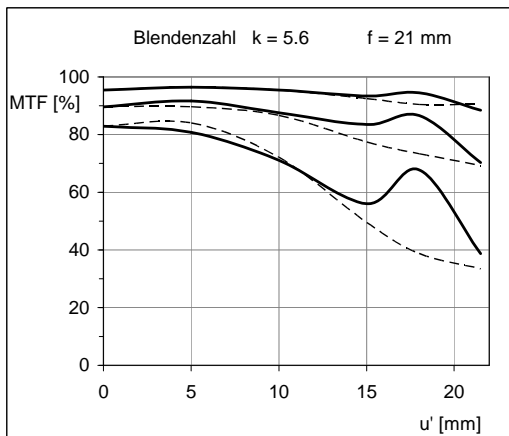
und dass in der Bildecke infolge der plötzlich einsetzenden Bildfeldwölbung eine Defokussierung vorliegt.

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.

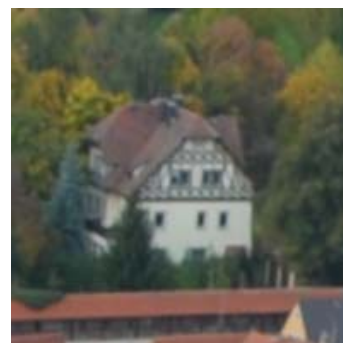
Warum die zu solchen Schwankungen führen, werde ich im Abschnitt über die dreidimensionalen Eigenschaften von MTF erläutern.



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.



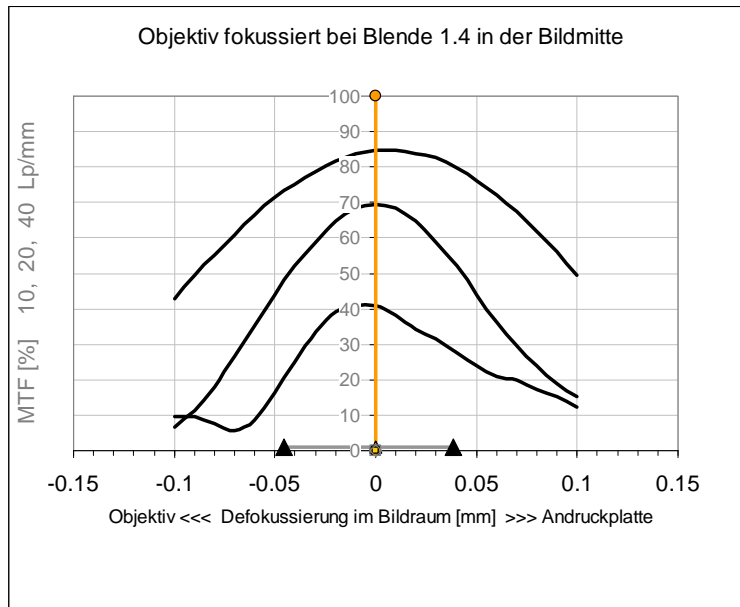
Ein Vergleich im schwieriger zu korrigierenden Superweitwinkelbereich, abgeblendet auf Blende 5.6. Links Daten eines Distagon 2.8/21 ZF, rechts die Daten eines Vergleichsobjektivs, bei dem der Farbquerfehler nicht so gut korrigiert ist. Seine sagittalen Werte zeigen merkbare Blendendifferenz, sind aber 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.

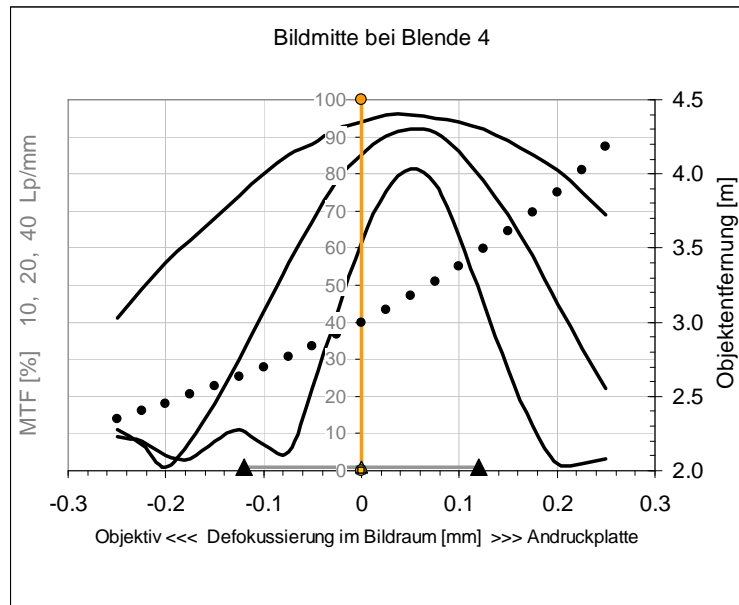
Bei diesem Kriterium für Schärfentiefe liegen übrigens die MTF-Werte an der Grenze des als scharf geltenden Raumes bei 40 Lp/mm so um die 20%.

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.*



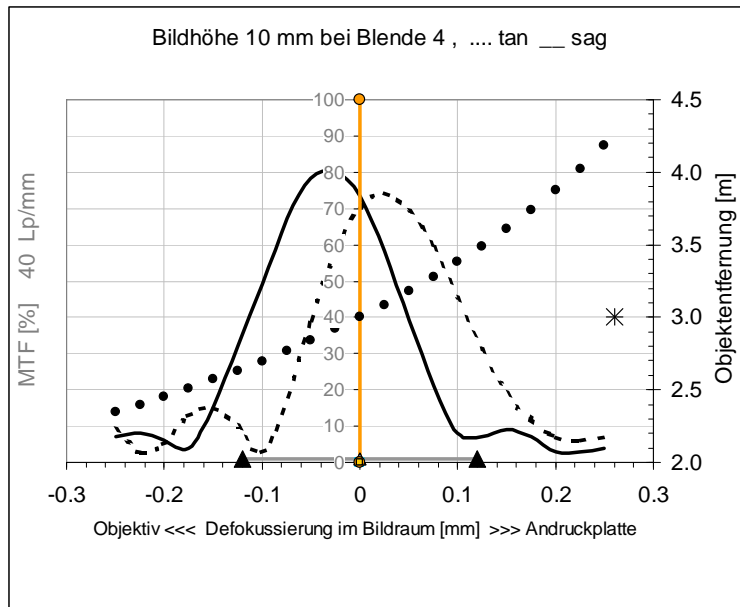


Weil durch das Ablenden die Restaberrationen stark verringert werden, steigen die Maximalwerte der MTF-Kurven natürlich deutlich an. Aber gleichzeitig beobachten wir auch eine Verschiebung der Kurven nach rechts, also weiter weg vom Objektiv. Jetzt ist das Objektiv also gar nicht optimal auf unsere Sensorposition (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.

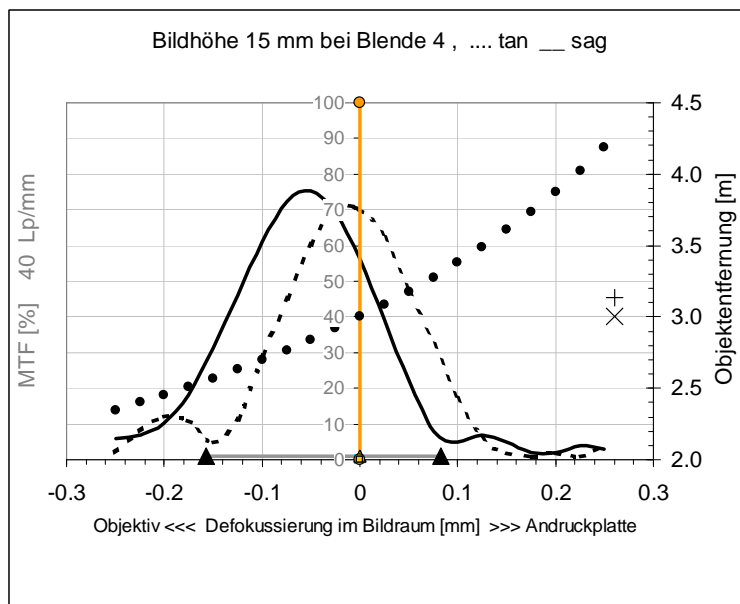
Die Blendendifferenz beträgt hier etwa 0.05 mm. Die schwarzen Punkte in der obigen Grafik zeigen, wie diese Verschiebung im Bildraum zusammenhängt mit den Entfernungen im Objektraum vor der Kamera (Skala auf der rechten Seite). Wenn das Objektiv z.B. ursprünglich bei Blende 1.4 auf 3m Entfernung fokussiert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

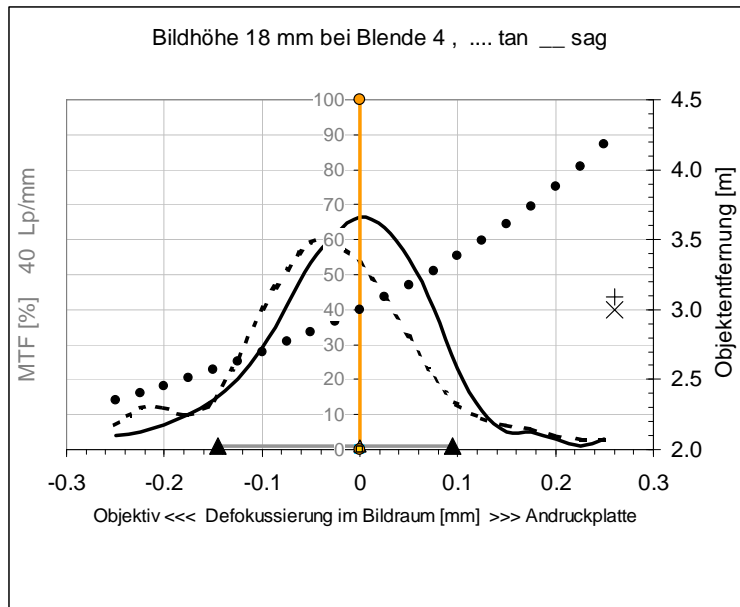
Sollte man diese Fokusverschiebung beim Fotografieren korrigieren? Eigentlich nicht, es sei denn, es käme wirklich auf die allerbeste Leistung in der Bildmitte an. Aber 0.05 mm sind ungefähr 20% der Strecke zwischen den Marken der Schärfentiefskala für Blende 4, also nicht so leicht zu kontrollieren. 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.



Außerhalb der Bildmitte müssen wir noch zwischen tangentialer und sagittaler Richtung unterscheiden; damit die Grafik übersichtlich bleibt, sind deshalb jetzt die Kurven für 10 und 20 Lp/mm weggelassen.

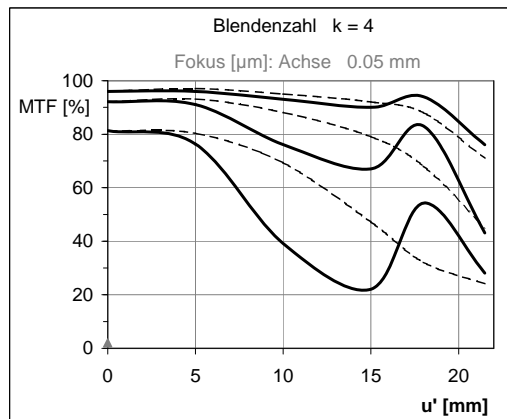
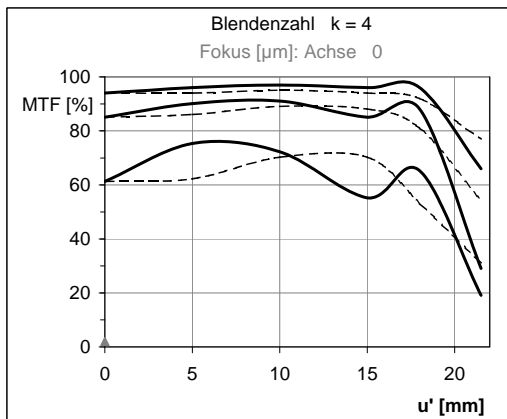
Wir sehen jedenfalls, dass diese beiden Kurven weniger oder sogar nach links verschoben sind. Die Lage des Maximums wandert also, wenn wir uns in der Bildfläche bewegen.





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.

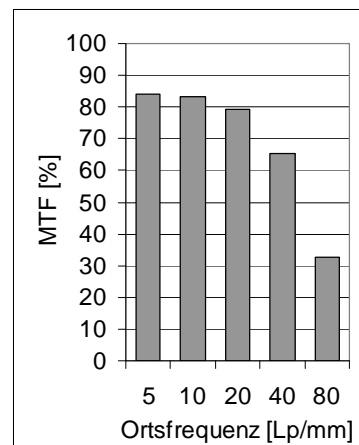
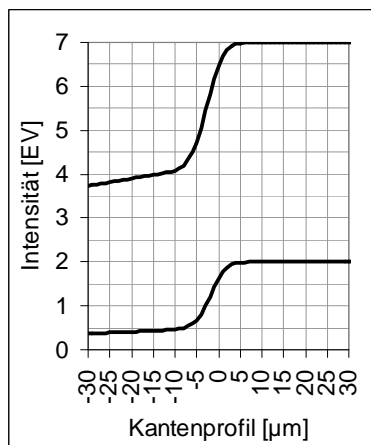
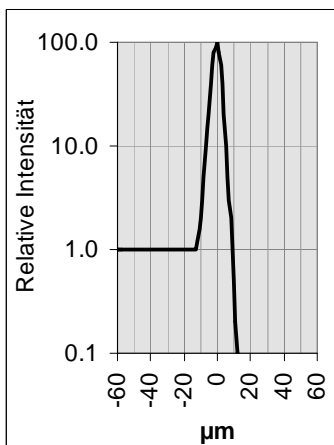
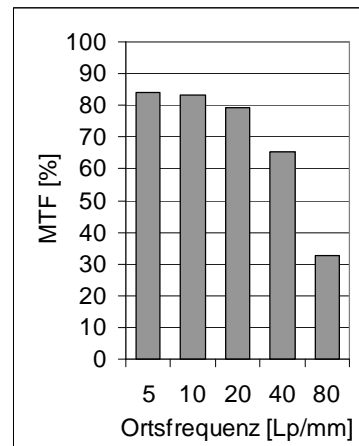
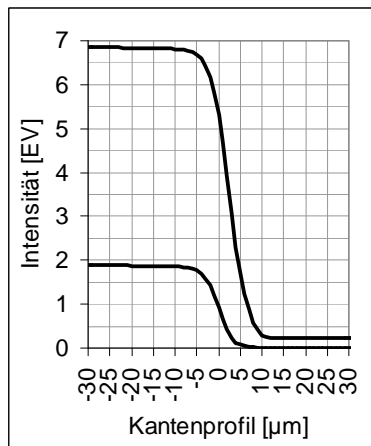
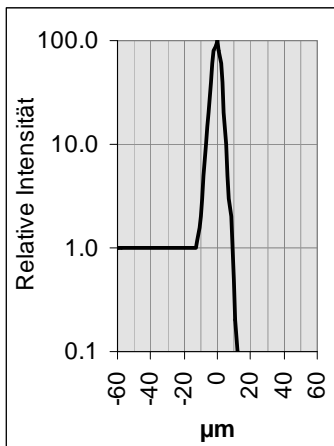
Die wirklich vollständige **Optische Übertragungsfunktion OTF** hat noch einen nicht so bekannten zweiten Anteil, die **Phasenübertragungsfunktion PTF**, die man üblicherweise unterschlägt. Sie hat etwas mit der Symmetrie des Punktbildes zu tun.

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.

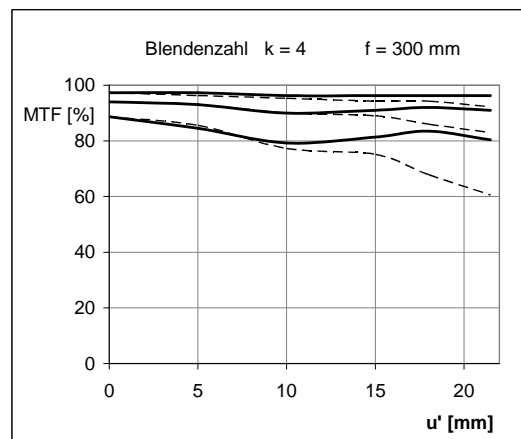
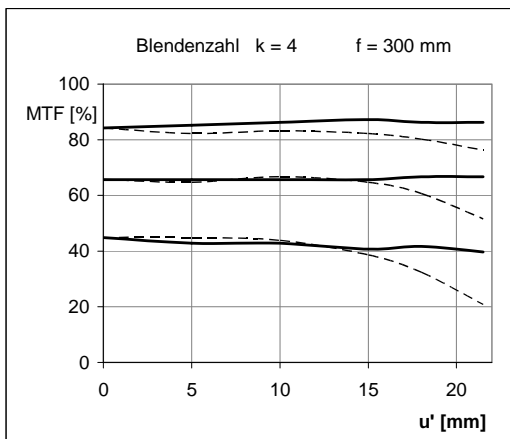
## Farbkorrektion

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.





## 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.



# **Wie liest man MTF- Kurven ?**

## **Teil II**

von

H. H. Nasse

## Vorwort zum zweiten Teil

Nach der Veröffentlichung des ersten Teils in unserer **Camera Lens News** haben wir von vielen Lesern Lob erhalten. Dafür bedanken wir uns herzlich. Es zeigt uns, dass technisch interessierte Fotografen eine ausführliche und fundierte Erklärung dieser Zahlenwelt sehr schätzen.

Wir haben aber auch vorsichtige Kritik gelesen, weil der Stoff nicht so ganz einfach war. Dessen sind wir uns auch bewusst, doch andererseits wollten ja wir eine allzu große Vereinfachung vermeiden und auch den Lesern etwas bieten, die schon viel über das Thema wissen.

Vielleicht fehlten dem ersten Teil auch die Bilder, um die es ja eigentlich geht. Genau das wollen wir jetzt nachholen. Sie finden in diesem zweiten Teil einen umfangreichen Katalog von MTF-Kurven, und Sie sehen die Bilder dazu, die Sie von unserem Server laden und auf Ihrem Computer betrachten können. Durch den Vergleich von Kurven und Bildern werden Sie intuitiv lernen, welche Bedeutung die verschiedenen Kurven und Zahlen haben. Und Sie werden auch lernen, welche Bedeutung sie nicht haben.

Dieses Wissen wollen wir dann auf ein ganz aktuelles Thema anwenden: Sind heutige Objektive gut genug für Sensoren mit 24 Millionen Pixeln? Wir sind sicher, dass damit reichlich Diskussionsstoff vorliegt.

Am Schluss finden Sie noch zwei Seiten mit Informationen zur Geschichte und zur Messtechnik. Dies muss in dem begrenzten Umfang zwangsläufig lückenhaft sein; es soll lediglich den besonders interessierten Lesern Stichworte zum Weitersuchen liefern.

## Wie sieht man MTF-Kurven in Bildern?

Im ersten Teil dieses Artikels haben wir versucht, eine Antwort zu geben auf den als Frage formulierten Titel: **Wie liest man MTF-Kurven?**

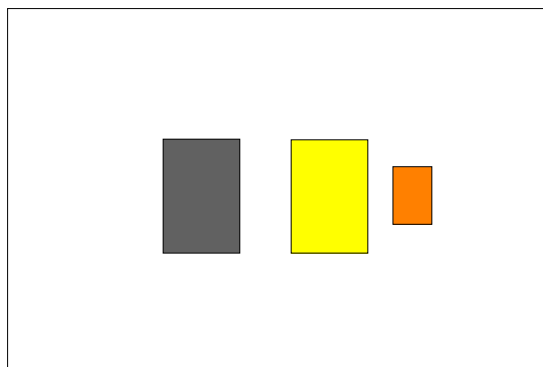
Wir haben dabei gesehen, welcher Zusammenhang besteht zwischen der Modulationsübertragung und der durch Aberrationen und Beugung bestimmten Gestalt der Punktbilder. Wir haben verschiedene graphische Darstellungen von MTF kennen gelernt: in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz, von der Bildhöhe oder von der Fokussierung. Im Abschnitt über **Kantenschärfe und Bildkontrast** haben wir Ihnen vier verschiedene Grundtypen von Übertragungsfunktionen gezeigt (Teil 1, S. 13-15).

Wir haben damit sozusagen das Alphabet gelernt, das wir brauchen, um MTF-Kurven lesen zu können – aber das alles war natürlich ein wenig theoretisch, wenn man bedenkt, dass es um Bilder geht.

Und deshalb möchten wir heute den Titel neu formulieren: **Wie sieht man MTF-Kurven in Bildern?**

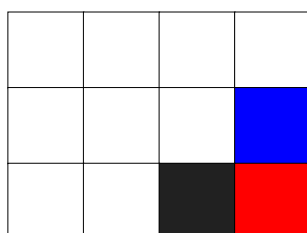
Dazu zeigen wir Ihnen drei verschiedene Motive, die jeweils mit zwölf verschiedenen Übertragungsfunktionen abgebildet wurden. Diese Bilder müssen Ihnen natürlich in genügend hoher Auflösung zur Verfügung stehen. Deshalb sind sie nicht in diesen Text eingefügt, sondern liegen als **Download-Files** auf unserem Server für Sie bereit. In diesem Textfile finden Sie die zu den Bildern gehörenden MTF-Kurven und zusätzliche Erläuterungen.

Die Bilder sind ca. 5 x 7.5 mm große Ausschnitte aus einem Kleinbild-Vollformat. Sie wurden mit einer digitalen 12MP-Kamera gemacht (4256x2832 Pixel). Die benutzten Ausschnitte sind 600x900 bzw. 300x450 Pixel groß, zeigen also nur rund 4 % bzw. 1% der gesamten Bildfläche.



Ausschnitte aus dem Kleinbildformat 24x36 mm

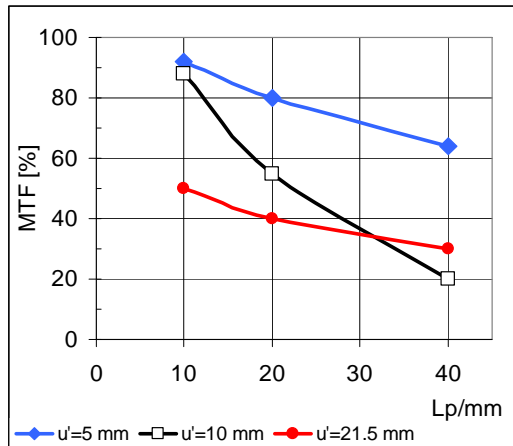
Die zwölf verschiedenen Ergebnisse eines Bildausschnitts haben wir in einem neuen Bild zusammengesetzt, so dass eine Art Schachbrett mit den zwölf verschiedenen Übertragungsfunktionen entsteht:



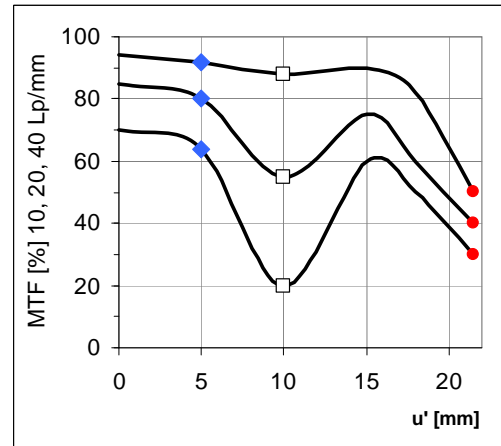
Dieses Mosaik mit drei Zeilen und vier Spalten ist eine Bilddatei. Wenn Sie das Bild mit einem geeigneten Programm betrachten (z.B. Photoshop), wollen wir jeweils drei Teilbilder miteinander vergleichen. Ihre Lage ist in einer Art Landkarte des Mosaiks farblich markiert.

Die Farben rot, blau und schwarz sind auch die Kurven-Farben in der Grafik der zugehörigen Übertragungsfunktionen.

Da die Bilder nur einen kleinen Teil des ganzen Kleinbildformates zeigen, sind die MTF-Kurven über der Ortsfrequenz aufgetragen. Denn wir interessieren uns jetzt ja nicht für die örtlichen Veränderungen im Bildkreis des Objektivs.



MTF-Daten für Objektiv trägt man am besten über der Bildhöhe auf, je eine Kurve für jede wichtige Ortsfrequenz. Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Darstellungsarten soll noch einmal durch folgendes Beispiel illustriert werden:



Wie MTF-Kurven über der Ortsfrequenz und über der Bildhöhe miteinander zusammenhängen

Die MTF-Kurven, deren Bedeutung mit den Bildern veranschaulicht werden soll, sind **aus digitalen Bilddateien** berechnet worden. Aus dem Grunde wurden in jeder Einstellung von Objektiv und Kamera **jeweils zwei Bilder** aufgenommen: ein spezielles Testobjekt für die Messung der Übertragungsfunktion und dann das Motiv für unser Auge, beide in identischer Entfernung von der Kamera.

Die MTF-Kurven, die man auf diese Weise erhält, sind **Systemkurven**. Sie hängen also nicht nur von den Eigenschaften des Objektivs ab, sondern auch von den Eigenschaften der digitalen Kamera.

Anzahl und Größe der Pixel des Sensors, die Auslegung des Tiefpassfilters, die spektrale Empfindlichkeit, die Algorithmen zur Umrechnung der Bayer-Matrix Daten, der Grad der nachträglichen Schärfung zur Kompensation des Tiefpassfilters - all diese Faktoren haben einen Einfluss auf die Modulationsübertragungsfunktion, die man auf der Speicherkarte findet.

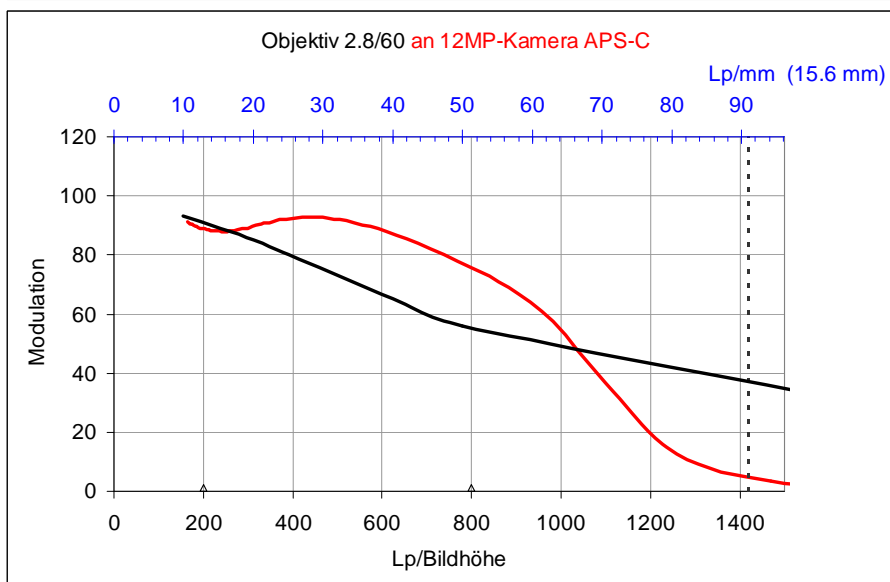
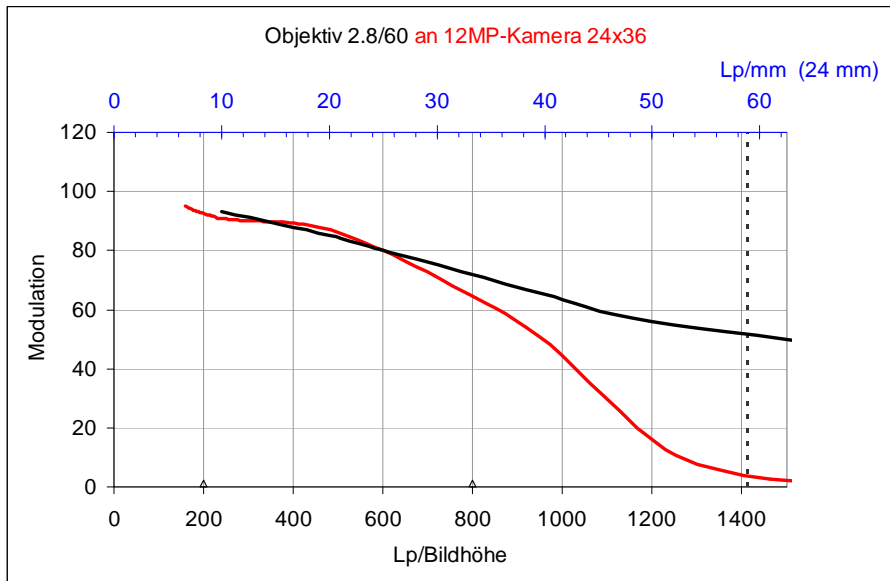
So gemessene MTF-Kurven können natürlich für das gleiche Objektiv unterschiedlich aussehen, wenn man dieses Objektiv an verschiedenen Kameras verwendet.

Wenn z.B. eine Kleinbildkamera und eine mit APS-C Format die gleiche Pixelzahl haben, dann sind ihre Tiefpassfilter unterschiedlich. Denn die APS-Kamera mit der kleineren Sensorfläche hat wegen der kleineren Pixelgröße eine höhere **Nyquist-Frequenz**. Ihre Pixel sind kleiner und haben geringeren Abstand voneinander.

Vergleicht man die aus der Datei berechneten MTF-Kurven über der Ortsfrequenz in Lp/mm, dann stellt man irritiert fest, dass das Objektiv an der APS-Kamera scheinbar viel besser ist. Das ist aber eine Täuschung, die durch die Kameraeigenschaften bedingt ist.

Wenn man mit dieser Methode Objektiv testen will, darf man also nur Ergebnisse mit derselben Kamera vergleichen, sonst kann Verwirrung entstehen. Die Methode hat noch weitere Nachteile, auf die ich später noch zu sprechen komme.

Der Vorteil des Verfahrens besteht aber darin, dass man auch die festen und die variablen Eigenschaften der Kamera, ja sogar den Einfluss nachträglicher Bildbearbeitung auf dem Rechner mess-technisch erfassen kann.



Diese beiden Grafiken vergleichen optische MTF-Messung und System-MTF-Messung aus der Bilddatei. Das gleiche Objektivexemplar wurde an zwei verschiedenen Kameras verwendet. Die schwarze Kurve zeigt das Ergebnis der optischen Messung; über der Ortsfrequenz in Lp/mm (blaue Skala oben) sind die Werte in beiden Fällen identisch, anders kann es ja nicht sein.

Die rote Kurve wurde aus der Bilddatei berechnet. An der APS-Kamera hat sie eine stärkere Aufwölbung im mittleren Bereich, weil dort eine stärkere Scharfzeichnung gewählt war als an der Vollformatkamera. Die Auflösungsgrenze ist an beiden Kameras etwa gleich, wenn man auf die untere Achse sieht, wo die Ortsfrequenz auf die Bildhöhe bezogen ist. Das folgt natürlich daraus, dass die Pixelzahl gleich ist.

Sieht man dagegen auf die obere Achse, wo die Ortsfrequenz auf die absolute Strecke von einem Millimeter bezogen ist, dann ist die Auflösung in der APS-Kamera höher. Sie hat die höhere Nyquist-Frequenz von ca. 90 Lp/mm (gestrichelte Linie). Dort unterscheiden sich die optische und die digitale Kurve auch sehr stark: die Auflösung der digitalen Kamera wird durch die Pixelzahl und das Tiefpassfilter begrenzt – nicht durch das Objektiv.

## Betrachtungsbedingungen

Höchstwahrscheinlich werden Sie unsere Beispielbilder auf einem Computermonitor betrachten. Deshalb sollten wir uns noch ein paar Gedanken darüber machen, wie die Eigenschaften des Monitors unsere Wahrnehmung der Bilder beeinflussen.

### Bildgröße

Die benutzte 12MP-Digitalkamera hat eine Nyquist-Frequenz von rund 1400 Linienpaaren pro Bildhöhe (mit Bildhöhe meint man hier die kurze Seite des Formats 24x36, man denkt also an ein Bild im Querformat). Um ein aus einer hellen und einer dunklen Linie bestehendes Linienpaar darzustellen, braucht man mindestens zwei Pixel. Die Kamera hat auf 24mm Bildhöhe genau **2832 Pixel (2x1416)**.

Der Monitor müsste mindestens genauso viele Bildpunkte haben, um diese Bildinformation verlustfrei zeigen zu können. In der Regel muss man sich aber mit geringerer Monitorleistung begnügen, z.B. mit **1600 x 1200** Bildpunkten. Deshalb kann der Monitor immer nur Ausschnitte des ganzen Bildes verlustfrei zeigen.

### Betrachtungsabstand

Wenn der Monitor auf 32.4 cm Bildhöhe 1200 Bildpunkte besitzt, dann entfallen auf einen Millimeter 3.7 Bildpunkte. Der Monitor hat also ein Auflösungsvermögen von knapp **2 Lp/mm**.

In der (fast) verlustfreien 100%-Ansicht entspricht das auch der Leistung des Kamerasensors: das Bild mit 76 cm Höhe ist im Vergleich zum 24 mm hohen Bild in der Kamera **31x** vergrößert. Die durch die Anzahl der Pixel festgelegte Auflösungsgrenze des Sensors (Nyquist) liegt knapp unter **60 Lp/mm**. Nach 31facher Vergrößerung entspricht das also auch knapp 2 Lp/mm.

Wenn man Photoshop auf einem Monitor mit 1200 Bildpunkten in vertikaler Richtung betreibt, dann wird ein Teil dieser Bildpunkte noch von Menuleisten verbraucht und man sieht netto z.B. nur 1036 Bildpunkte.

In der **100%-Ansicht**, wo jeder Bildpunkt des Datenfiles durch einen Bildpunkt des Monitors dargestellt wird, sieht man deshalb nur gut ein Drittel des 2832 Pixel hohen Bildes, bzw. rund **13%** der Bildfläche.

Hat der Monitor z.B. eine Diagonale von 21" = 54 cm, dann hat das gesamte Bild der Kamera in der 100%-Ansicht eine Größe von **76 x 114 cm**.

Auch wenn unsere Demonstrationenbilder absolut kleiner sind (um die Dateigrößen nicht ins Unermessliche wachsen zu lassen), sollten Sie immer bedenken, dass Sie Ausschnitte aus einem Bild im Posterformat betrachten.

Wenn man das Monitorbild aus **50 cm** Entfernung betrachtet, hat das Auge in dieser Entfernung ein maximales Auflösungsvermögen von ca. **4 Lp/mm**. Es ist also einfach ausgedrückt doppelt so gut wie das Monitorbild.

Deshalb können uns Bilder in der 100%-Ansicht niemals perfekt scharf erscheinen. Sowohl die begrenzte Leistung des Monitors als auch die für den geringen Betrachtungsabstand riesige Vergrößerung des Bildes sorgen für eine gewisse Weichheit.

Die Betrachtung einer 100%-Ansicht aus 50 cm Entfernung ist ein sehr kritischer Blick auf das Bild. Für eine etwas realistischere Beurteilung kann man z.B. die Betrachtungsentfernung verdoppeln.

## Beispielbilder

Um die Bedeutung verschiedener MTF-Kurven zu vergleichen brauchen wir die folgenden Bilddateien:

- Bild\_01** Dateigröße 4.8 MB
- Bild\_02** Dateigröße 3.7 MB
- Bild\_03** Dateigröße 0.8 MB

Diese drei Dateien enthalten jeweils zwölf Teilbilder; die Teilbilder an der gleichen Position in dem „Schachbrettmuster“ haben gleiche Modulationsübertragung.

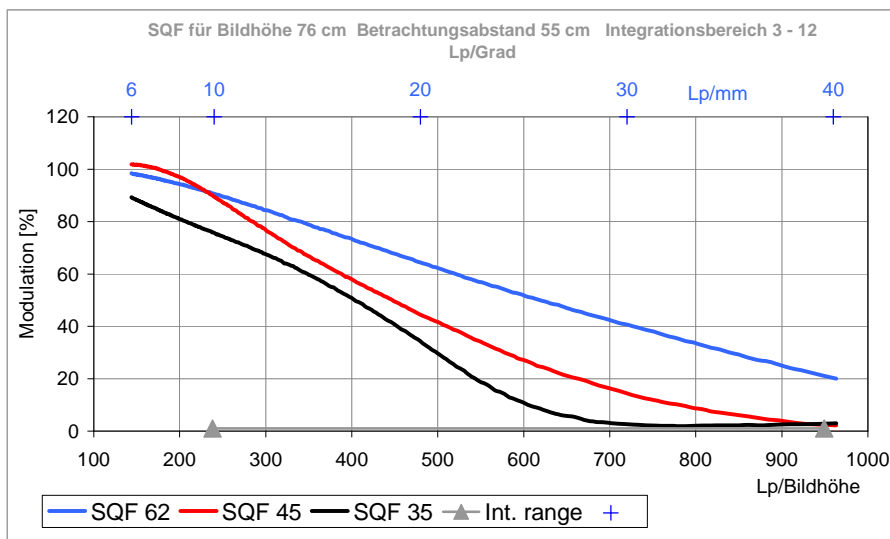
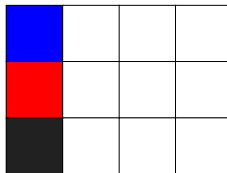
Wir werden jetzt jeweils drei, meist benachbarte Bilder miteinander vergleichen. Eine kleine „Landkarte“ zeigt Ihnen, wo diese Bilder liegen, und welche MTF-Kurve in diesem Bild gemessen wurde.

Die Kurven zeigen die Modulationsübertragung über der Ortsfrequenz, unten in Linienpaaren pro Bildhöhe, oben in Lp/mm bei Verwendung einer Kleinbildkamera **24x36**. Die Linienfarben entsprechen den Markierungen in der „Landkarte“.

In der Bildlegende ist als Zahl der **Qualitätsparameter SQF** angegeben, der sich aus der Fläche unter der Kurve der Modulationsübertragung ergibt.

(Erläuterung auf den folgenden Seiten)

## Vergleich 1



Die blaue, sehr gleichmäßig von 100 auf 20% abfallende Kurve für das Teilbild oben links steht für eine insbesondere bei mäßiger Bildvergrößerung akzeptable Schärfe, sie ist typisch für die Digitalkamera mit ausgeschalteter Nachschärfung. In einem analogen Bild auf Film entsprächen die Werte etwa der Situation an der Grenze des Schärfentiefebereichs. Die schneller abfallenden roten und schwarzen Kurven gehören zu Bildern, die zumindest in der 100%-Ansicht deutlich unscharf sind.



## SQF (Subjective Quality Factor)

Wenn Sie alle unsere 3x12 Beispiele betrachtet haben, und wenn Sie dabei auch die Entfernung zum Monitor variiert haben, sagen wir zwischen 0.5 und 2 m, dann werden Sie eine überraschende Erfahrung machen: es ist gar nicht so leicht, zu sagen, welches Bild das beste ist, oder welche Bilder gut genug sind.

Wahrscheinlich wird Ihr Urteil je nach Motiv und vor allem je nach Betrachtungs-entfernung verschieden ausfallen.

Die absoluten MTF-Werte allein sind also noch kein ausreichendes Kriterium, um die subjektiv wahrgenommene Bildqualität vorherzusagen. Man muss die Kurven geeignet bewerten und dabei die jeweiligen Betrachtungsbedingungen berücksichtigen.

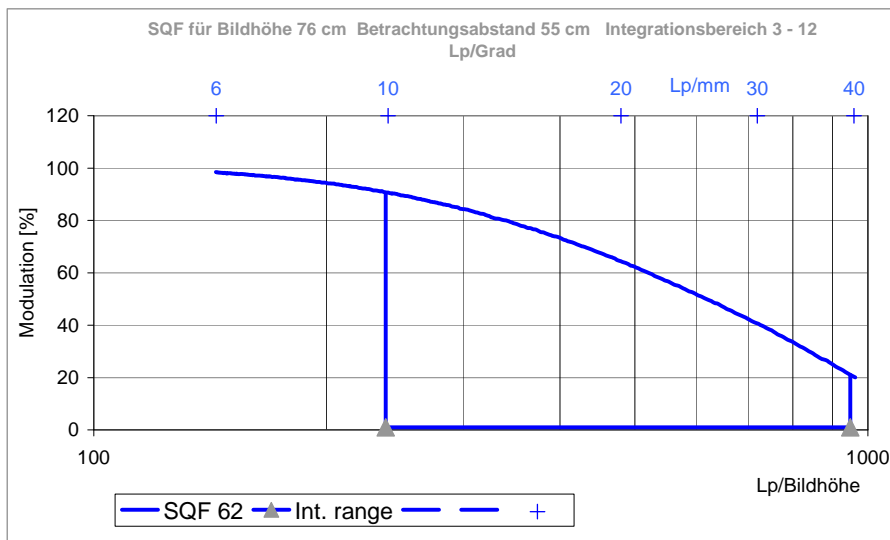
In zahlreichen Versuchen mit Testpersonen und vielen verschiedenen Bildern konnte man zeigen, dass ein ganz brauchbarer Zusammenhang besteht zwischen dem subjektiven Qualitätsurteil und der Fläche unter der MTF-Kurve.

Bei dem Qualitätsparameter **SQF** (nach Granger & Cupery, 1972) wird die Fläche unter einer MTF-Kurve berechnet, bei der die Ortsfrequenz eine logarithmische Skala besitzt.

Der Ortsfrequenzbereich für die Flächenberechnung hängt ab von der Größe und Entfernung des betrachteten Bildes. Er wird so festgelegt, dass das Auge diese Ortsfrequenzen unter **3 bis 12 Lp/Grad** (Linienpaare pro Grad Sehwinkel) sieht. In den Grafiken ist dieser Bereich der Flächenberechnung durch die grauen Dreiecksmarken gekennzeichnet.

Leider mussten wir den Leser gerade mit einer dritten Einheit der Ortsfrequenz verwirren. Die Einheit Lp/Grad ist aber sinnvoll, wenn es um die subjektive Wahrnehmung geht. Denn ein Streifenmuster mit einer bestimmten Frequenz in Lp/mm sieht man ja je nach Entfernung ganz verschieden.

Das maximale Auflösungsvermögen des Auges beträgt ca. 40 Lp/Grad - das entspricht etwa 9 Lp/mm in 25cm Entfernung vom Auge, 1 Lp/mm in gut 2m Entfernung.

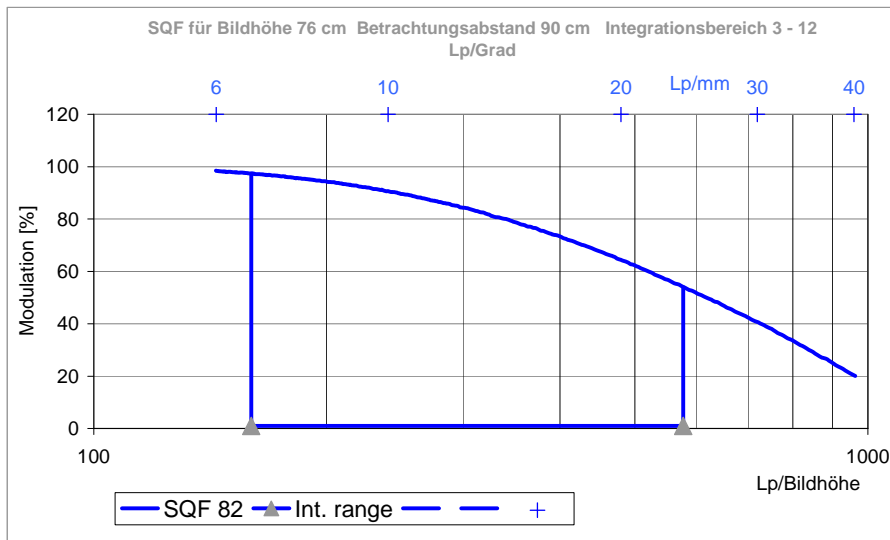


*MTF-Kurve über logarithmischer Ortsfrequenz-Skala (gleiche Ortsfrequenz-Verhältnisse haben gleichen Abstand, der Abstand von 100 bis 200 Lp/Bildhöhe ist so groß wie der von 200 bis 400 Lp/Bildhöhe). Die Wahl der logarithmischen Skala gibt den niedrigen Ortsfrequenzen mehr Gewicht.*

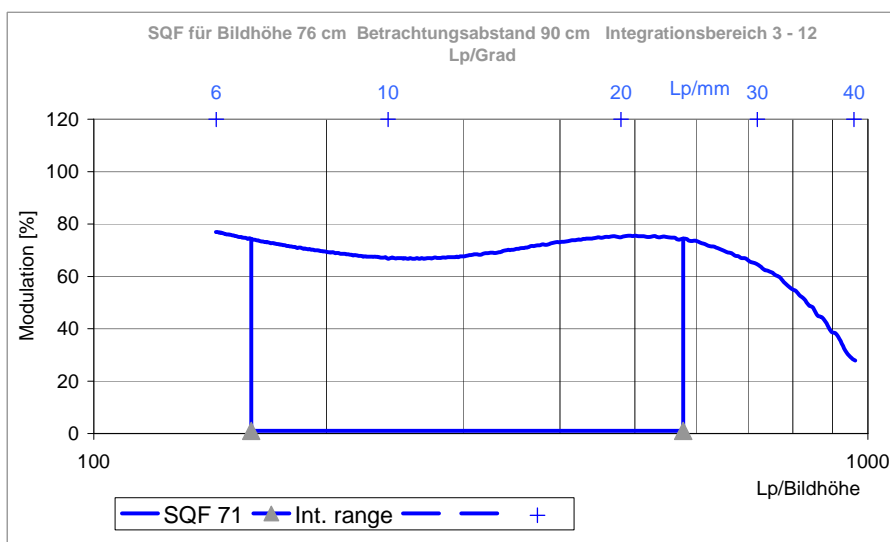
*Die blau umrandete Fläche unter der Kurve ist der Qualitätsparameter SQF.*

Wenn man den Betrachtungsabstand vergrößert, verschiebt sich der Bereich der Flächenberechnung zu niedrigeren Ortsfrequenzen, der Parameter SQF wird dadurch größer.

Das ist anschaulich vergleichbar mit der Betrachtung eines Zeitungsbildes: sieht man es aus größerer Entfernung, dann wird seine begrenzte Detailauflösung weniger wichtig, man erkennt auch die Rasterstruktur nicht mehr.



Die gleiche Übertragungsfunktion wie auf der vorhergehenden Seite, jetzt aus größerer Entfernung gesehen. Dadurch verschiebt sich die blau umrandete Fläche zu niedrigeren Ortsfrequenzen, der Parameter SQF steigt von 62 auf 82.



Eine relativ geringe Modulationsübertragung bei niedrigen Ortsfrequenzen hat großen Einfluss auf den Parameter SQF, er ist deutlich kleiner, obwohl die hohen Ortsfrequenzen mit besserem Kontrast wiedergegeben werden als im oberen Beispiel.

## SQF – Ortsfrequenz-Tabelle:

3 - 12 Lp/Grad :								
Abstand /Diagonale	Kurze Bildseite [cm]	Betrachtungsabstand [cm]	APS-C Lp/mm	24x36 Lp/mm	4.5x6 Lp/mm	6x7 Lp/mm	9x12 Lp/mm	
<b>0.3</b>	50	27	20 - 80	13 - 53	8 - 30	6 - 23	4 - 14	
<b>0.4</b>	75	54	15 - 60	10 - 40	6 - 23	4 - 17	3 - 11	
<b>0.5</b>	30	27	12 - 48	8 - 32	5 - 18	3 - 14	2 - 8	
<b>0.7</b>	20	25	9 - 34	6 - 23	3 - 13	2.4 - 10	1.5 - 6	
<b>1</b>	30	54	6 - 24	4 - 16	2.3 - 9	1.7 - 7	1 - 4	
<b>1.4</b>	10	25	4 - 17	3 - 11	1.6 - 6.5	1.2 - 5	0.8 - 3	
<b>2</b>	100	361	3 - 12	2 - 8	1.1 - 5	0.9 - 3.4	0.5 - 2.1	

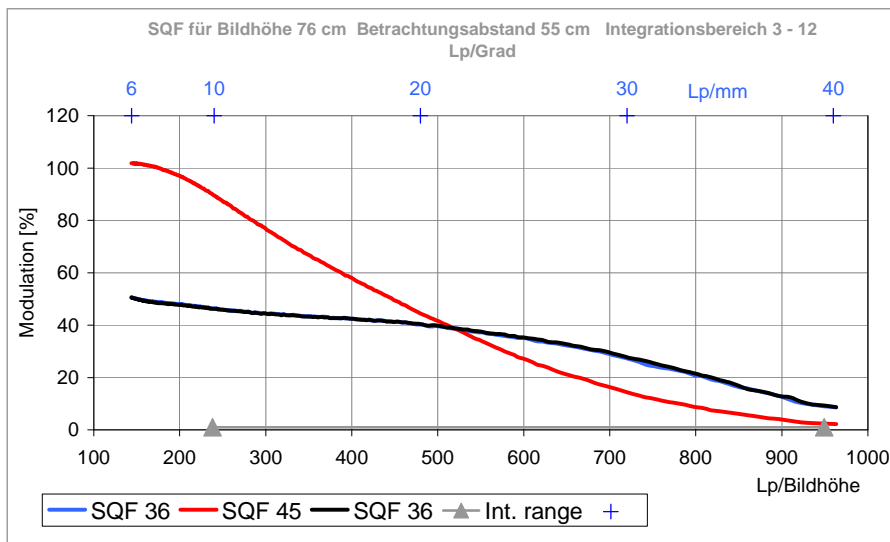
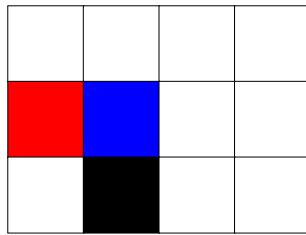
Diese Tabelle zeigt, welche Ortsfrequenzen in Lp/mm dem auf den Sehwinkel bezogenen Bereich **3-12 Lp/Grad** entsprechen, der bei der SQF-Berechnung berücksichtigt wird. Sie hängen natürlich ab von der Größe des Sensors, von der Größe des betrachteten Bildes und vom Betrachtungsabstand.

Die letzten beiden Zahlen kann man zusammenfassen, indem man angibt, wie groß der Betrachtungsabstand im Vergleich zur Bilddiagonalen ist. Dieser wichtige Wert steht links in der ersten Spalte. Daneben in der zweiten und dritten Spalte stehen Beispiele für Bildgrößen und Entfernungen: grau unterlegt die in den SQF-Daten der Bildvergleiche angenommene Betrachtung eines 12MP-Bildes in 100%-Ansicht an einem 21“-Monitor, in der vorletzten Zeile ein Postkartenbild, in der letzten Zeile ein Projektionsbild, das aus Projektorentfernung betrachtet wird (Kleinbildprojektor f=90mm).

In den rechten Spalten sind für fünf verschiedene Sensorformate die für SQF wichtigen Ortsfrequenzbereiche angegeben.

Das **maximale Auflösungsvermögen des Auges** ist ca. **3x größer** als der obere Wert jedes Bereiches. (Zahlen gerundet)

## Vergleich 2



*Beispiele für Bilder, die auf unterschiedliche Weise „schlecht“ sind: unscharf aber doch kontrastreich oder (teilweise) recht scharf aber kontrastarm.*

Hier haben die Bilder im blauen und im schwarzen Feld völlig identische MTF-Kurven und sehen trotzdem verschieden aus! Wie kann das sein? Nun, beim Bild im blauen Feld wurde in der Nachbearbeitung die Gradation steiler gemacht. Dadurch wird das Bild kontrastreicher – das hat aber keinen Einfluss auf die MTF-Werte, weil diese auf den Kontrast bei sehr niedriger Ortsfrequenz bezogen werden. Den Kontrast bei Ortsfrequenz Null setzt man immer als 100% fest.

Die MTF-Kurve beschreibt also die Änderung im Vergleich zu diesem Bezugswert, sie misst nicht den absoluten Bildkontrast. Aus dem gleichen Grund berücksichtigt die MTF-Messung auch keine Kontrastverschlechterung durch Falschlicht.

Steilheit und Verlauf der **Gradationskurve** und auch die **Farbsättigung** beeinflussen ebenfalls unseren subjektiven Bild-eindruck.

Natürlich ist die steilere Gradation kein Allheilmittel, um Mängel der Kontrastübertragung auszugleichen, denn die steile Gradation verringert natürlich den darstellbaren Helligkeitsumfang. Wenn ein Motiv durch die Beleuchtung (Sonne und Schatten) sehr große Helligkeitsunterschiede aufweist, kann man den Trick nicht anwenden.

Im Vergleich zur roten Kurve verlaufen die blaue und schwarze sehr flach und zeichnen sich durch sehr niedrige Werte bei niedrigen Ortsfrequenzen aus.

Dieser Kurventyp steht für ein eher flau aussehendes Bild mit auffälligen Überstrahlungen an kontrastreichen Kanten. Das ist besonders gut an den Spitzlichtern auf den glänzenden Chromteilen der Kamera zu sehen. Dunkle Details in heller Umgebung sind stark aufgehellt. Die Kantenschärfe ist hingegen überraschend gut, die Lesbarkeit von Schrift ist deutlich besser als beim roten Beispiel.

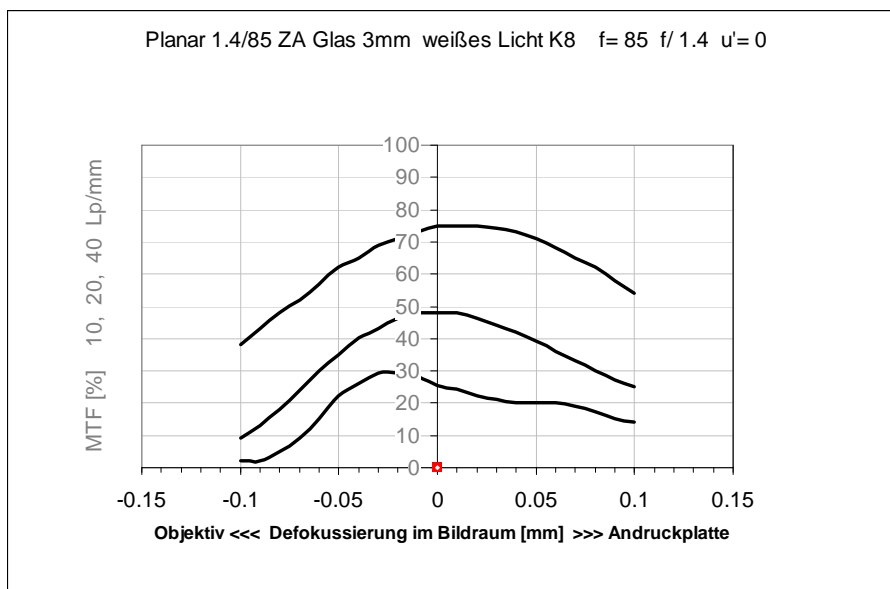
Wir sehen hier Bilder, deren Übertragungsfunktionen auf unterschiedliche Weise ungünstig sind. Eine von hohen Werten bei niedrigen Ortsfrequenzen schnell abfallende Kurve steht für ein Bild mit schlechter Kantenschärfe. Diesen Mangel bemerkt man aber kaum, wenn das Bild sehr klein ist, oder wenn man es aus sehr großer Entfernung betrachtet.

Eine flache MTF-Kurve steht dagegen für gute Kantenschärfe. Wenn sie allerdings überall und insbesondere auch bei den niedrigen Frequenzen recht kleine Werte hat, dann erkennen wir daran, dass das Punktbild aus einem schlanken Kern und einem recht ausgedehnten Halo um diesen Kern herum besteht (vgl. Teil I, S. 15). Das Bild ist dann flau, wie mit einer Art Schleier überdeckt und es zeigt Überstrahlungen an kontrastreichen Kanten. Dieser Mangel ist schon bei kleinsten Bildgrößen sichtbar.

Die drei Beispiele sind so fotografiert worden, dass die typischen Effekte deutlich sichtbar werden. In schwächerer Form gibt es diesen unterschiedlichen Bildcharakter aber in vielen Objektiven, sogar an derselben Stelle im Bild:

Alle Objektive mit nicht vollständig korrigierter sphärischer Aberration - dazu darf man alle hoch geöffneten Fotoobjektive zählen, besonders im Nahbereich - haben vor und hinter der Fokusebene eine unterschiedliche Art von Unschärfe.

Objektive mit der als angenehmer empfundenen sphärischen Unterkorrektur haben im Hintergrund eine flache und im Vordergrund eine steilere MTF-Kurve. Dies ist an der folgenden Fokus-MTF Kurve des Planar 1.4/85 ZA zu erkennen:



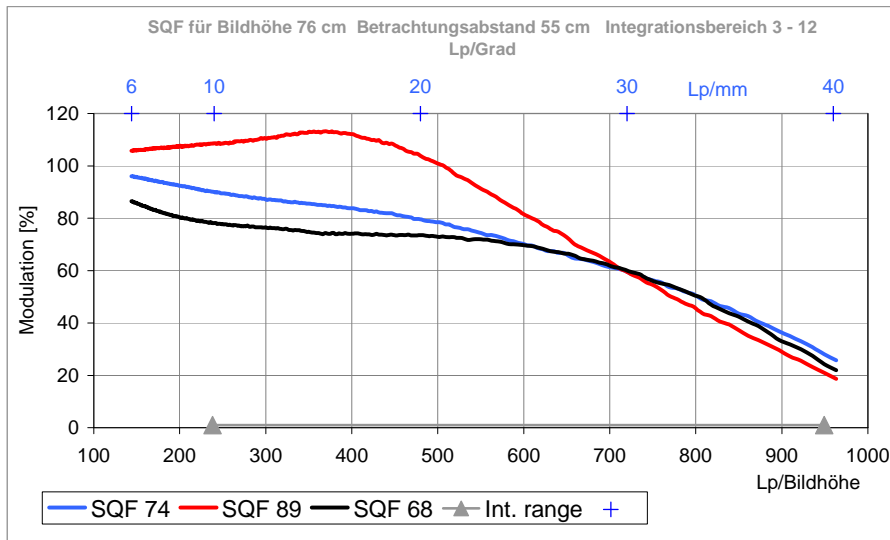
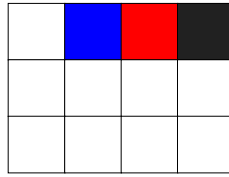
*Schiefe Fokus-MTF Kurve eines bei voller Öffnung sphärisch unterkorrigierten Objektivs. Die Werte für positive Defokussierung beschreiben die Wiedergabe für Objekte hinter der Fokusebene. Die Werte für negative Defokussierung gelten für den Vordergrund.*

*Die Fokusreihe eines Katalogbildes des ersten Planars von 1897 kann das illustrieren: links Vordergrund, Mitte bester Fokus, rechts Hintergrund. Bei gleicher Defokussierung ist die Kantenschärfe im Hintergrund besser. Gleichzeitig sehen Sie das durch die chromatische Längsaberration verursachte sekundäre Spektrum, die rötlichen Farben im Vordergrund und die grünlichen im Hintergrund.*

Laden Sie dazu bitte das

**Bild\_04** Dateigröße 1.3 MB

## Vergleich 3



### Drei Übertragungsfunktionen mit gleichem MTF50-Wert und gleicher Auflösung

Diese Gruppe von Bildern und MTF-Kurven zeigt uns, dass alle Versuche, Bildqualität mit einfachen Zahlen zu beschreiben, immer wieder an Grenzen stoßen und mit Vorsicht zu betrachten sind:

Oft wird der Parameter **MTF50** als Maß für Bildschärfe verwendet; das ist genau die Ortsfrequenz, bei der die Kontrastübertragung gerade 50% beträgt. Bei diesen drei Kurven liegt der MTF50-Wert zwischen 760 und 800 Lp/Bildhöhe und ist damit praktisch identisch – Sie sehen aber in den Bildern, dass die Schärfe keineswegs gleich ist.

Wenn wir das **Auflösungsvermögen** so definieren, dass dort 10% Modulation gerade unterschritten wird, dann dürfte auch diese Zahl in den drei Bildern gleich sein. Trotzdem ist der Schärfeeindruck aus der Nähe betrachtet beim roten Bild am schlechtesten. Warum ist das so?

Der subjektive Schärfeeindruck hängt bei den meisten Bildinhalten von der **Kantenschärfe** ab, und die ist hoch, wenn

die Kurven flach sind. Die rote Kurve zeigt aber im wichtigen Ortsfrequenzbereich die größte Änderung und deshalb die geringste Kantenschärfe. Nur wenn die steiler abfallende Kurve gleichzeitig nach rechts zu höheren Frequenzen verschoben ist, sieht ihr Bild schärfer aus.

Der Qualitätsparameter **SQF** ist bei der roten Kurve am größten. Auch dieses Qualitätsurteil deckt sich aber nicht in allen Fällen mit unserem Empfinden. Die einfache Formel „je höher desto besser“ gilt nicht immer.

Sicher werden Sie bei allen Motiven mit vielen scharfen Kanten eines der anderen beiden Beispiel bevorzugen. Nur die Holzstruktur mit ihren ohnehin weichen Kanten profitiert im roten Bild vom hohen Kontrast bei niedrigen Ortsfrequenzen. Und bei sehr großer Betrachtungsentfernung wird man wohl eher das rote Bild wegen seines brillanteren Eindrucks für besser halten.

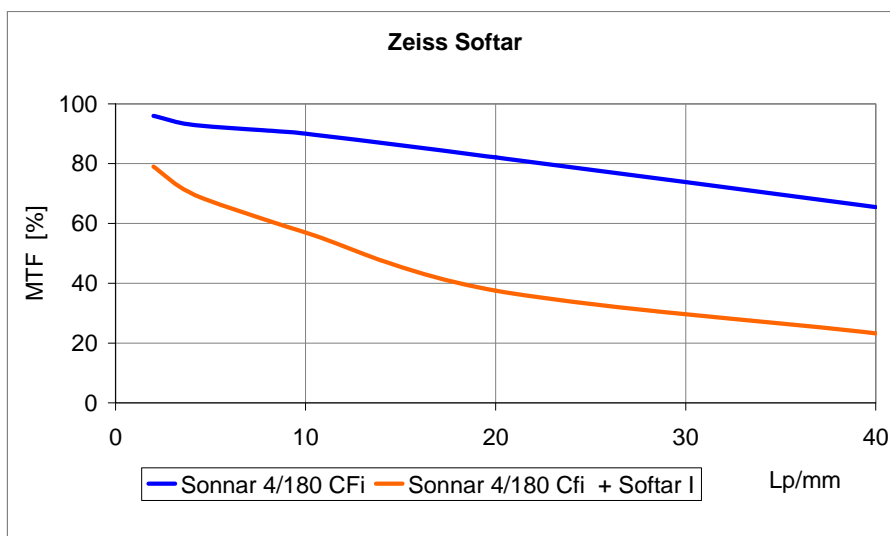
Schenken Sie also einfachen Zahlen kein übertriebenes Vertrauen! Selbst ein recht fundiert begründeter Parameter wie **SQF** ist nicht in der Lage, Bildeigenschaften differenziert zu beschreiben. Das ist im Grunde leicht einzusehen, weil ja die Fläche unter zwei ganz verschiedenen Kurven trotzdem gleich sein kann. SQF hat nur im statistischen Sinne eine gewisse Korrelation mit unserem subjektiven Urteil, kann aber im Einzelfall danebenliegen.

In unserem Beispiel ist die rote MTF-Kurve durch Nachbearbeitung erzeugt worden (Unschärf maskieren mit großem Radius hebt die niedrigen Frequenzen stark an). Solche Nachschärfung ist für großformatige Bilder ungünstig. Man findet sie oft in Kompaktkameras. Aus großer Entfernung, wenn das Auge nur die linke Seite der Kurve nutzt, wirken die Bilder gut, aus der Nähe betrachtet aber irgendwie unharmonisch.

Fernsehbilder auf modernen Monitoren haben auch oft diesen Charakter: sehr hoher Kontrast, aber plötzlich einsetzende Unschärfe, wenn man näher herangeht.

Aber auch rein analog treten solche Übertragungsfunktionen auf, wenn gut korrigierte Objektive defokussiert sind.

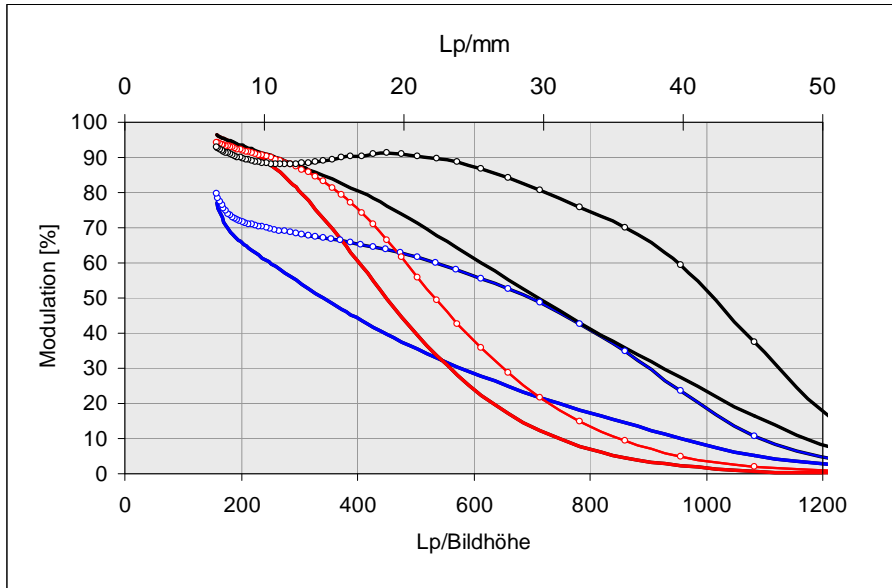
Einfache Zahlen und allzu simple Bewertungen in den Kategorien „je höher, desto mehr Punkte“ sind ohnehin in der bildmäßigen Fotografie nicht angebracht. Wenn der Fotograf eine bestimmte Bildidee hat und eine dazu passende Bildsprache benutzen möchte, dann muss er sich oft über alle Qualitätszahlen hinwegsetzen. Ein klassisches Beispiel ist die Verwendung von **Weichzeichner-Vorsätzen** in der **Porträt-Fotografie**, die eine ungewollte Härte des Bildes beseitigen:



*Das Sonnar 4/180 für das 6x6-Format ist ein hervorragendes Objektiv, dessen scharfe und kontrastreiche Zeichnung allerdings nicht in allen Anwendungen erwünscht ist. Wenn man es mit einem **Softar** kombiniert, wird dem Punktbild ein Halo hinzugefügt. Dadurch wird in erster Linie die Kontrastübertragung bei allen Frequenzen verringert, eine gute Kantenschärfe bleibt erhalten (flache Kurve!)*

Solches Zubehör wie ein Softar kann natürlich in der digitalen Fotografie eventuell ersetzt werden durch Softwarelösungen – zufällig ein schönes Wortspiel. Denn so wie man ein Bild durch Rechnen schärfen kann, kann man es ebenso gut auch „weicher“ machen.

Aber nicht jeder Weichzeichnungsfilter hat die gleichen Eigenschaften wie ein Softar. Das sehen wir, wenn wir die MTF-Kurven eines Softar-Bildes mit denen vergleichen, die durch einen Gauß'schen Weichzeichner erzeugt werden:



System-MTF Kurven aus digitalen Bilddateien, Makro-Planar 2/100 ZF an einer KB-Vollformatkamera. Die beiden **schwarzen** Kurven zeigen die Modulationsübertragung mit kleinem und mittlerem Schärfungsparameter für die von der Kamera erzeugten JPG-Dateien.

Die **blauen** Kurven erhält man, wenn man bei gleichen Kameraeinstellungen einen **Weichzeichnervorsatz Softar** am Objektiv verwendet. Wie bei der obigen optischen Messung am Sonnar 180 sehen wir auch hier, dass die Kontrastübertragung bei allen Ortsfrequenzen deutlich sinkt. Es entsteht eine tiefer liegende flache Kurve, von der wir folgende Bildmerkmale erwarten: weichere Bildwirkung durch reduzierten Kontrast, gute Kantenschärfe an Kanten mit geringem Kontrastumfang, Überstrahlungen an kontrastreichen Kanten (im Porträt typisch bei Haar im Gegenlicht)

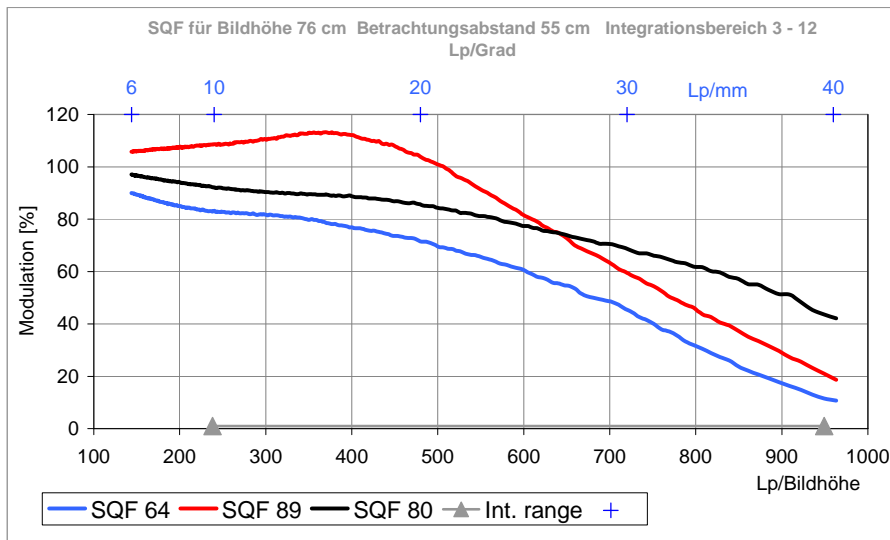
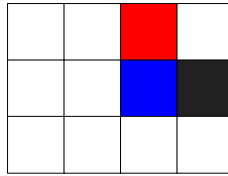
Die **roten** Kurven werden vom **Gauß'schen Weichzeichner** mit Pixelradius 1 in Photoshop erzeugt. Er lässt die niedrigen Ortsfrequenzen unverändert und senkt nur die Modulation bei hohen Frequenzen. Wir erhalten eine steil abfallende Kurve, und die Bildwirkung ist ganz anders als mit dem Softar, sehen Sie selbst:



**Bild\_05** Dateigröße 0.8 MB



## Vergleich 4



*Drei Bilder mit recht kleinen Unterschieden, das mit dem höchsten SQF ist aber mit Sicherheit nicht das schärfste Bild.*

Beim vorigen Beispiel Nr.3 könnte man vielleicht den Einwand machen, das zum roten Feld und der roten Kurve gehörende Bild habe bei den höchsten gemessenen Frequenzen die kleinsten Werte und sei deshalb weniger scharf.

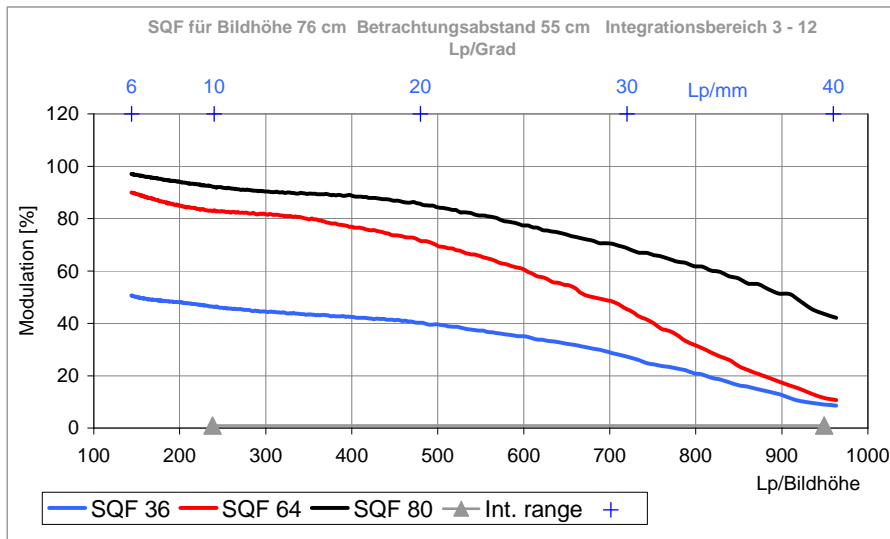
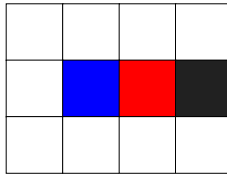
Deshalb vergleichen wir es hier noch einmal mit dem Bild darunter (blaues Feld), dessen MTF-Werte überall unter der roten Kurve liegen. Wir stellen aber fest, dass dieses Bild keineswegs weniger scharf aussieht.

Die kleinen Unterschiede bei hohen Frequenzen, die im Vergleich 3 vorliegen, sind also völlig bedeutungslos.

Im Vergleich 4 ist eindeutig das zum schwarzen Feld gehörende Bild das schärfste, und es wird sicher von den meisten Betrachtern als das Beste gewählt werden, obwohl sein SQF etwas kleiner ist als beim Bild des roten Feldes.

Die schwarze Kurve liefert die Kamera mit einem guten Objektiv und mittlerer Scharfzeichnung der Kamera-JPG-files, eine insgesamt recht ausgewogene Darstellung.

## Vergleich 5



*Ein Beispiel mit geringem Kontrast und Überstrahlungen, aber guter Kantenschärfe, ein Beispiel mit besserem Kontrast aber geringerer Kantenschärfe, und ein Bild, wo beide Eigenschaften gut sind.*

Die blaue und die schwarze Kurve sind fast parallel zueinander, die Änderung der Modulation mit steigender Ortsfrequenz ist also ungefähr gleich groß in demselben Frequenzbereich. Deshalb dürfen wir erwarten, dass die Bilder eine ähnliche Kantenschärfe aufweisen.

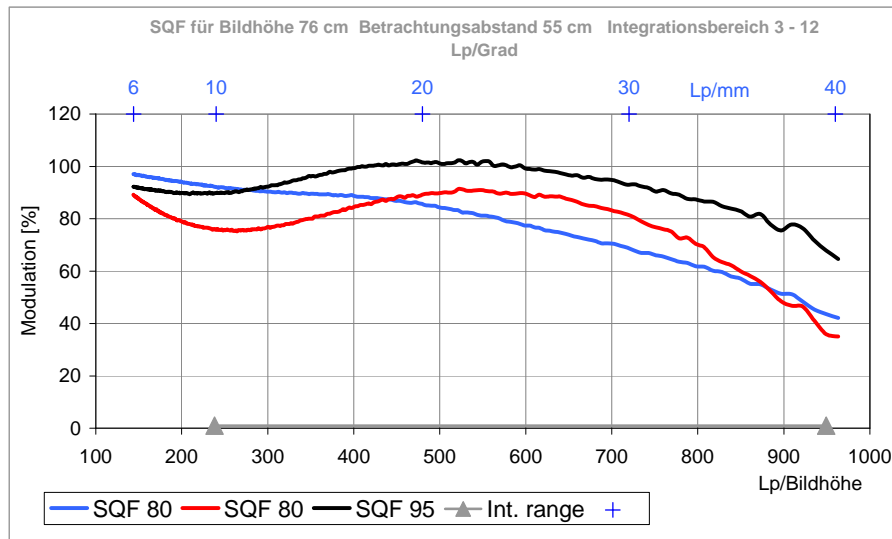
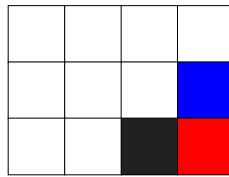
Das Bild der schwarzen Kurve zeigt aber, dass es zusätzlich auch noch darauf ankommt, wie hoch die flach verlaufende Kurve liegt. Nur dann ist das Bild frei von Überstrahlungen an Spitzlichtern, nur dann werden feine dunkle Strukturen in heller Umgebung dunkel und kontrastreich wiedergegeben. Das kann man gut an den Bücherrücken sehen. Und nur dann sind die Konturen heller Flächen sauber begrenzt.

Die rote Kurve ist stärker geneigt, deshalb ist die Kantenschärfe des zugehörigen Bildes nicht so gut wie bei den anderen beiden.

Wenn man aber diese drei Bilder aus großer Entfernung betrachtet, wenn also für das Auge nur noch der linke Teil der Kurven wirksam wird, wo auch die rote Kurve flach verläuft, dann kann man zwischen rotem und schwarzem Bild kaum noch einen Unterschied sehen.

Die besonderen Eigenschaften des blauen Bildes bleiben allerdings auch bei sehr großer Entfernung vom Monitor sichtbar. Gute Werte bei niedrigen Ortsfrequenzen sind also schon für kleine Bilder wichtig.

## Vergleich 6



### Zwei Bilder mit sehr hoher Qualität und eins mit Schwächen

Nun sind wir schließlich in der Ecke der Top-Qualitäten angekommen. Die Bilder der blauen und schwarzen Kurve werden von der Kamera in mittlerer und hoher Einstellung der Schärfung erzeugt. Beide sind flach verlaufende Kurven, und die Bilder bewirken einen ausgezeichneten Schärfeeindruck.

Beim Bild der schwarzen Kurve ist er noch einmal gesteigert, das ist z.B. deutlich in der Lederstruktur der Kamera sichtbar. Diese hohe Modulation bei den sehr feinen Strukturen kann manchmal schon etwas aggressiv wirken. Außerdem sieht man deutliche Schärfungsartefakte: dunkle Strukturen sind mit einem hellen Saum umgeben.

Die schwarze Kurve verrät uns diese Eigenschaft durch ihren Buckel, durch den Anstieg der Modulation zwischen 10 und 20 Lp/mm. Auch die rote Kurve hat so einen Buckel, verläuft auch im Mittel eher flach und liegt auf hohem Niveau. Und trotzdem sind wir mit dem Bild nicht ganz glücklich.

Wir sehen Überstrahlungen an den Chromteilen der Kamera, die Schrift auf den Bücherrücken ist kontrastarm, manche Partien wirken zu glatt.

Die rote Kurve sagt uns dies mit der deutlichen Senke bei 10 Lp/mm, wo die Modulation unter 80% fällt, während sie gleichzeitig bei den höheren Frequenzen verhältnismäßig hoch ist.

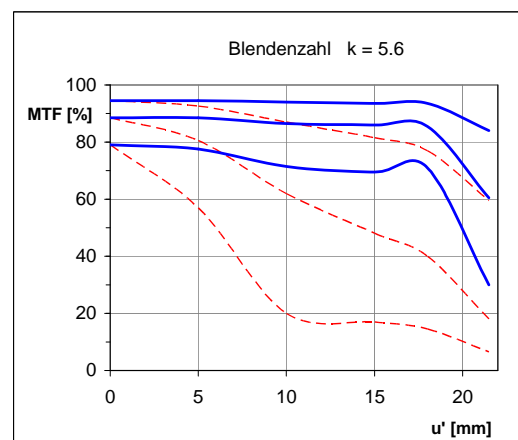
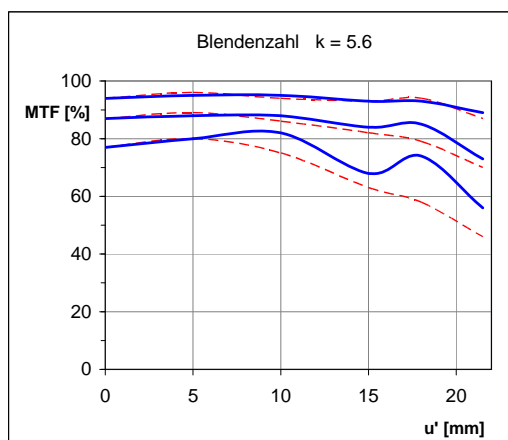
Dieses merkwürdige Bild hat folgende Ursachen: ein Objektiv mit hoher sphärischer Aberration, also ein Punktbild mit großem Halo, Kontrastanhebung im mittleren Frequenzbereich durch Unschärf Maskieren in der Nachbearbeitung. Die Nachbearbeitung kann aber die Schwächen des Objektivs nicht beseitigen.

Insgesamt zeigt dieses Beispiel, dass kleine Änderungen bei niedrigen Ortsfrequenzen eine viel größere Wirkung haben können als bei den hohen Ortsfrequenzen.

## Anmerkungen zur MTF- Messung mit Kameras

Mit Hilfe dieser Bildbeispiele mit ihren recht unterschiedlichen Eigenschaften konnte der technisch interessierte Leser sicherlich eine Menge über MTF-Kurven lernen, so dass er jetzt eigentlich in der Lage sein könnte, jedes Objektiv oder jedes System zu beurteilen – wenn es ein Problem nicht gäbe: die große Vielzahl **unterschiedlicher** Kurven vom gleichen Objektiv!

Was damit gemeint ist, möchte ich am Vergleich zweier Objektive erläutern, die jeweils rein optisch mit einem MTF-Messgerät und auch an einer 21MP-Kamera gemessen wurden. Das eine Objektiv ist ein **Zeiss Distagon 2.8/21**, das andere ein gutes Standardzoom mit seiner kürzesten Brennweite 24 mm. Sehen Sie zunächst die optische MTF-Messung mit weißem Licht:

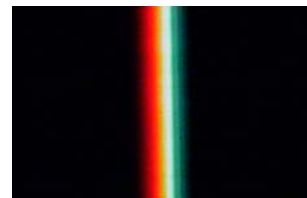
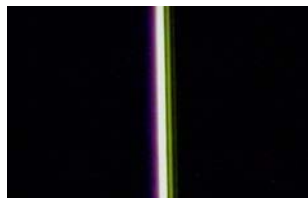


MTF im weißen Licht bei 10, 20 und 40 Lp/mm, aufgetragen über der Bildhöhe, blaue, durchgezogene Linien für sagittale, rote, gestrichelte Linien für tangentiale Spaltorientierung.

Links: **Distagon 2.8/21 f/5.6**

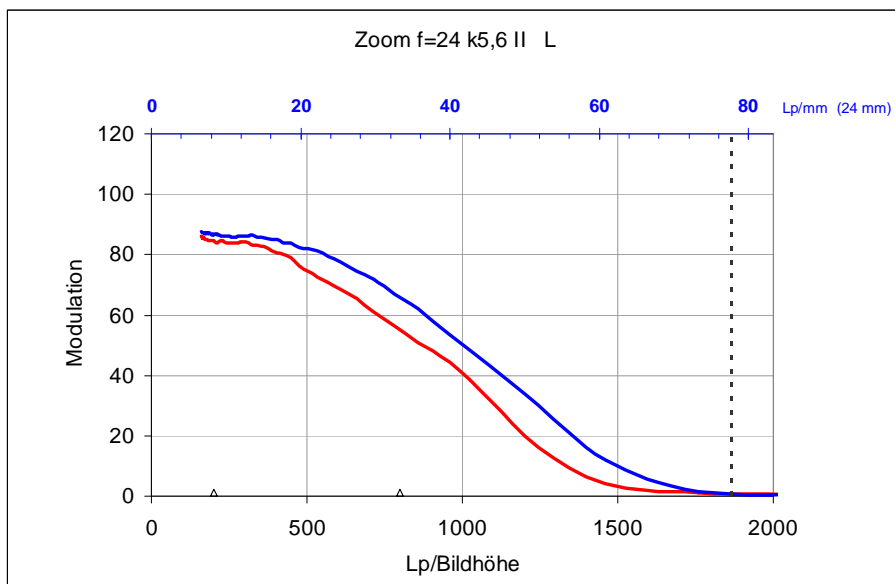
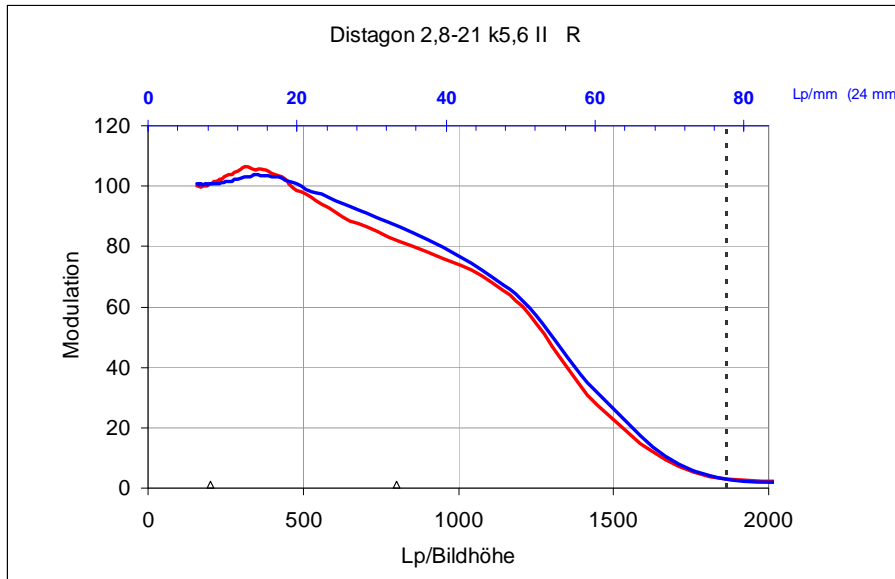
Rechts: **Standardzoom f=24mm f/5.6**

Der auffällige Unterschied besteht darin, dass bei dem Zoomobjektiv die tangentialen Werte im Bildfeld, z.B. bei 15mm Bildhöhe, viel niedriger sind. Die Ursache dafür sieht man im tangentialen Linienbild, es zeigt beim Zoom einen großen Farbquerfehler:



Beurteilt man die gleichen Objektive mit einer **System-Messung**, also aus der Bilddatei einer digitalen Kamera, dann findet man den bei der optischen Messung den auffälligen großen Unterschied zwischen tangential und sagittal nicht wieder. Woran liegt das, und welche Messung ist die richtige?

Weil diese System-Messung geringe Ortsauflösung hat, also plötzliche Änderungen mit der Position im Bild, z.B. zwischen Rand und Ecke, nicht erfassen kann, erzeugt sie keine MTF-Kurven über der Bildhöhe, sondern Kurven über der Ortsfrequenz. Die folgenden Kurven gelten für die Bildhöhe 15mm:



Die Werte aus der optischen Messung finden wir hier nicht so recht wieder, wenn wir z.B. bei 40 Lp/mm und Bildhöhe 15mm vergleichen. Nun wissen wir zwar, dass Tiefpassfilter und Schärfung die Kurven verbiegen, aber die Relationen stimmen einfach nicht: was vorher gleich groß war, ist jetzt verschieden, was bei einem Objektiv sehr unterschiedlich war, ist jetzt fast gleich.

Eine ganze Reihe von Ursachen ist dafür verantwortlich:

MTF ändert sich mit dem Abbildungsmaßstab, die optische Messung war für weit entfernte Gegenstände, die Kameramessung bei 1m Entfernung.

Die optische Messung kann die Wirkung des Tiefpassfilters und der Rekonstruktion des Bildes aus den Daten der Bayer-Matrix nicht berücksichtigen. Man könnte also auf den ersten Blick glauben, dass die Messung mit der Kamera näher an der Wahrheit ist.

Leider haben aber auch die üblichen Kameramessungen ihre Schwächen. Sie benutzen in der Regel das aus den RGB-Intensitäten berechnete so genannte **Luminanzsignal**. Es steht für unsere Helligkeitsempfindung, und deshalb hat der Grün-Anteil mit Abstand das größte Gewicht. Rotes und vor allem blaues Licht werden viel weniger berücksichtigt. Denn für blaues Licht sind unsere Augen viel unempfindlicher, weniger als 10% unserer farbempfindlichen Sehzellen in der Retina sehen blaues Licht.

Wegen dieses Luminanzsignals ist die **spektrale Bewertung** der MTF-Messung mit Kameras **sehr gutmütig**, nämlich viel stärker grünbetont als bei der optischen Messung.

Durch diese „grüne Brille“ sieht die Messung mit der Kamera das breite, bunte Linienbild des Zoomobjektivs mit dem größeren Farbquerfehler natürlich viel schmaler. Der große Unterschied tangential zu sagittal schrumpft.

Aber entspricht das nicht genau dem, was wir sehen, wenn die Luminanz an der Farbempfindlichkeit unseres Auges orientiert ist? Leider stimmt das nur in den Situationen, wo unser **Farbsehen** von untergeordneter Bedeutung ist und das reine **Helligkeitssehen** dominiert. Das ist dann der Fall, wenn wir Bildstrukturen unter kleinen Seh winkeln sehen, weil das Farbsehen eine geringere Ortsauflösung hat.

Gehen wir näher ran an das Bild, dann sehen wir sehr wohl die Farbsäume des Zoomobjektivs, und wir sehen, dass das Bild des Distagon 21 viel besser ist.

**Bild\_06** Dateigröße 0.4 MB

Oben Labor- und Praxisbild mit dem Zoom bei Bildhöhe 15mm,

unten die Vergleichsbilder mit dem **Distagon 2.8/21**.

Das freut uns, denn wir haben ja in dieses Objektiv besonders viel Aufwand gesteckt, um die **laterale chromatische Aberration** für ein Retrofokus-Objektiv ungewöhnlich klein zu machen. Die Kamera-Messung sieht aber diese Qualitätsunterschiede in Bezug auf die Farbe nicht so recht.

Die MTF-Messung aus Kameradaten erlaubt also wegen der Farbschwäche leider keine vollständige Beurteilung des Korrektionszustandes.

## 24 Megapixel

Diese große Pixelzahl im Kleinbildformat 24x36mm ist zurzeit ein vieldiskutiertes Thema. Lohnt sich so eine Kamera? Sehe ich wirklich einen Gewinn an Bildqualität, oder geht es hier nur um Prestige, „Pixelrace“? Ist die Optik überhaupt gut genug? Das sind die typischen Zweifel.

Auf der guten Internetseite *The Luminous Landscape* stellt ein Autor die Frage:

### **Do Sensors „Outresolve“ Lenses ?**

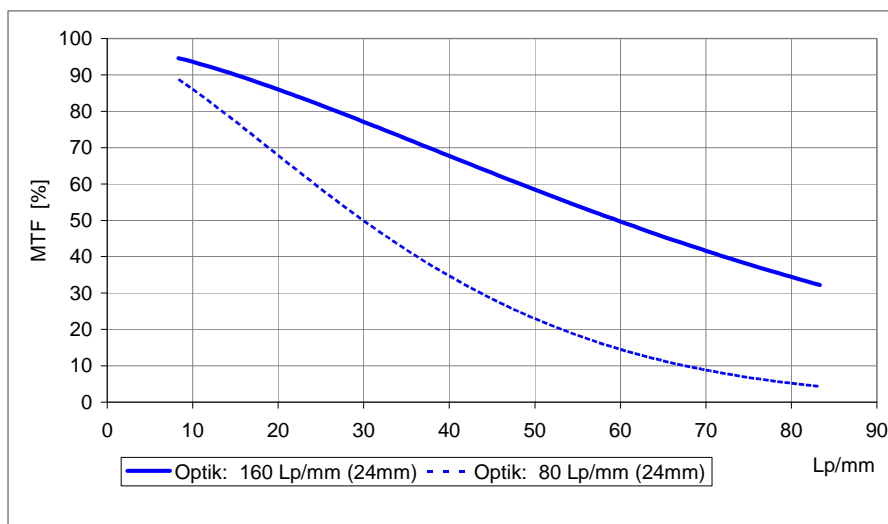
Und darauf man könnte in Abwandlung eines neuen geflügelten Wortes antworten:

**Yes, they can!** Denn heute sind die kleinsten Pixel um 1  $\mu\text{m}$  groß, und die verlangen Objektiv, die schon bei Blende 2.8 beugungsbegrenzt sind. Zum Glück haben diese Sensoren auch eine sehr kleine Fläche, und die Objektiv haben deshalb entsprechend kurze Brennweiten, gleichzeitig aber nur ganz normale Bildwinkel. Deshalb sind hohe Leistungen zu überraschend niedrigen Preisen möglich.

Man sollte aber den Aufwand in einem Objektiv für ein gutes Fotohandy nicht unterschätzen, vier Linsen mit acht asphärischen Flächen sind ganz normal. Und trotzdem kommt das Fotomodul ohne ein Tiefpassfilter aus, das ist sozusagen im Objektiv eingebaut, weil die Leistung des Sensors so dicht an physikalischen Grenzen der Optik liegt.

24 Megapixel auf einer erheblich größeren Fläche sind natürlich noch weit entfernt von dieser Situation, aber sie sind ein Schritt in dieselbe Richtung. Und es kann auch bei Optik für das Kleinbildformat passieren, dass in manchen Teilen des Bildes oder bei den ungünstigeren Blenden das Auflösungsvermögen des Sensors höher ist als das des Objektivs.

Wir möchten Ihnen aber jetzt zeigen, dass auch dann der 24MP-Sensor noch einen Gewinn an Bildqualität bieten kann im Vergleich zur halb so großen Pixelzahl. Das werden wir mit Hilfe unseres Wissens über MTF-Kurven leicht verstehen. Und Sie werden sich auch in Bildbeispielen von der Richtigkeit der Theorie überzeugen können.

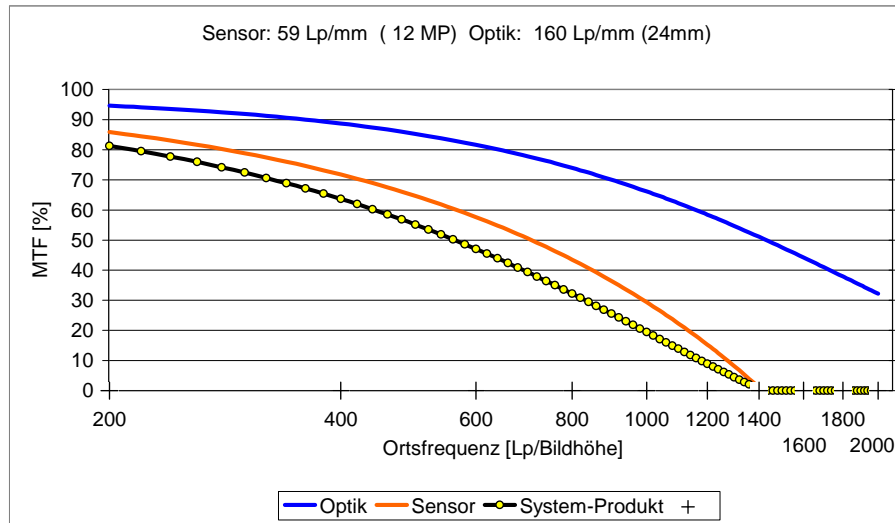


*Wir wollen zwei Objektive betrachten mit diesen Übertragungsfunktionen: eines ist beugungsbegrenzt bei Blende 8-11 und hat eine Auflösung von 160 Lp/mm, das andere hat stärkere Aberrationen und zeigt deshalb die typische durchhängende MTF-Kurve; seine Auflösung erreicht nur 80 Lp/mm und ist damit etwas kleiner als die des 24MP-Sensors. Dessen Nyquistfrequenz liegt bei 84 Lp/mm.*

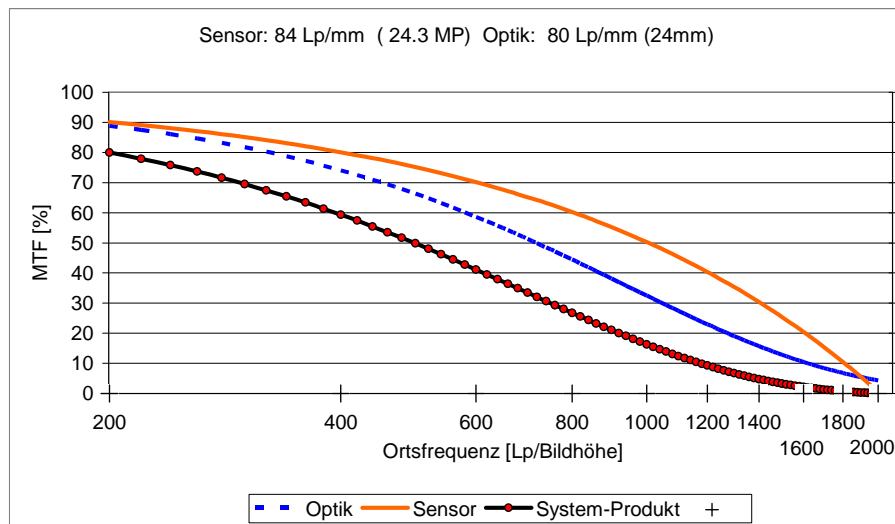
Wenn wir die Übertragungsfunktion des Systems Objektiv + Kamera ausrechnen wollen, dann müssen wir die beiden einzelnen MTF-Kurven miteinander multiplizieren, also z.B. in der folgenden Grafik bei 1000 Lp/Bildhöhe:

$$65\% \times 30\% = 20\%.$$

Für eine Kamera ohne Nachschärfung dürfen wir einfach annehmen, dass ihre MTF-Kurve bis zur Nyquistfrequenz linear, also als gerade Linie abfällt. Wir wollen die beiden Objektive jeweils mit einer 12MP und einer 24MP-Kamera kombinieren.



*Drei Modulationsübertragungsfunktionen: das obige gute Objektiv, eine 12MP-Kamera und das System-Produkt der beiden Kurven. Das Objektiv ist wesentlich besser als der 12MP-Sensor, deshalb ist die Produkt-Kurve überwiegend vom Sensor bestimmt – der ist hier das schwächste Glied in der Kette.*

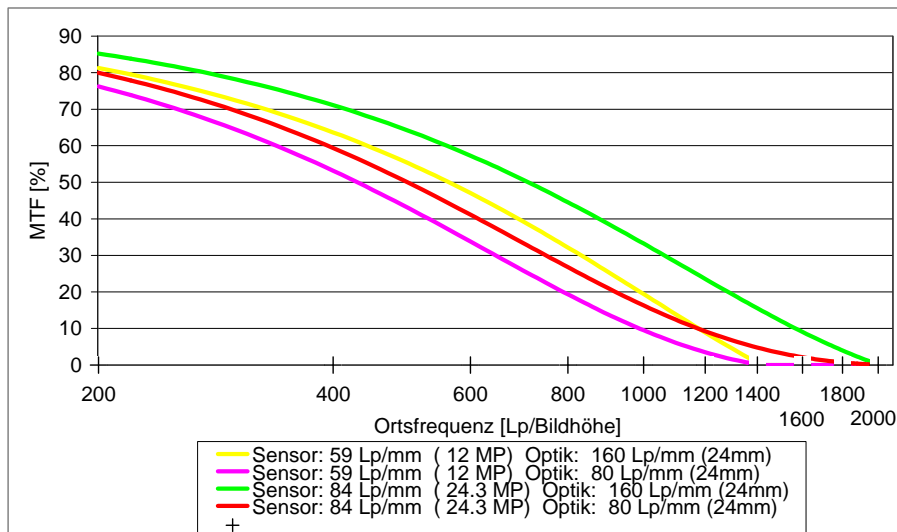


*Hier ist es umgekehrt: wir kombinieren jetzt das schlechtere der beiden Objektive mit der 24MP-Kamera. Das Objektiv ist schwächer als der Sensor, seine blaue Kurve liegt unter der des Sensors. Den Durchhang der MTF-Kurve des schlechteren Objektivs sehen wir hier nicht, und die Kurve des Sensors ist auch nicht gerade, weil wir hier eine logarithmische Ortsfrequenzskala benutzen, die besser zu unserer subjektiven Wahrnehmung passt.*



Wenn wir nur alle Produktkurven der vier möglichen Kombinationen in einer Grafik darstellen, und der besseren Übersichtlichkeit

wegen die anderen weglassen, erhalten wir folgendes Ergebnis für unser einfaches Modell:



*MTF-Kurven für die vier möglichen Kombinationen von zwei Kameras und zwei Objektiven mit jeweils unterschiedlichen Auflösungsgrenzen: 59 und 84 Lp/mm, bzw. 160 und 80 Lp/mm.*

Was können uns diese Kurven sagen, wenn wir uns dabei an das erinnern, was wir aus den Beispielbildern gelernt haben?

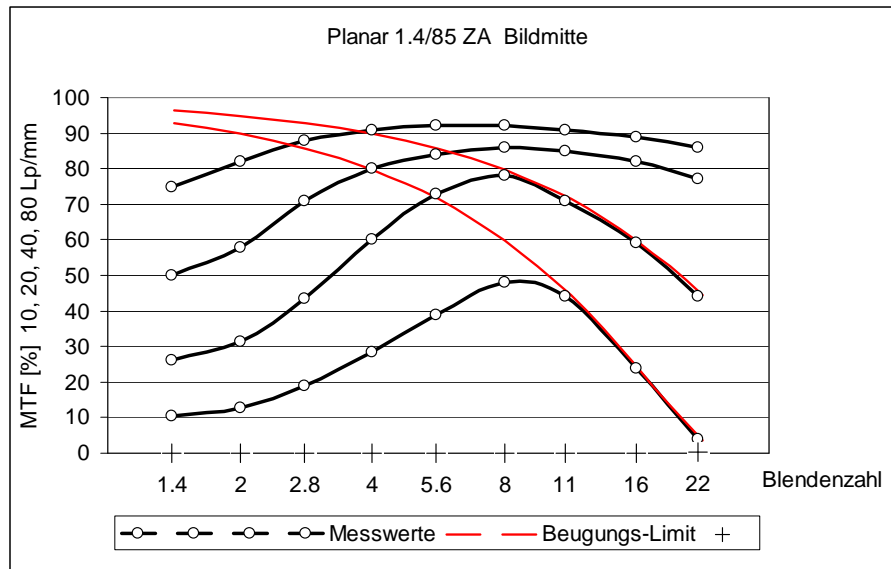
1. Bei Verdopplung der Pixelzahl wird die Übertragungsfunktion auch dann verbessert, wenn die Sensorauflösung besser ist als die des Objektivs.
2. Mit dem 24MP-Sensor ist die Kurve mit dem schlechten Objektiv fast so gut wie beim guten Objektiv mit dem 12MP-Sensor.
3. Wir erwarten, dass die Unterschiede zwischen 12 und 24 MP sichtbar sind, wir sehen aber auch, dass sie nicht überschätzt werden sollten (siehe **Vergleich 4**). Die Unterschiede sind nicht so groß, wie die Zahlen 12 und 24 suggerieren.

Die Sorge, dass heutige gute Objektive mit einem 24MP-Sensor generell überfordert sein könnten, scheint also etwas übertrieben zu sein. Natürlich nutzt man das volle Potential der großen Datenmenge nur mit einem sehr guten Objektiv. Aber auch außerhalb des besten Leistungsbereiches bei den optimalen Blenden und in der Bildmitte dürfen wir eine kleine Verbesserung der Bildqualität erwarten, vorausgesetzt, sie wird nicht mit zunehmendem Rauschen und Verlust an Dynamik erkauft.

Der Grund für eine zu pessimistische Einschätzung liegt in der falschen Vorstellung, dass die Bildqualität einzig durch die Auflösungsgrenze des Systems bestimmt sei und dass die identisch sei mit der Auflösung des schwächsten Gliedes der Kette. Das ist aber wegen der Multiplikation der Kurven nicht der Fall, bzw. nur bei krass schlechter Leistung der Optik.

Nun sollten wir aber überprüfen, ob die obige Modellrechnung nicht doch nur blasse Theorie war. Wir haben dazu unser schon vertrautes Testmotiv mit einem Objektiv **Planar 1.4/85 ZA** an der 24MP-Kamera fotografiert.

Dieses Objektiv haben wir gewählt, weil dieser Typ des hoch geöffneten kurzen Teleobjektivs eine große Variation der Leistung mit der eingestellten Blende aufweist:



MTF des Objektivs Planar 1.4/85 ZA bei 10, 20, 40 und 80 Lp/mm in Abhängigkeit von der Blendenzahl. Die optimale Blende ist f/8, bei kleineren Öffnungen ist das Objektiv dann beugungsbegrenzt. Die beugungstheoretischen Grenzwerte sind für 40 und 80 Lp/mm als rote Linien eingezeichnet. Die in der obigen Modellrechnung benutzten Übertragungsfunktionen entsprechen etwa der Leistung dieses Planars bei Blende 1.4 und 5.6.

Wenn wir die Modulationsübertragung im digitalen Bild messen, erwarten wir, dass wir diesen Charakter des Objektivs dort ebenfalls finden: es fängt bei voller Öffnung weich an, hat bei mittleren Blenden einen optimalen Bereich und wird jenseits von Blende 11 wieder schlechter.

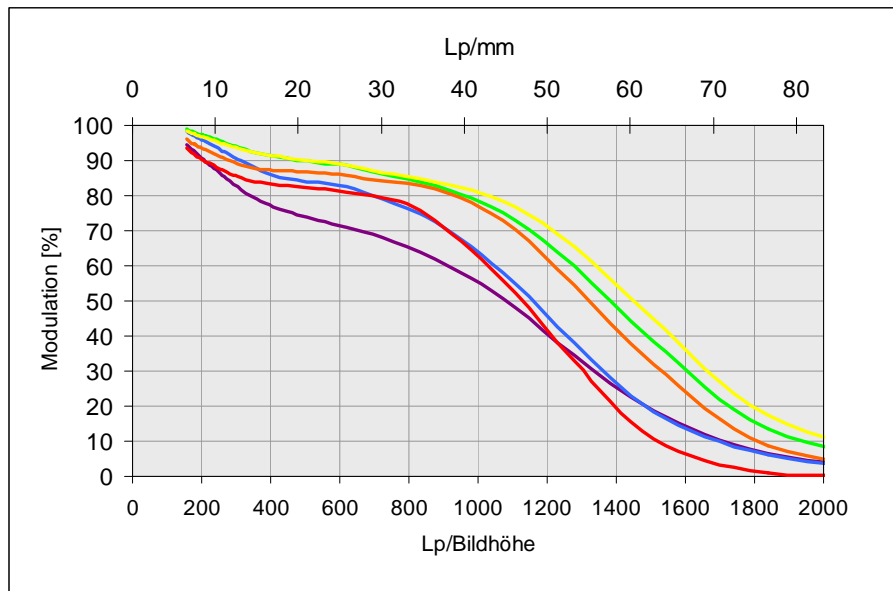
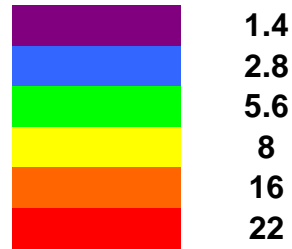
Die Kontrastunterschiede zwischen den Ortsfrequenzen werden natürlich durch die Wirkung des Tiefpassfilters und durch die Signalverarbeitung in der Kamera verändert, wir können also die optisch gemessenen Werte der obigen Grafik nicht 1:1 in den Systemkurven wieder finden, aber die genannten drei Bereiche sollten bestätigt werden.

Und das sehen Sie auch auf der folgenden Seite, wo über der Ortsfrequenz die Kurven für sechs verschiedene Blenden dargestellt sind.

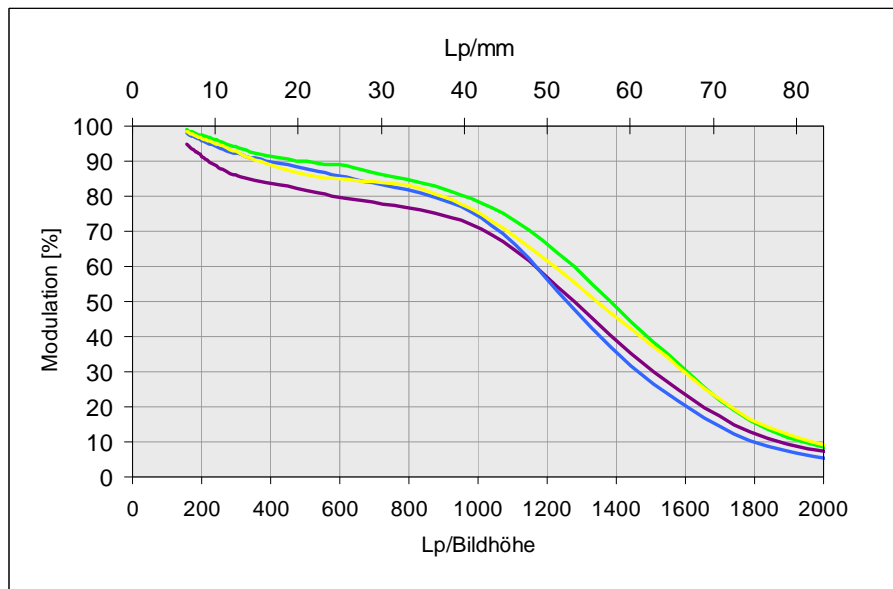
Bei voller Öffnung ist der Kontrast bei niedrigen Frequenzen bis 40 Lp/mm deutlich niedriger, dort steigert er sich bei Abblenden auf f/2.8. Wenn man weiter abblendet auf f/5.6, sieht man bei allen Frequenzen einen kräftigen Zuwachs. Blende 8 ist auch hier das Optimum (gelbe Kurve).

Die Kurve für Blende 16 liegt schon wieder etwas unter der für Blende 5.6. Und die für Blende 22 bricht besonders bei den hohen Ortsfrequenzen ein – das ist die Wirkung der Beugung.

In den folgenden Grafiken haben die Farben der Linien die Farben des Spektrums, und sie sind auch in der Reihenfolge zu lesen, jede Farbe steht für eine Blendenzahl:



*System-MTF des Planar 1.4/85 ZA an einer 24MP-Kamera, JPG, mittlere Schärfung, sechs verschiedene Blendenzahlen 1.4 .. 2.8 .. 5.6 .. 8 .. 16 .. 22.*



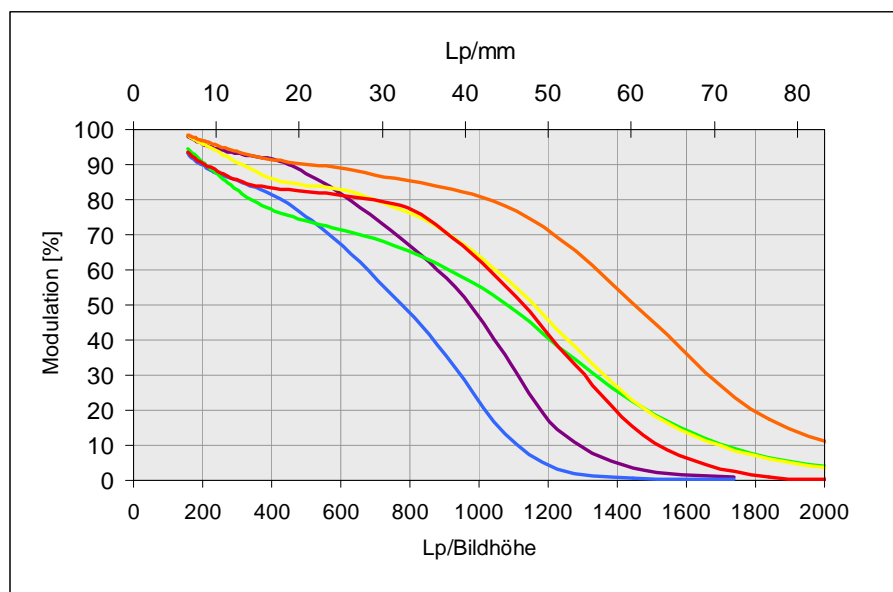
*Wenn man je nach Blende unterschiedliche Scharfzeichnungsparameter einstellt, kann man die optischen Unterschiede teilweise kompensieren und über einen weiten Blendenbereich sehr ähnliche Kontrastübertragung erzielen. Planar 1.4/85 ZA an 24MP-Kamera, Blenden 1.4 .. 2.8 ..5.6 und 8.*

Nun kommen wir zur spannenden Frage: wie schneiden die 24 MP mit verschiedenen optischen Leistungen im Vergleich zu 12 MP ab? Dazu vergleichen wir JPG-files von beiden Kameras jeweils bei mittlerer Schärfung.

An der 12MP-Kamera benutzen wir Blende 8 und Blende 22 mit dem Makro-Planar 2/100 ZF, also wieder eine mit Sicherheit optimale Leistung und eine durch Beugung reduzierte Auflösung.

Diese beiden vergleichen wir mit den großen Öffnungen, mit der optimalen Blende 8 und wieder mit Blende 22 des 85er Objektivs an der 24MP-Kamera.

	8	12 MP
	22	12 MP
	1.4	24 MP
	2.8	24 MP
	8	24 MP
	22	24 MP



*System-MTF für 12- und 24MP Kameras, JPG, mittlere Schärfung, Blenden gemäß obiger Farblegende.*

Dieser Vergleich geht bei allen Blenden deutlich zugunsten der 24MP-Kamera aus. Natürlich kann man einwenden, dass beide Kameras unter mittlerer Schärfung nicht das Gleiche verstehen müssen, und dass die Berechnung der JPG-files unterschiedlich ausgelegt sein kann. Tatsächlich sieht man, dass RAW-Dateien der 12MP-Kamera schärfere Bilder liefern als die Kamera-JPGs – aber diese Möglichkeiten gibt es prinzipiell bei 24 MP auch.

Es bleibt aber dabei, dass die Kombination jeder optischen Leistung mit einer Kamera mit höherer Grenzauflösung und mit einem dazu passend ausgelegten Tiefpassfilter die Übertragungsfunktion verbessert. Besonders interessant ist auch der Vergleich der beiden Kurven für die

**Blende 22**, wo ja die optische Auflösung bei beiden Kameras rein durch die Beugung limitiert ist und bei ca. 75 Lp/mm liegt, also deutlich unter der des 24MP-Sensors (rote und blaue Kurve). Der Auflösungsunterschied zwischen beiden Kameras bleibt bestehen.

*Eine ähnliche Erfahrung konnte man auch in der analogen Mikroskop-Fotografie machen: da ist man immer durch die Beugung begrenzt, und die besten Objektive haben bei Vergrößerung auf Kleinbildformat eine maximale Auflösung von 40-50 Lp/mm, also weniger als jeder Film. Trotzdem sahen Bilder, die auf größere Formate belichtet wurden, besser aus, weil dann der Film bis zur Auflösungsgrenze des Objektivs die bessere Modulationsübertragung hatte.*

Soweit die Ergebnisse der Labors, doch was sieht man in realen Bildern? Natürlich kann man diese Frage nicht mit einem einzigen Motiv umfassend und zuverlässig beantworten, aber wir müssen uns ja bei den Datenmengen etwas beschränken und haben deshalb wieder den schon vom Anfang bekannten 5x7mm großen Ausschnitt aus dem Kleinbildformat (840x1260 Pixel mit der 24MP-Kamera, 600x900 Pixel mit der 12MP-Kamera) mit verschiedenen Systemeigenschaften fotografiert.

Jeweils 4 Bilder sind in einer Datei kombiniert. Die Parameter jedes Teilbildes sind unten erläutert. Wir müssen gestehen, dass wir uns nicht allzu viel Mühe gegeben haben mit dem doch recht schwierigen Farbmanagement. Diese Unterschiede von Farbton und Sättigung und auch der Tonwertskala überlagern sich natürlich den Unterschieden, die durch die Kontrastübertragung bedingt sind. Das ist halt die Praxis.

Systembedingte unterschiedliche Ausgangsgrößen der Bilder (z.B. Analog-Scan und digital) wurden durch bikubische Spline-Interpolation auf die Größe der 24MP-Dateien umgerechnet, damit man leichter am Monitor vergleichen kann.

Die Teilbilder sind am unteren Rand nummeriert:

**Bild\_07** Dateigröße 1.7 MB Blendenreihe mit 1.4/85 an 24 MP

1. Blende 1.4
  2. Blende 2.8
  3. Blende 11
  4. Blende 22
- alle Aufnahmen mit mittlerer Schärfung

Sie sehen hier, wie sich die Bildqualität mit der Blende ändert, die Aufnahme mit Blende 11 ist zweifellos am besten. Aber die Unterschiede sind nicht so groß, wie die Messkurven suggerieren und wie manche ihrer Interpretationen uns einreden wollen. Bei voller Öffnung sieht man zusätzliche Farbeffekte, die durch MTF-Kurven gar nicht beschrieben werden.

Die geringeren Kontrastübertragungen bei Blende 1.4 kann man durch die Parameter der digitalen Bildverarbeitung zum Teil kompensieren, das ist im Bild\_08 zu sehen. Viele Probleme, die man in der Praxis mit Blende 1.4 hat, sind eher durch die geringe Schärfentiefe bedingt und durch die hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Fokussierung, als durch die geringere Leistung des Objektivs.

**Bild\_08** Dateigröße 1.9 MB

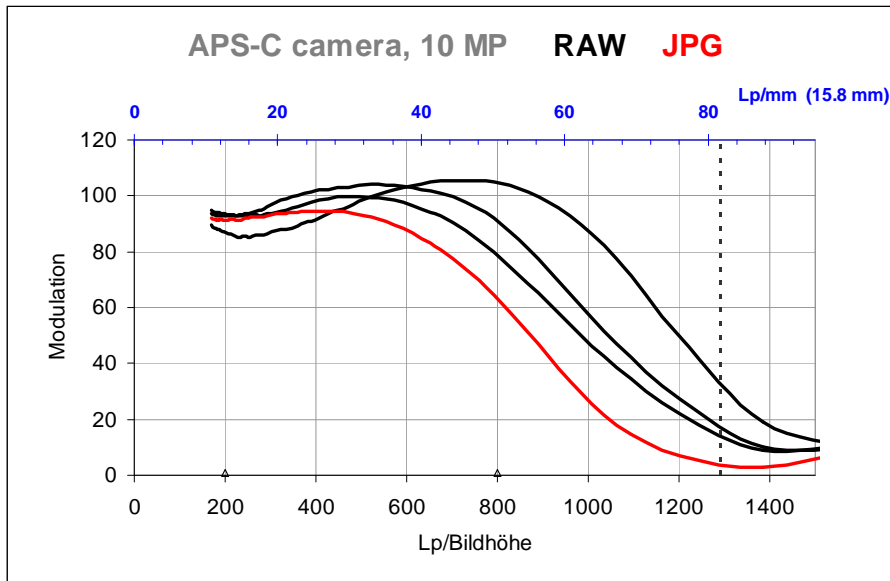
1. 24MP Blende 1.4, JPG mit höchster Schärfung
2. 24MP Blende 2.8, JPG mit hoher Schärfung
3. 12MP Blende 8, RAW
4. Analog, Diafilm ISO100, Format 6x7, Scan mit 4000 DPI

**Bild\_09** Dateigröße 1.8 MB

1. 24MP Blende 5.6, JPG mit mittlerer Schärfung
2. 12MP Blende 8, RAW (ACR)
3. 12MP Blende 8, RAW (ACR), hohe Farbsättigung
4. 12MP Blende 8, JPG mit mittlerer Schärfung

Diese weiteren Beispiele zeigen auch, wie unsicher die Unterscheidung von 12- und 24MP-Bildern sein kann, wenn man unterschiedliche Verarbeitungen der Bilddaten vergleicht.

RAW und Kamera-JPG können zu deutlich verschiedenen Ergebnissen von derselben Belichtung führen. Bei optimaler Verarbeitung kommt auch ein 12MP-Bild einem Scan von 6x7 recht nah.



Übertragungsfunktionen derselben digitalen Kamera mit unterschiedlicher Prozessierung der Daten. Die Kamera-JPGs (rote Kurve) sind in der Regel etwas zurückhaltender ausgelegt.

**Bild\_10** Dateigröße 2.6 MB

1. „Original“, Bild aus formatfüllender Aufnahme mit 24MP, auf 840x1260 Pixel reduziert. Das Bild zeigt also, welche Bildqualität mit dieser Pixelzahl möglich wäre, wenn die optischen Verluste durch Objektiv und Tiefpass nicht vorhanden wären.
2. Analog, Diafilm ISO100, Format 9x12, Scan mit 4000 DPI
3. Analog, Diafilm ISO100, Format 6x7, Scan mit 4000 DPI
4. Analog, Diafilm ISO100, Format 24x36, Scan mit 4000 DPI

Wenn Sie diese Scans von analogen Bildern mit dem „Original“ und den obigen digitalen Varianten vergleichen, werden Sie verstehen, warum die digitale Vollformat-KB-Kamera dem analogen Mittelformat Konkurrenz macht. Sie sehen aber auch, dass die Qualität noch größerer analoger Formate nicht erreicht wird. Man braucht also für manche Aufgaben noch weitaus bessere digitale Kameras.

Was die Unterschiede zwischen 12 und 24 MP angeht, so haben Sie sicher festgestellt, dass die sichtbaren Unterschiede oft überraschend klein sind. Das hängt aber auch vom Motiv ab, nicht bei jedem sind die Unterschiede bei hohen Ortsfrequenzen deutlich sichtbar, aber es gibt solche Motive – sehr feine Linienmuster sind der Prüfstein (und Alptraum) jeder Digitalkamera, die in den nächsten Bildbeispielen stammen aus einem Mikroskop-Katalog von 1906:

**Bild\_11** Dateigröße 3.1 MB 12 MP JPG

**Bild\_12** Dateigröße 4.2 MB 24 MP JPG

**Bild\_13** Dateigröße 1.1 MB Vergleich „Original“ – 24MP – 12MP

**Bild\_14** Dateigröße 0.4 MB Beugung mit APS-Kamera 14.6 MP

Wenn Sie „Original und Fälschung“ vergleichen, sehen Sie, dass die 24MP-Aufnahme zwar Auflösung suggeriert – aber die wirklichen Strukturen sehen anders aus.

Im Bild auf dem Sensor gemessen hat das Punktraster 50 Lp/mm, die Bilder der dünnen schwarzen Linien sind 5µm dick. Bei solchen Strukturen sind viele Artefakte zu erwarten und man wünscht sich noch viel mehr Pixel ...

## Wie misst man MTF, und wer hat das erfunden?

Wie auf den meisten Wissensgebieten beruht auch das Verständnis der Modulationsübertragungsfunktion auf den Ideen und Erkenntnissen vieler Köpfe, und wir können hier schon aus Platzgründen nur die wichtigsten Pioniere erwähnen oder ein paar populäre Namen in die Geschichte einordnen. Damit soll die Bedeutung der Leistungen vieler anderer keineswegs geschmälert werden.

Der erste Vorschlag, Bildqualität mit Hilfe von sinusförmigen Mustern zu messen, wurde **1936** von *Helmut Frieser* gemacht. Er war Mitarbeiter des Zeiss-Ikon Filmwerks in Berlin und hatte erkannt, dass periodische Sinusgitter die einzigen Muster sind, die bei jeder Art Bildverschlechterung nicht ihre Form ändern, sondern lediglich ihre Amplitude und Lage. Er hat auch schon erkannt, dass für beste Bildqualität sowohl die Abbildung grober als auch die Wiedergabe feiner Strukturen hinreichend gut sein müssen.

Seit der Erfindung des Fernsehens hatte Nachrichtentechnik natürlich auch sehr viel mit Bildern zu tun. Und deshalb war es dann ein nahe liegender Schritt, diese in der Nachrichtentechnik inzwischen geläufigen Begriffe auch auf die Optik anzuwenden und ein Objektiv in seiner Wirkung wie ein elektrisches Filter zu verstehen. Obwohl sie im Inneren ganz verschieden sind, lassen sie sich doch mit derselben Mathematik behandeln.

Sehr viele experimentelle Ergebnisse nach diesem neuen Konzept wurden ab **1948** von *Otto H. Schade* veröffentlicht, der ein Mitarbeiter von RCA Victor in Harrison, N.J. war, damals ein großer amerikanischer Hersteller von TV-Technik.

Diese Auffassung von Bildern als Kombination vieler sinusförmiger Komponenten wurde **1946** in einen erweiterten Zusammenhang gestellt von dem französischen Physiker *Pierre-Michelle Duffieux*. In seiner wegweisenden Arbeit „*L'integrale de Fourier et ses applications a l'optique*“ behandelte er auch die engen mathematischen Zusammenhänge mit den physikalischen Gesetzen der Wellenoptik. Teile davon hatte *Ernst Abbe* in Jena schon **1873** in seiner Theorie des Mikroskops beschrieben, die den Erfolg von Carl Zeiss begründete.

Das von Duffieux benutzte mathematische Handwerkszeug war aber noch viel älter: der Mathematiker und Physiker *Jean-Baptiste Fourier* lebte von **1768 bis 1830**.

Für viele von Duffieux auf die Optik angewandte Begriffe gibt es Analogien auf anderen Gebieten. Die wurden von den späten 20er Jahren an in der Nachrichtentechnik und Akustik entwickelt. Modulationsübertragungsfunktionen gibt es auch dort. Um noch einen auch Lesern von fototechnischer Literatur bekannten Namen zu nennen, der amerikanische Physiker *Harry Nyquist* veröffentlichte sein Abtasttheorem **1928**.

In den 1950er Jahren begann dann die optische Industrie, erste MTF-Messgeräte zu bauen, um damit Objektivqualität objektiv, d.h. unabhängig von einem menschlichen Urteil, messen zu können. Bis dahin hatte man außer der Projektion eines Testbildes mit dem Prüfling oder Testfotografie auch schon Laborinstrumente, die jeweils einzelne Aspekte der geometrisch-optischen Korrektur messen konnten. Wie die dann alle im fertigen Bildergebnis zusammenwirkten, war aber nicht so leicht zu beurteilen.

Die 60er und 70er Jahre waren dann gekennzeichnet durch Verfeinerung der Instrumente, die Entwicklung von Normen und durch die Entwicklung der Vorausberechnung von MTF in den optischen Rechenprogrammen zur Objektivoptimierung.

Bei den Messverfahren kann man drei Grundprinzipien unterscheiden:

## 1. Fourieranalyse

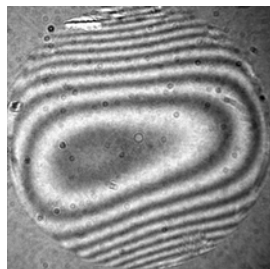
Man bildet periodische Streifenmuster ab und misst direkt im Bild die Intensitäten. Wenn das Muster sinusförmig ist, ist die Auswertung besonders einfach, weil man nur die Maxima und Minima messen muss und daraus unmittelbar die Modulation ausrechnen kann. Dies Verfahren wird angewandt bei der MTF-Messung aus den Daten digitaler Kameras. Das Ablesen der Intensitätswerte geschieht mit den Pixeln des Sensors.

Als es noch keine Pixel gab, hat man das Bildmuster mit einem feinen Spalt abgetastet, hat also sozusagen den Spalt über dem Muster verschoben und an vielen Stellen abgelesen, welche Intensität im Spalt zu sehen ist.

## 2. Fouriertransformation

Vieles in diesem Bereich der Optik hat mit Integralrechnung zu tun, was nicht überrascht, weil immer viele einzelne Energiebeiträge summiert werden müssen. Das Bild ergibt sich aus Gegenstand und Punktbild durch das Faltungintegral, die Beugung wird durch ähnliche Integrale beschrieben, und auch die Fouriertransformation ist eine auf vielen Gebieten wichtige Integral-transformation. Mit ihr kann man MTF aus der Intensitätsverteilung eines Punktes oder eines Linienbildes ausrechnen. Das ist mathematisch aufwändig und ist erst möglich seit es schnelle Rechner gibt. Damit man die Intensitätsverteilung einer Linie (eine Kante geht auch) genügend genau messen kann, muss man das Bild des Prüflings zunächst mit einem Mikroskop vergrößern.

Die Fouriertransformation kann auch auf Daten aus digitalen Bilddateien angewandt werden. Für diesen Zweck sind auf bekannten Testtafeln diese etwas geneigten schwarz-weißen Kanten zu sehen.



Aus diesem Streifenmuster kann man auch MTF berechnen.

Dieses Prinzip kann man auch umkehren: statt eines periodischen Musters kann der Prüfling auch den Spalt abbilden, und dessen Bild wird dann mit einem periodischen Muster abgetastet. Wenn sich das Muster schnell bewegt, erhält man von einem Lichtsensor dahinter ein moduliertes Signal. Die Fourieranalyse dieses Signals, also die Messung der Energie seiner Sinus-komponenten, liefert dann die MTF.

Dies ist das Grundprinzip der Zeiss MTF-Messgeräte. Sein Vorteil bestand früher darin, dass man die Fourieranalyse eines elektrischen Signals mit Filtern aus Spulen und Kondensatoren machen kann. Das ermöglichte die **Echtzeit-MTF-Messung** schon damals, als es noch keine schnellen Rechner gab. Nur bei schneller Messung konnte das Instrument für die Qualitätssicherung in der Fertigung eingesetzt werden. So ein Gerät misst die Bildqualität auf einem Kreis im Bild lückenlos in wenigen Sekunden – und das schon 1958.

## 3. Autokorrelation

In der Optik benutzt man verschiedene Vorstellungen über die Natur des Lichtes. In Objektiven können wir vieles mit Hilfe von Strahlen verstehen, die an den Linsenoberflächen gebrochen werden. Wir brauchen aber auch den Begriff der Welle, damit wir die Beugungsphänomene verstehen können.

Zwischen Wellen und Strahlen gibt es einen einfachen Zusammenhang: ein Strahl steht senkrecht auf einer Wellenfläche. Wenn man einen Stein ins Wasser wirft und kreisförmige Wellen breiten sich nach außen aus, dann zeigen die Strahlen alle zur Mitte der Kreise, wo der Stein ins Wasser fiel.

Wenn also bei Aberrationen Strahlen nicht alle in einem idealen Punkt ankommen, dann liegt das daran, dass die Wellenflächen deformiert sind. Im Idealfall wären sie kugelförmig. Deshalb kann man die Helligkeitsverteilung im Punktbild auch indirekt messen, indem man in der Pupille (=Blendenfläche) die Abweichung der Wellenfront von der Kugelform misst.

Das macht man mit einem **Interferometer**; aus dessen Streifenmuster ergibt sich die MTF durch das Autokorrelationsintegral (Duffieuxintegral). Sein Vorteil: es liefert detaillierte Informationen über die Art der Fehler. Sein Nachteil: das Interferometer arbeitet mit monochromatischem Laserlicht, liefert also keine MTF-Werte für die praktische Anwendung eines Fotoobjektivs. Wegen rechentechnischer Vorteile wird die Autokorrelation der Pupille gern in den Optikrechenprogrammen benutzt.