



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?**

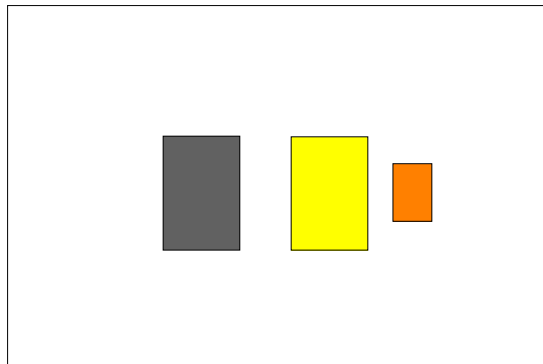
Wir haben dabei gesehen, welcher Zusammenhang besteht zwischen der Modulationsübertragung und der durch Aberrationen und Beugung bestimmten Gestalt der Punktbilder. Wir haben verschiedene graphische Darstellungen von MTF kennen gelernt: in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz, von der Bildhöhe oder von 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?**

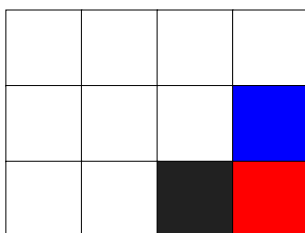
Dazu zeigen wir Ihnen drei verschiedene Motive, die jeweils mit zwölf verschiedenen Übertragungsfunktionen abgebildet wurden. Diese Bilder müssen Ihnen natürlich in genügend hoher Auflösung zur Verfügung stehen. Deshalb sind sie nicht in diesen Text eingefügt, sondern liegen als **Download-Files** auf 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

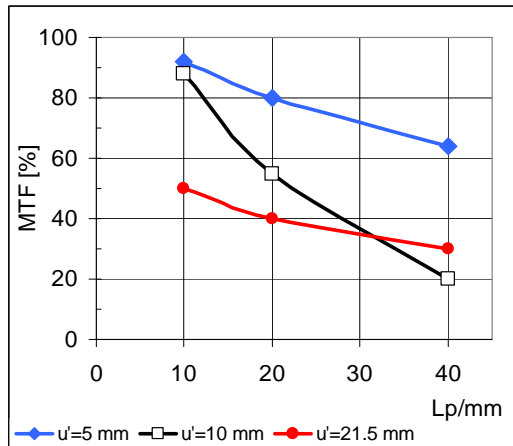
Die zwölf verschiedenen Ergebnisse eines Bildausschnitts haben wir in einem neuen Bild zusammengesetzt, so dass eine Art Schachbrett mit den zwölf verschiedenen Übertragungsfunktionen entsteht:



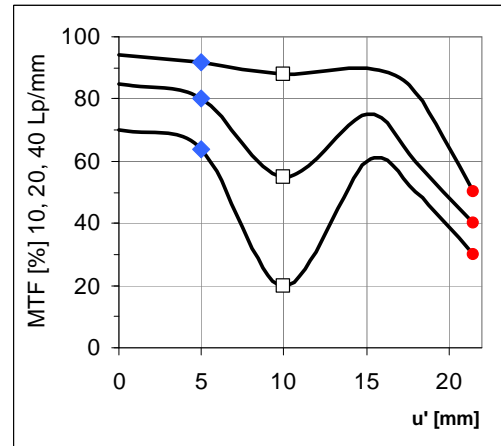
Dieses Mosaik mit drei Zeilen und vier Spalten ist eine Bilddatei. Wenn Sie das Bild mit einem geeigneten Programm betrachten (z.B. Photoshop), wollen wir jeweils drei Teilbilder miteinander vergleichen. Ihre Lage ist in einer Art Landkarte des Mosaiks farblich markiert.

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.

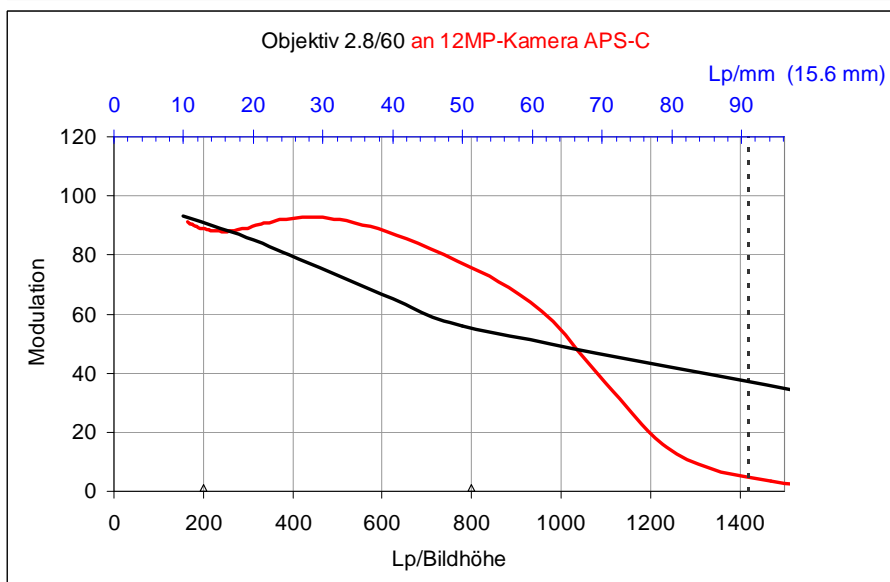
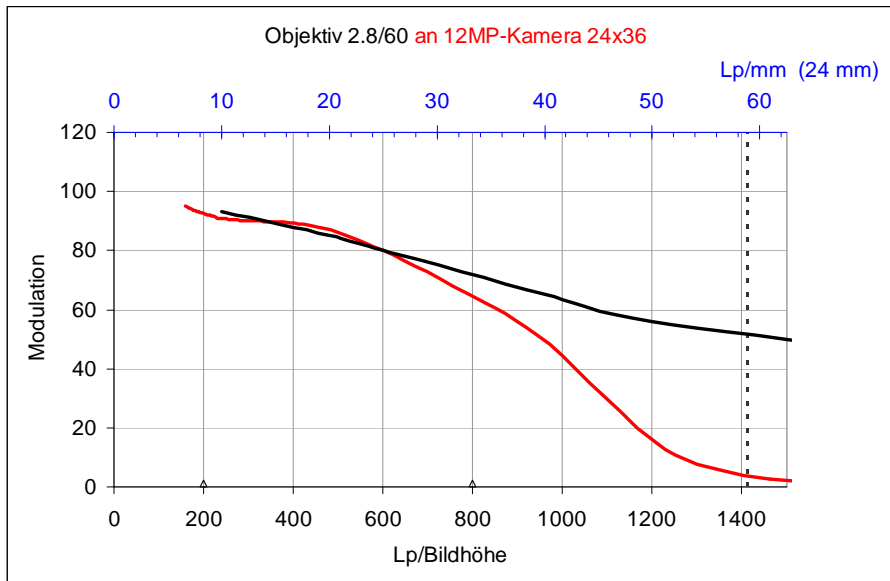
So gemessene MTF-Kurven können natürlich für das gleiche Objektiv unterschiedlich aussehen, wenn man dieses Objektiv an verschiedenen Kameras verwendet.

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.

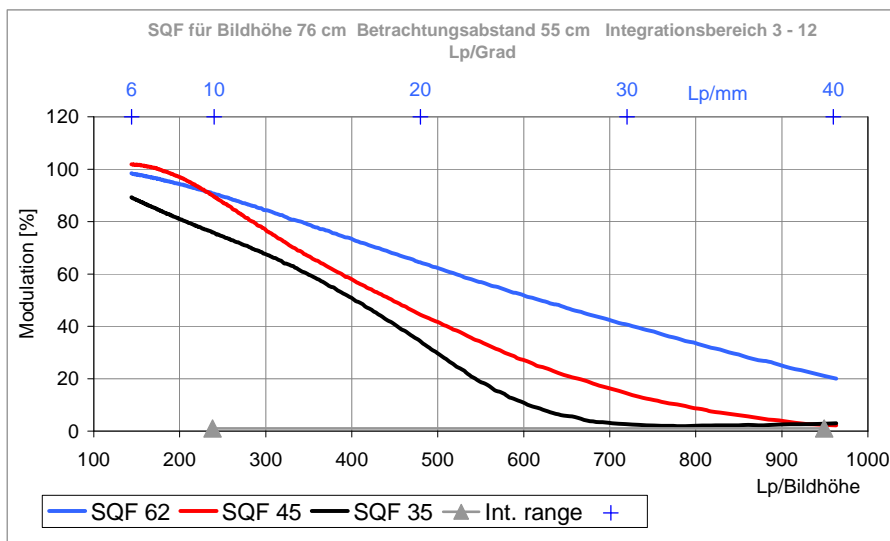
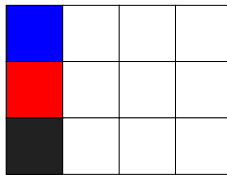
Wir werden jetzt jeweils drei, meist benachbarte Bilder miteinander vergleichen. Eine kleine „Landkarte“ zeigt Ihnen, wo diese Bilder liegen, und welche MTF-Kurve in diesem Bild gemessen wurde.

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.

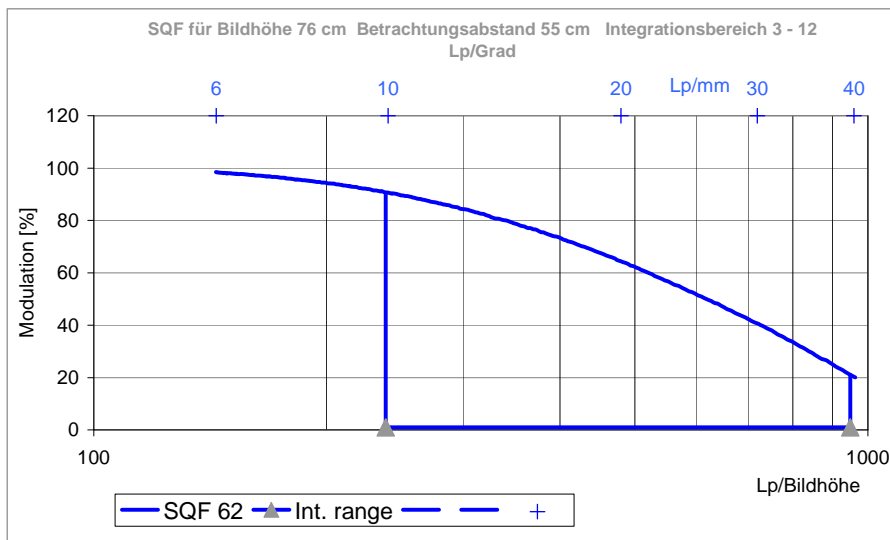
In zahlreichen Versuchen mit Testpersonen und vielen verschiedenen Bildern konnte man zeigen, dass ein ganz brauchbarer Zusammenhang besteht zwischen dem subjektiven Qualitätsurteil und der Fläche unter der MTF-Kurve.

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.

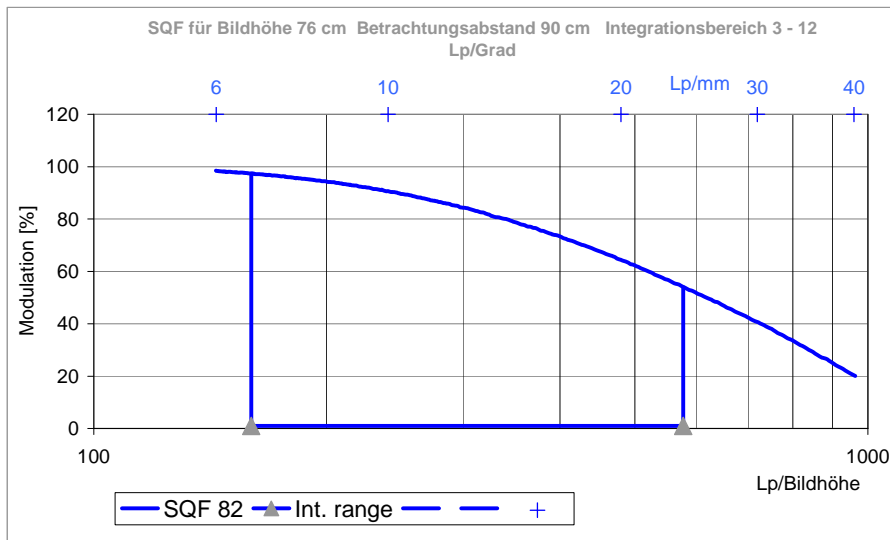


MTF-Kurve über logarithmischer Ortsfrequenz-Skala (gleiche Ortsfrequenz-Verhältnisse haben gleichen Abstand, der Abstand von 100 bis 200 Lp/Bildhöhe ist so groß wie der von 200 bis 400 Lp/Bildhöhe). Die Wahl der logarithmischen Skala gibt den niedrigen Ortsfrequenzen mehr Gewicht.

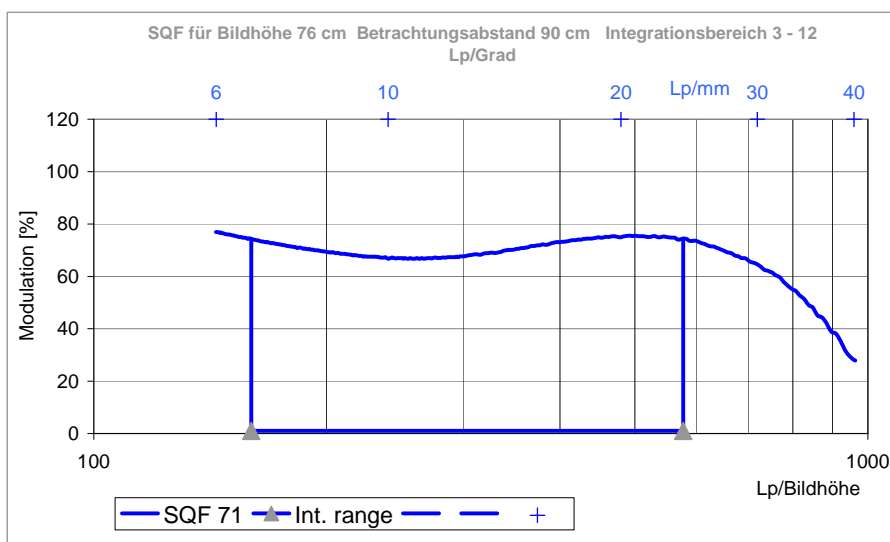
Die blau umrandete Fläche unter der Kurve ist der Qualitätsparameter SQF.

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

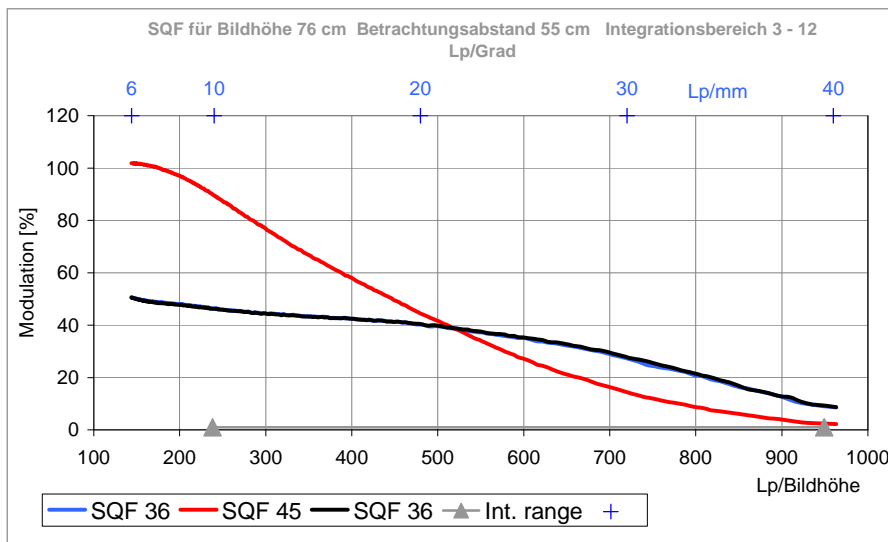
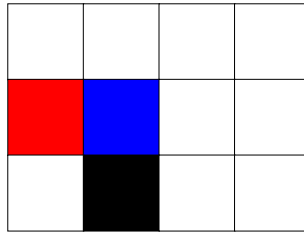
Diese Tabelle zeigt, welche Ortsfrequenzen in Lp/mm dem auf den Sehwinkel bezogenen Bereich **3-12 Lp/Grad** entsprechen, der bei der SQF-Berechnung berücksichtigt wird. Sie hängen natürlich ab von der Größe des Sensors, von der Größe des betrachteten Bildes und vom Betrachtungsabstand.

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.

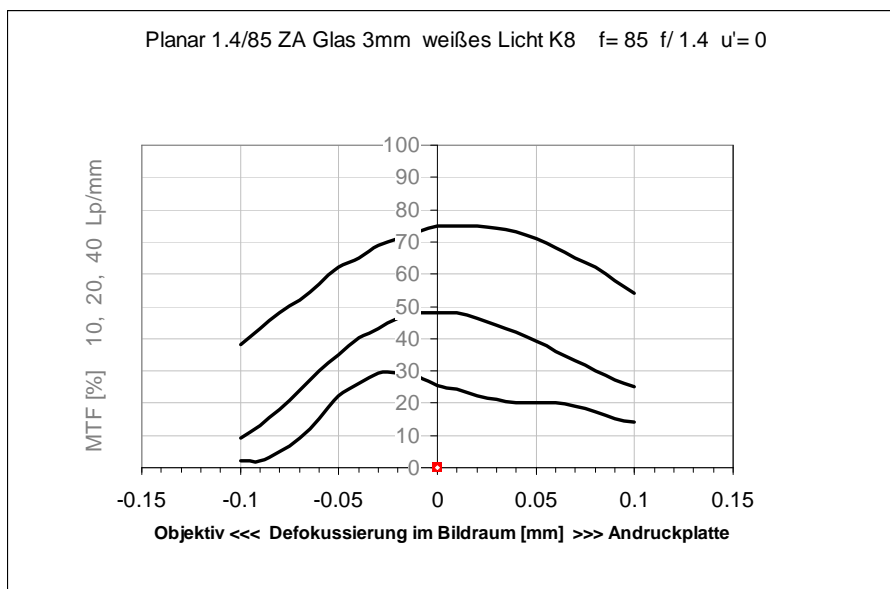
Wir sehen hier Bilder, deren Übertragungsfunktionen auf unterschiedliche Weise ungünstig sind. Eine von hohen Werten bei niedrigen Ortsfrequenzen schnell abfallende Kurve steht für ein Bild mit schlechter Kantenschärfe. Diesen Mangel bemerkt man aber kaum, wenn das Bild sehr klein ist, oder wenn man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



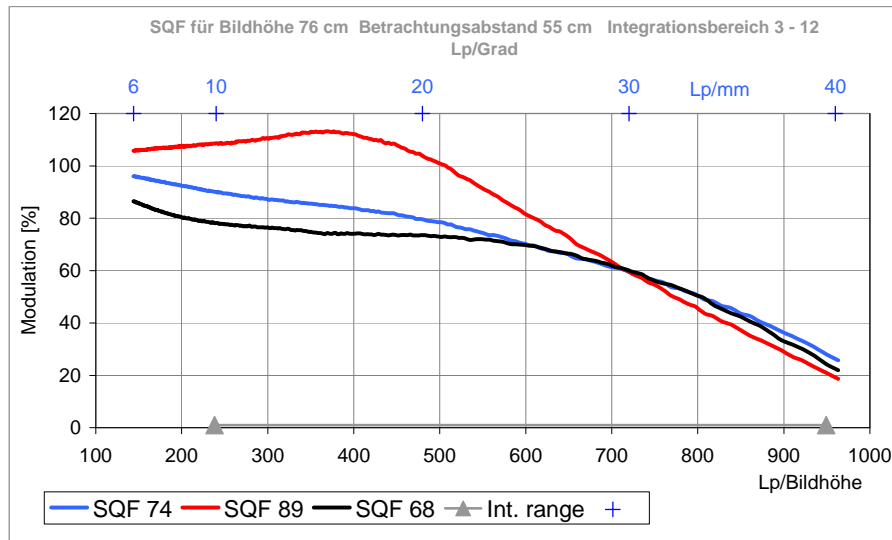
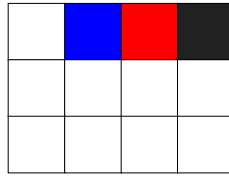
Schiefe Fokus-MTF Kurve eines bei voller Öffnung sphärisch unterkorrigierten Objektivs. Die Werte für positive Defokussierung beschreiben die Wiedergabe für Objekte hinter der Fokusebene. Die Werte für negative Defokussierung gelten für den Vordergrund.

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.

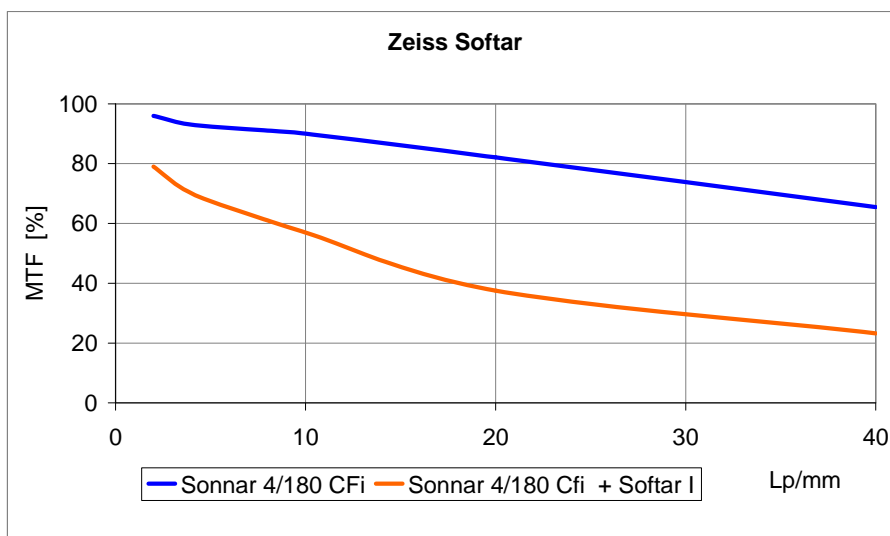
Schenken Sie also einfachen Zahlen kein übertriebenes Vertrauen! Selbst ein recht fundiert begründeter Parameter wie **SQF** ist nicht in der Lage, Bildeigenschaften differenziert zu beschreiben. Das ist im Grunde leicht einzusehen, weil ja die Fläche unter zwei ganz verschiedenen Kurven trotzdem gleich 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.

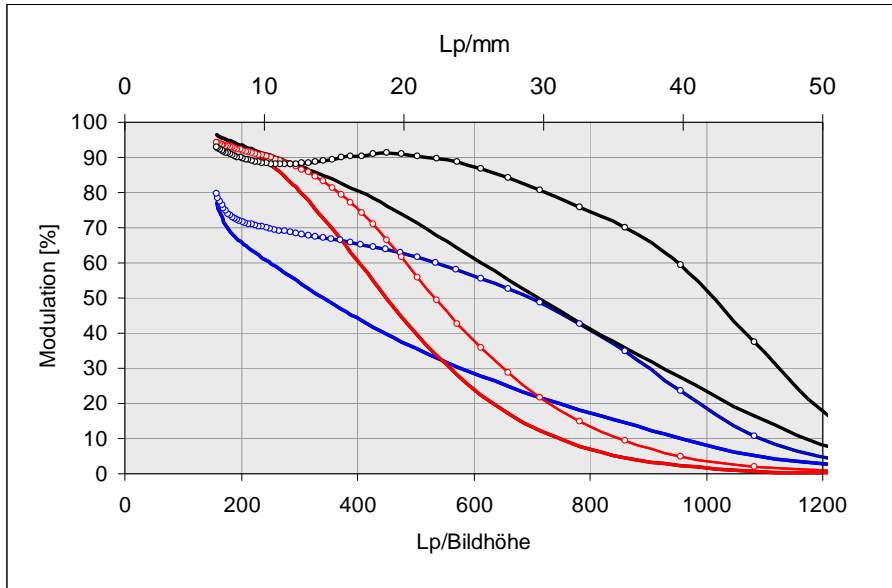
Einfache Zahlen und allzu simple Bewertungen in den Kategorien „je höher, desto mehr Punkte“ sind ohnehin in der bildmäßigen Fotografie nicht angebracht. Wenn der Fotograf eine bestimmte Bildidee hat und eine dazu passende Bildsprache benutzen möchte, dann muss er sich oft über alle Qualitätszahlen hinwegsetzen. 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.

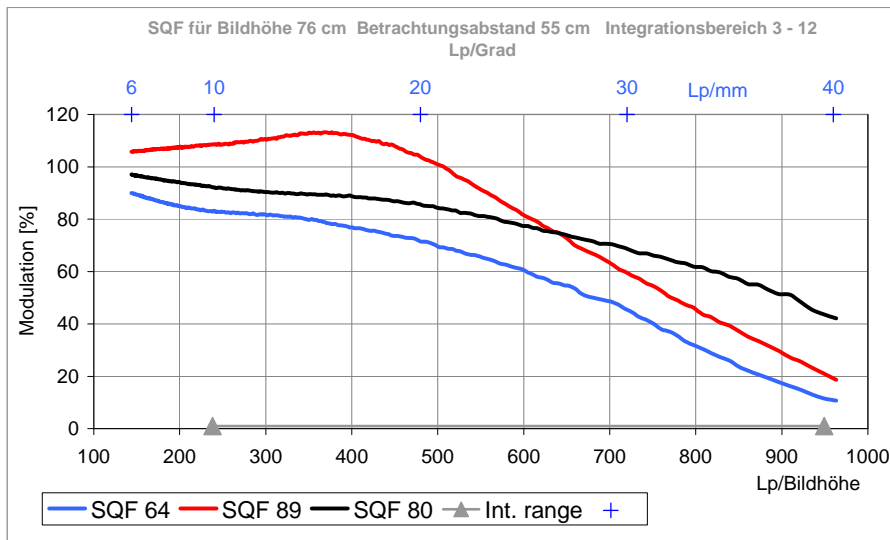
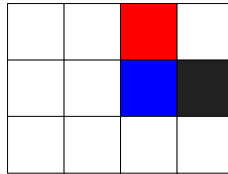
Die **blauen** Kurven erhält man, wenn man bei gleichen Kameraeinstellungen einen **Weichzeichnervorsatz Softar** am Objektiv verwendet. Wie bei der obigen optischen Messung am Sonnar 180 sehen wir auch hier, dass die Kontrastübertragung bei allen Ortsfrequenzen deutlich sinkt. Es entsteht eine tiefer 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.

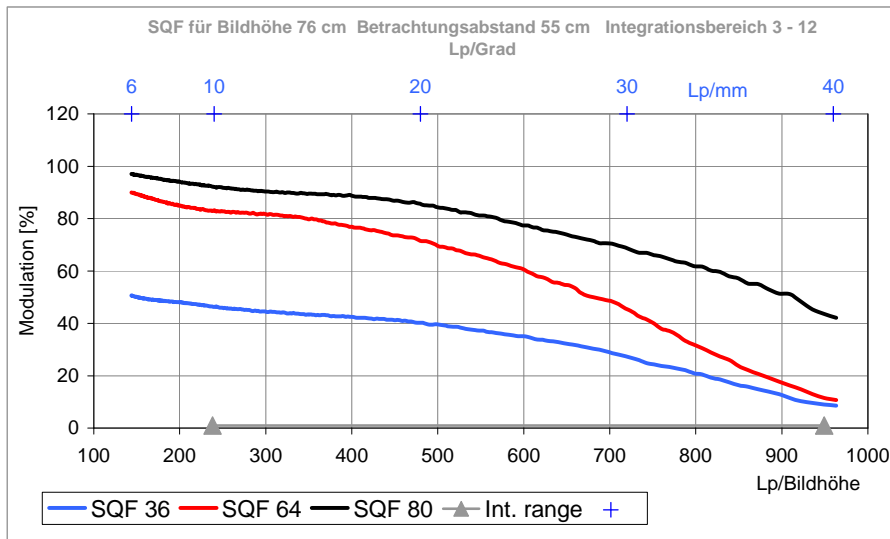
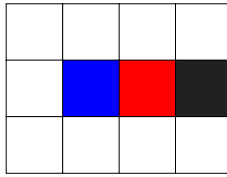
Deshalb vergleichen wir es hier noch einmal mit dem Bild darunter (blaues Feld), dessen MTF-Werte überall unter der roten Kurve liegen. Wir stellen aber fest, dass dieses Bild keineswegs weniger scharf aussieht.

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.

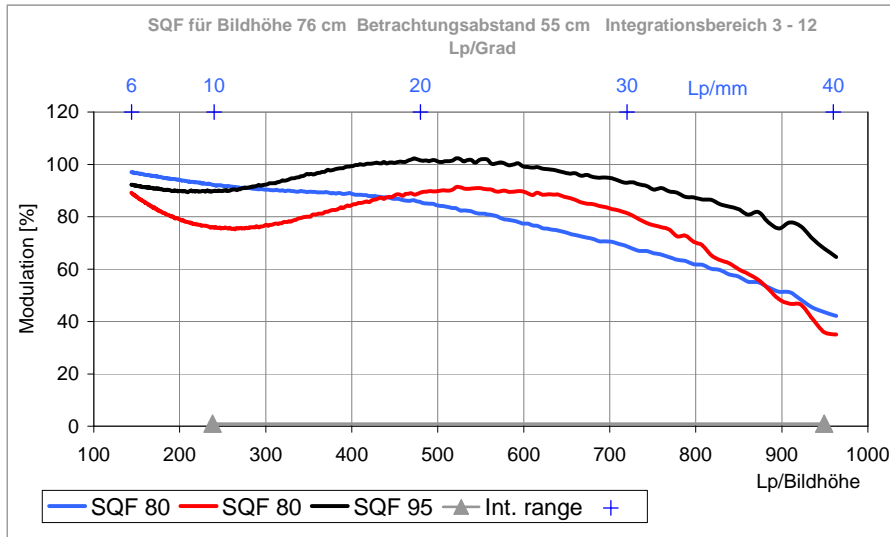
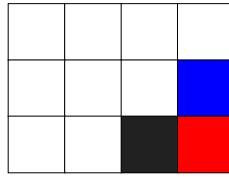
Das Bild der schwarzen Kurve zeigt aber, dass es zusätzlich auch noch darauf ankommt, wie hoch die flach verlaufende Kurve liegt. Nur dann ist das Bild frei von Überstrahlungen an Spitzlichtern, nur dann werden feine dunkle Strukturen in heller Umgebung dunkel und kontrastreich wiedergegeben. Das kann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

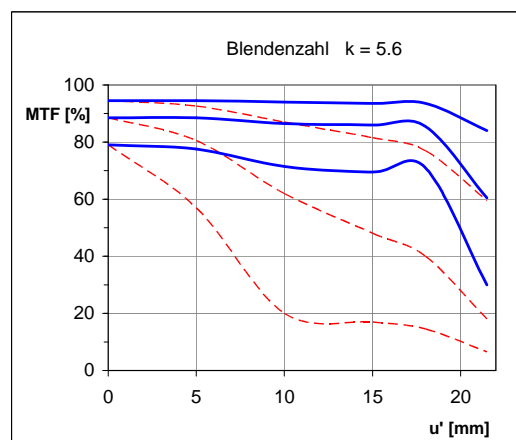
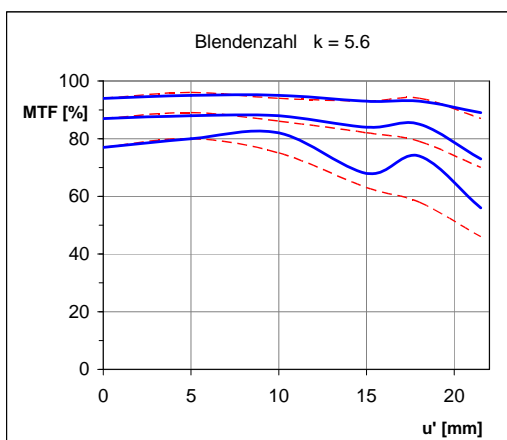
Dieses merkwürdige Bild hat folgende Ursachen: ein Objektiv mit hoher sphärischer Aberration, also ein Punktbild mit großem Halo, Kontrastanhebung im mittleren Frequenzbereich durch Unschärf Maskieren in der Nachbearbeitung. Die Nachbearbeitung kann aber die Schwächen des Objektivs nicht beseitigen.

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:

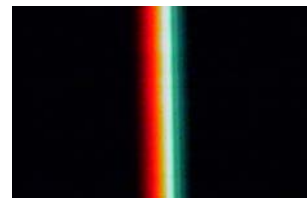
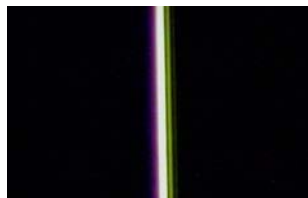


MTF im weißen Licht bei 10, 20 und 40 Lp/mm, aufgetragen über der Bildhöhe, blaue, durchgezogene Linien für sagittale, rote, gestrichelte Linien für tangentiale Spaltorientierung.

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

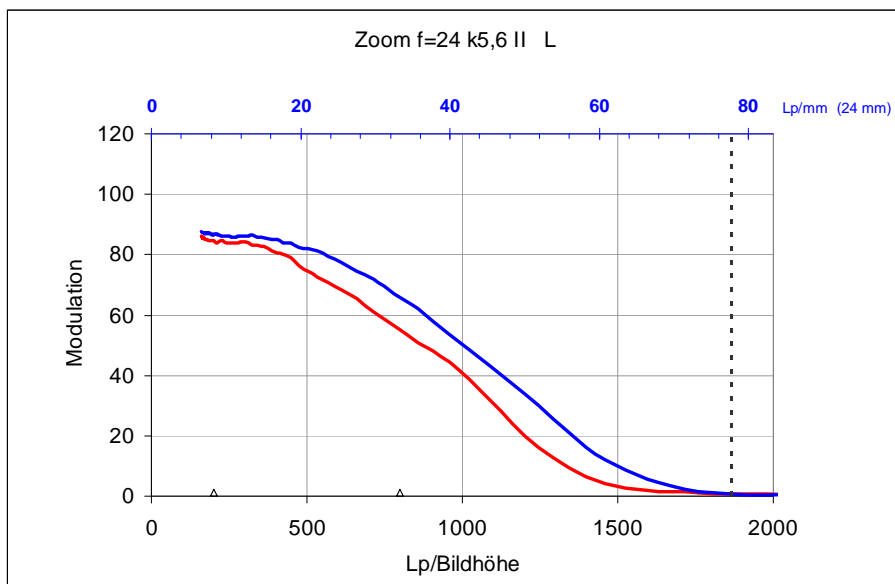
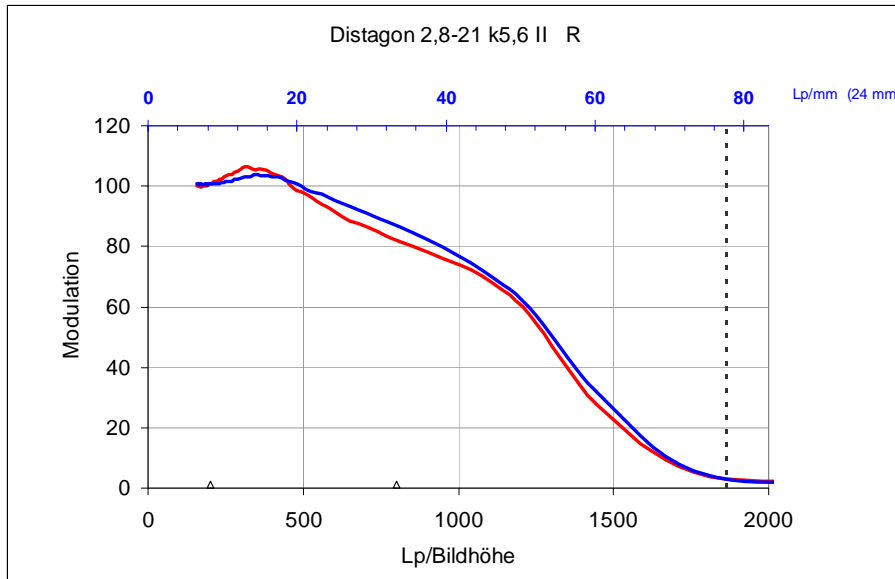
Rechts: **Standardzoom f=24mm f/5.6**

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 ?

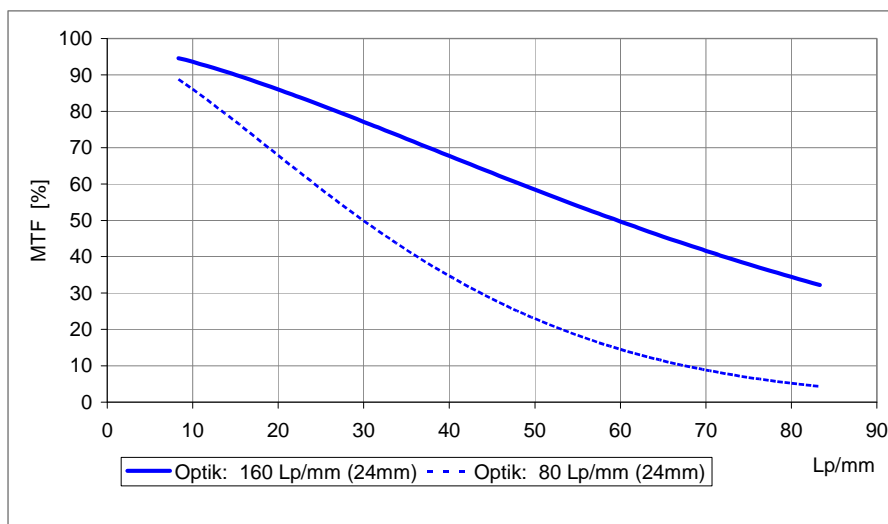
Und darauf man könnte in Abwandlung eines neuen geflügelten Wortes antworten:

Yes, they can! Denn heute sind die kleinsten Pixel um 1 μm 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.

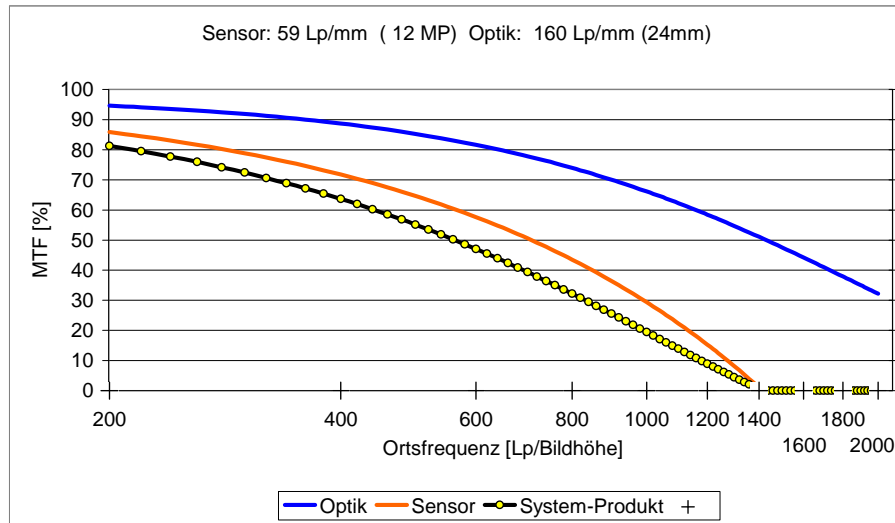


Wir wollen zwei Objektive betrachten mit diesen Übertragungsfunktionen: eines ist beugungsbegrenzt bei Blende 8-11 und hat eine Auflösung von 160 Lp/mm, das andere hat stärkere Aberrationen und zeigt deshalb die typische durchhängende MTF-Kurve; seine Auflösung erreicht nur 80 Lp/mm und ist damit etwas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

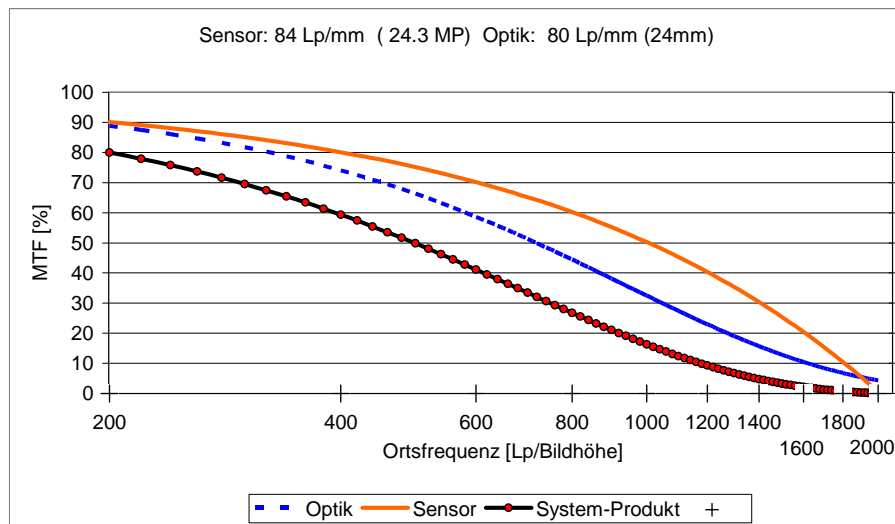
Wenn wir die Übertragungsfunktion des Systems Objektiv + Kamera ausrechnen wollen, dann müssen wir die beiden einzelnen MTF-Kurven miteinander multiplizieren, also z.B. in der folgenden Grafik bei 1000 Lp/Bildhöhe:

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

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.



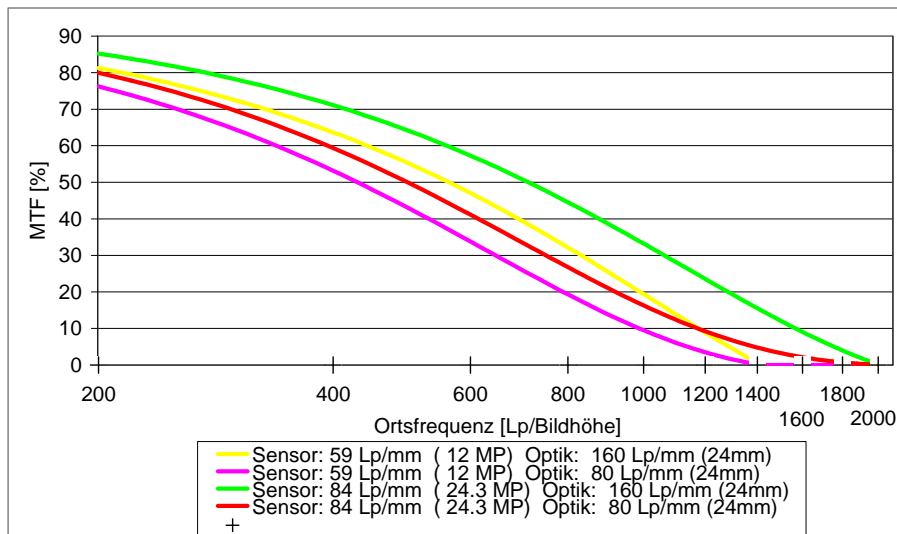
Drei Modulationsübertragungsfunktionen: das obige gute Objektiv, eine 12MP-Kamera und das System-Produkt der beiden Kurven. Das Objektiv ist wesentlich besser als der 12MP-Sensor, deshalb ist die Produkt-Kurve überwiegend vom Sensor bestimmt – der ist hier das schwächste Glied in der Kette.



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?

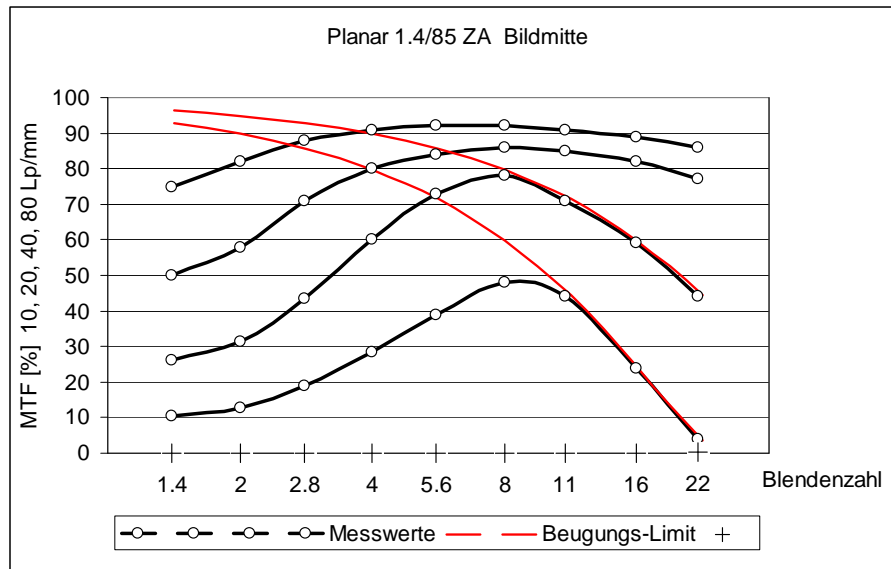
1. Bei Verdopplung der Pixelzahl wird die Übertragungsfunktion auch dann verbessert, wenn die Sensorauflösung besser ist als die des Objektivs.
2. Mit dem 24MP-Sensor ist die Kurve mit dem schlechten Objektiv fast so gut wie beim guten Objektiv mit dem 12MP-Sensor.
3. Wir erwarten, dass die Unterschiede 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.

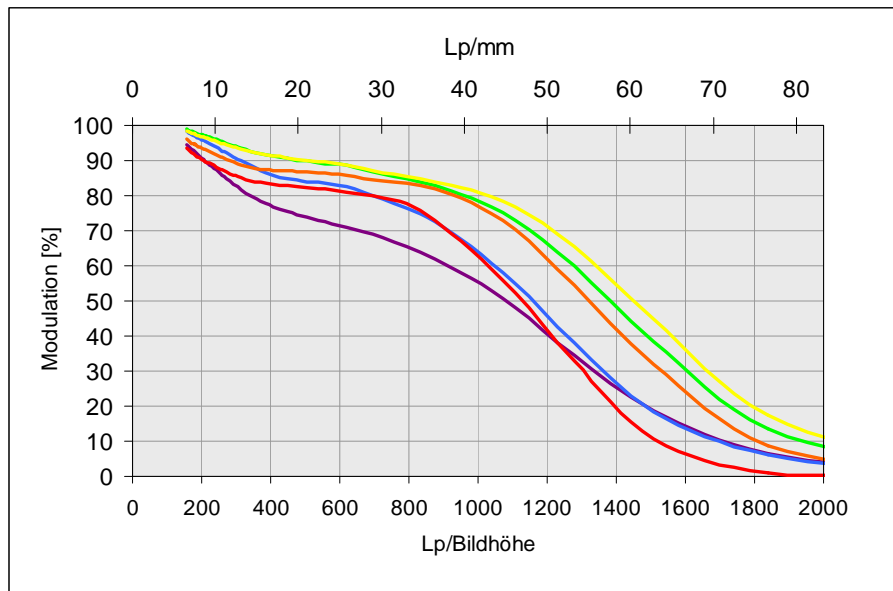
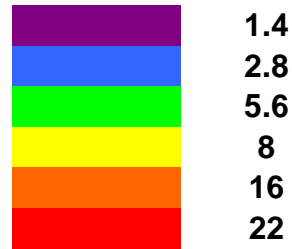
Die Kontrastunterschiede zwischen den Ortsfrequenzen werden natürlich durch die Wirkung des Tiefpassfilters und durch die Signalverarbeitung in der Kamera verändert, wir können also die optisch gemessenen Werte der obigen Grafik nicht 1:1 in den Systemkurven wieder finden, aber die genannten drei Bereiche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

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

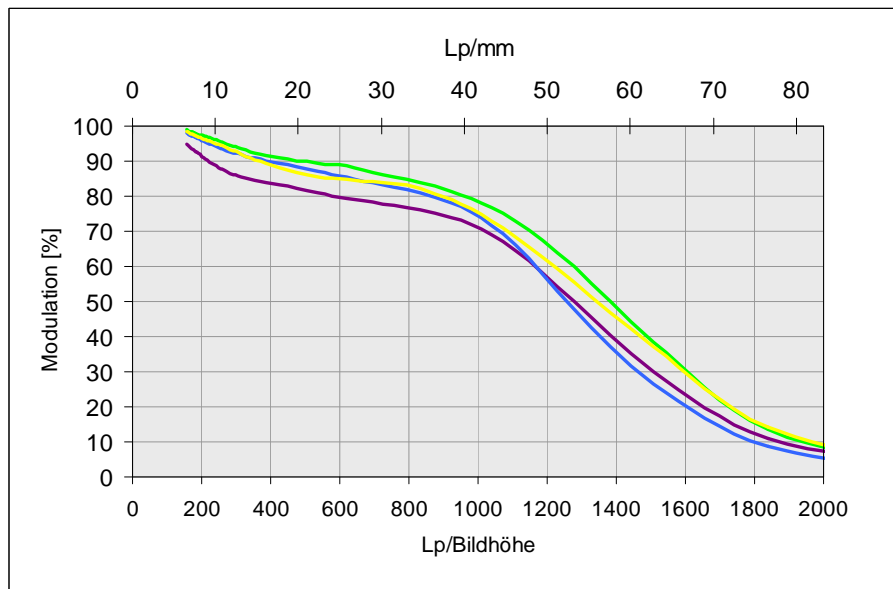
Bei voller Öffnung ist der Kontrast bei niedrigen Frequenzen bis 40 Lp/mm deutlich niedriger, dort steigert er sich bei Abblenden auf f/2.8. Wenn man weiter abblendet auf f/5.6, sieht man bei allen Frequenzen einen kräftigen Zuwachs. Blende 8 ist auch hier das Optimum (gelbe Kurve).

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.



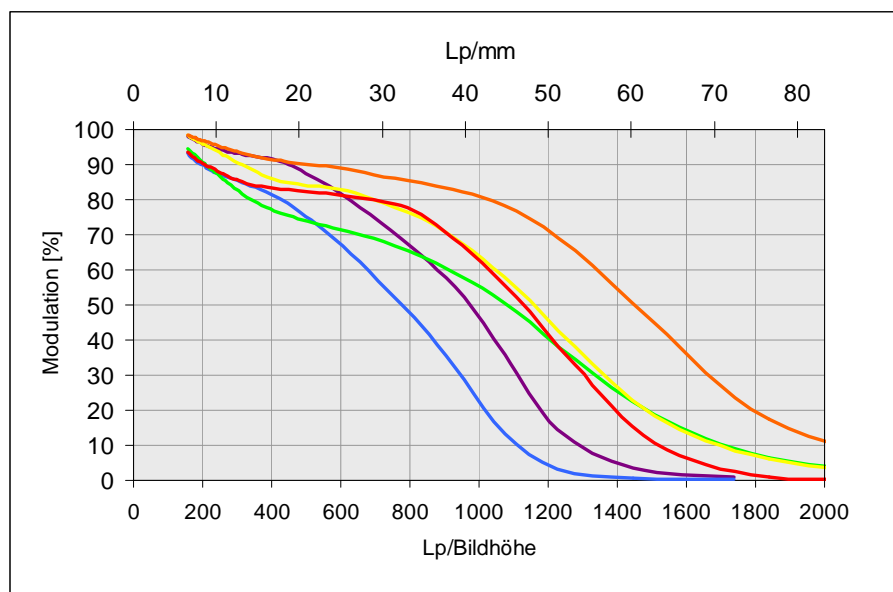
Wenn man je nach Blende unterschiedliche Scharfzeichnungsparameter einstellt, kann man die optischen Unterschiede teilweise kompensieren und über einen weiten Blendenbereich sehr ähnliche Kontrastübertragung erzielen. Planar 1.4/85 ZA an 24MP-Kamera, Blenden 1.4 .. 2.8 ..5.6 und 8.

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

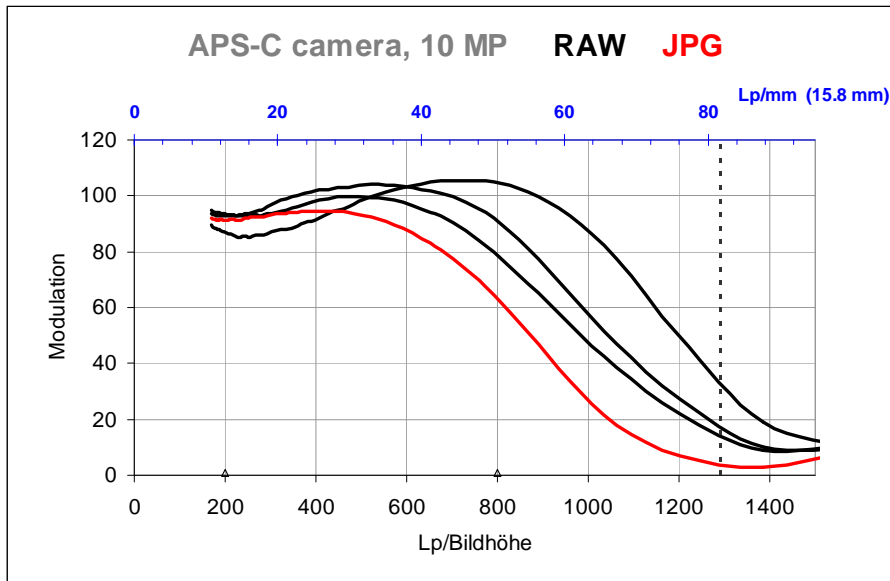
1. 24MP Blende 1.4, JPG mit höchster Schärfung
2. 24MP Blende 2.8, JPG mit hoher Schärfung
3. 12MP Blende 8, RAW
4. Analog, Diafilm ISO100, Format 6x7, Scan mit 4000 DPI

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

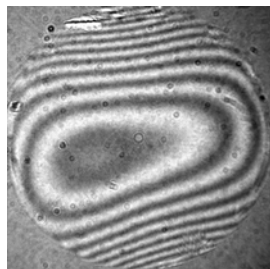
Man bildet periodische Streifenmuster ab und misst direkt im Bild die Intensitäten. Wenn das Muster sinusförmig ist, ist die Auswertung besonders einfach, weil man nur die Maxima und Minima messen muss und daraus unmittelbar die Modulation ausrechnen kann. Dies Verfahren wird angewandt bei der MTF-Messung 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.