

## Optik für die Digitale Fotografie

Autor : Dr. Karl Lenhardt, Bad Kreuznach

*Die Rolle der Optik in der konventionellen Fotografie (mit Filmmaterialien) ist dem professionellen Anwender wohl vertraut. Er weiß die relevanten Größen richtig abzuschätzen: Brennweite, Bildwinkel, Perspektive und deren Kontrolle, Blendenzahl, Bildschärfe, Schärfentiefe u.s.w.*

*Durch das neue Bildspeichermedium (Halbleiter-Bildspeicher) und dessen Besonderheiten sind viele nun verunsichert: Was von den "alten" Regeln ist noch gültig, was muß neu überdacht werden?*

*Ist die Qualität meiner Ausrüstung gut genug, um auch mit einem Digital-Rückteil arbeiten zu können und sind meine Objektive für den Einsatz in der digitalen Fotografie geeignet?*

*Um all diese Fragen beantworten zu können, muß zunächst geklärt werden, wie denn die Bildqualität und ganz speziell die Bildschärfe zu beurteilen, also mit einem Maß zu versehen ist.*

- [Bildschärfe ?](#)
- [Formatgebundener Ansatz](#)
- [Ausrichtung an den Leistungsgrenzen der Bildsensoren](#)
- [Neue Objektiv-Baureihe von Schneider Kreuznach](#)

### 1. Was ist "Die Bildschärfe" ?

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

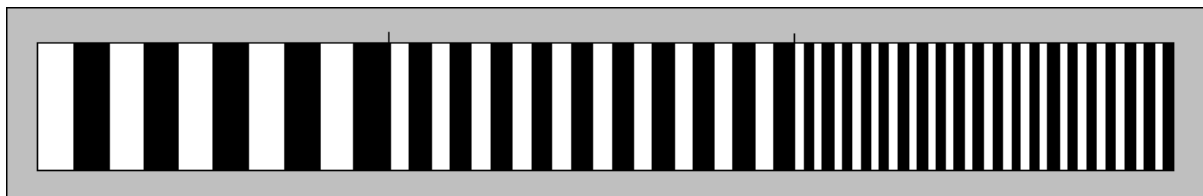


Abb. 1: Ein Balkentest (Auflösungstest)

Das Maß für die Feinheit der Strukturen ist hier die **Anzahl der schwarz/weißen Linienpaare pro Längeneinheit**, also z.B. 5 Linienpaare pro Zentimeter. Insgesamt sind dies 10 Linien (schwarz oder weiß) auf den Zentimeter.

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

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

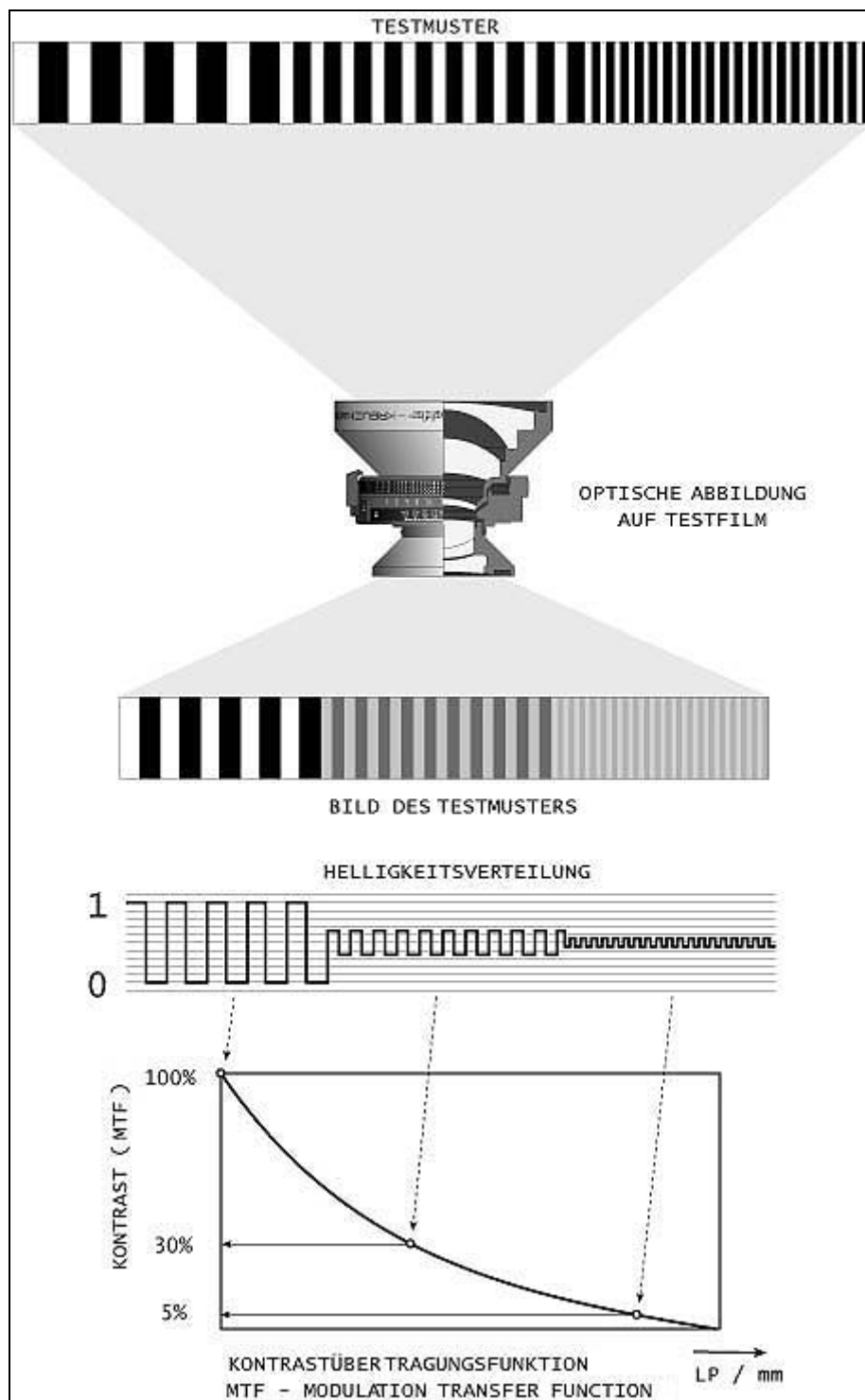


Abb 2: Abbildung des Balkentests durch Objektiv und Film. Bild des Testmusters ist exakt berechnet mit MATHCAD®.

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

Für die groben Strukturen ist der Unterschied (Differenz) zwischen hell und dunkel noch gleich eins, für die mittleren Strukturen nur noch  $0,65 - 0,35 = 0,3$ , also 30%. Und für die ganz feinen Strukturen beträgt dieser Unterschied nur noch 5%! Eigentlich wollte man aber auch die ganz feinen Strukturen

mit großem Hell/Dunkel Unterschied, also mit großem Kontrast, abbilden, damit sie gut sichtbar bleiben!



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

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

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

Nun muß noch die sehr wichtige Frage geklärt werden, bis zu welchen Strukturfeinheiten eine Kontrastübertragung überhaupt sinnvoll ist, denn was das Auge nicht mehr sehen kann, braucht auch nicht übertragen (abgebildet) zu werden.

Dabei gehen wir beispielhaft von der Annahme aus, daß eine Bildveröffentlichung das Druckformat DIN A4 i.d.R. nicht übersteigt, und daß als Bildaufzeichnungsformat in etwa Kleinbild (24x36 mm<sup>2</sup>) verwendet wird. Dies bedeutet eine Vergrößerung des Bildformates von etwa 7-7,5fach.

Der **übliche Betrachtungsabstand** für eine **DIN A4 Vorlage** wird etwa **25 cm** betragen ("**deutliche Sehweite**"). Welche Details kann das menschliche Auge dabei noch erkennen? Die Antwort aus vielen praktischen Versuchen ist:



**Grenzauflösung des Auges: maximal 6 Linienpaare pro mm ( 6 Lp/mm).**

Auf das **Aufnahmeformat** übertragen bedeutet dies ungefähr  $7 \times 6 = 42$  Lp/mm, also ca. **40 Lp/mm**.

Bei hochwertigen Drucken auf Kunstdruckpapieren (glänzend gestrichene Papiere) wird üblicherweise mit einer Rasterweite von 150 Linien pro inch bis maximal 200 Linien pro inch gedruckt (bei 256 Graustufen und 45 ° Winkelung). Das sind also ca. 6-8 Linien/mm und somit 3-4 Linienpaare/mm. Daher sind auch von diesem Standpunkt die 6 Lp/mm eine vernünftige Obergrenze. Alles was darüber ist, wird vom Auge nicht mehr honoriert. Sehr wohl aber honoriert wird eine möglichst hohe Kontrastübertragung bei dieser Linienpaarzahl ! Eine recht anschauliche Darstellung dieses Sachverhaltes wurde schon 1976 von Heynacher und Köber <sup>[1]</sup> gegeben, eine Erläuterung mit Bildbeispielen, welche zur Lektüre wärmstens empfohlen wird.

Um die reine Angabe einer Auflösungszahl vollends ad absurdum zu führen, soll ein einfaches Rechenbeispiel betrachtet werden:

Angenommen, wir verwenden einen höchstauflösenden Film mit einer excellenten Optik, welche zusammen etwa 75 Lp/mm wiedergeben können. Vergrößert um den Faktor 7,5fach ergibt dies im Bild eine Auflösungsgrenze von 10 Lp/mm, was das Auge überhaupt nicht mehr auflösen kann ! Entscheidend wichtiger ist die Höhe der Kontrastwiedergabe bis zur Auflösungsgrenze des Auges, also 6 Lp/mm auf der Vergrößerung oder  $6 \times 7,5 = 45$  Lp/mm auf dem Film !

Dieses Beispiel kann auch ohne weiteres auf andere Filmformate übertragen werden. So liegt für das Format von **9x12 cm (4x5 inch)** die zu betrachtende **Grenz-Linienpaar-Zahl** bei etwa **20 Lp/mm**, selbst bei einem wesentlich größeren Endformat.

Sie werden nun fragen: was haben diese Tests mit einfachen Balkengittern mit der rauhen Wirklichkeit zu tun, wo komplizierte Strukturen mit weichen Tonübergängen aber auch feine Oberflächendetails wie z.B. eine seitlich beleuchtete Sandoberfläche gleichermaßen vorkommen können? Die Antwort ist - nimmt mans wissenschaftlich exakt - ziemlich kompliziert, kann aber auf einen einfachen Nenner gebracht werden: Jede Helligkeits- und Strukturverteilung im Objekt kann man sich zusammengesetzt denken als eine Summe von periodischen Strukturen verschiedener Feinheit und Orientierung, wobei die Balkengitter-Tests nur ein einfaches Beispiel waren. Anstelle der abrupten Hell-Dunkel-Übergänge

müssen nur weichere Übergänge betrachtet werden mit "harmonischerem" Verlauf, genauer: sinusförmigem Verlauf.

Die Summe aller dieser Linien (Linienpaare/mm) verschiedener Orientierung ergibt die **Objektstruktur**. Diese wird nun dem **Objektiv** zur Abbildung in die Bildebene angeboten (siehe auch "[Die Bildqualität von Objektiven für die digitale Fotografie](#)"). Dieses schwächt den Kontrast der einzelnen Komponenten gemäß seiner Kontrastübertragungsfunktion und produziert ein **Bild**, welches dem Objekt mehr oder weniger gut entspricht.

Damit können wir die Eingangs gestellte Frage "**Was ist eigentlich Bildschärfe**" zusammenfassend beantworten:

- möglichst hohe Kontrastwiedergabe für grobe und feine Objektstrukturen (ausgedrückt in Linienpaaren pro mm) bis zu einer von der Anwendung abhängigen höchsten Linienpaarzahl.
- ⚠
- Diese Grenze ist abhängig vom Aufnahmeformat und der beabsichtigten Endvergrößerung und wird entscheidend mitbestimmt von der höchsten Linienpaarzahl, welche das Auge in der Endvergrößerung noch erkennen kann (ca. 6 Lp/mm).

Die nachfolgende Abbildung 3 faßt dies nochmals graphisch zusammen.

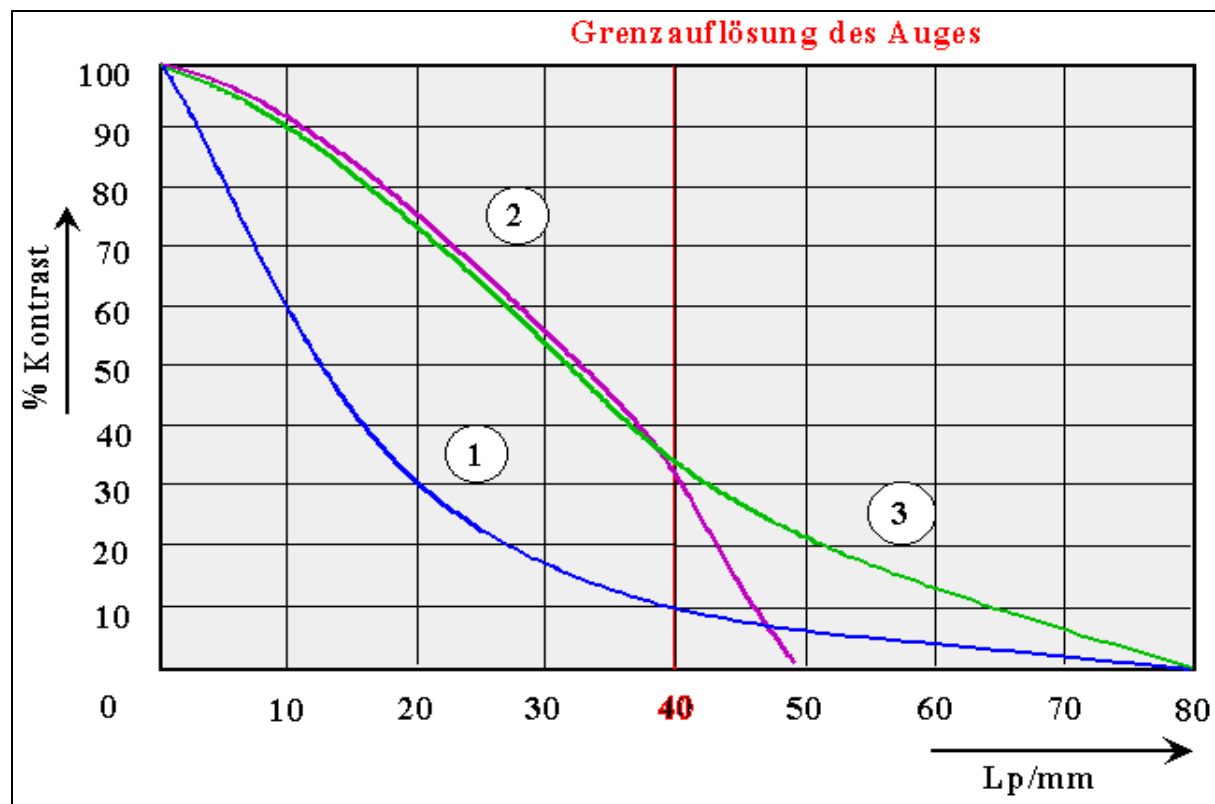


Abb 3: Verschiedene MTF-Charakteristika:  
1) niedriger Kontrast, hohe Auflösung,  
2) hoher Kontrast, geringe Auflösung > bessere Qualität,  
3) hoher Kontrast, hohe Auflösung, keine Qualitätsverbesserung.

## 2. Digitale Fotografie Teil I - der formatgebundene Ansatz

Nach den vorangegangenen Ausführungen über Bildschärfe und Kontrastübertragung erkennen Sie sicher schon den jetzt folgenden Ansatz für die Anforderungen in der digitalen Fotografie: Er wird an das Format des Bildsensors gebunden. Das kleinste darstellbare Bildelement eines Halbleiter-Bildsensors wird "**Pixel**" genannt, was eine Abkürzung für die englische Bezeichnung "**picture element**" darstellt. In loser Analogie könnte man dieses als das **Korn der digitalen Fotografie**

bezeichnen. Im Gegensatz zum Filmkorn besitzen die Pixel jedoch eine streng regelmäßige geometrische Struktur und reihen sich mit quadratischer oder rechteckförmiger Fläche aneinander. Heutige Hochleistungs-Bildsensoren (zu erschwinglichen Preisen) haben **Pixelzahlen** von 2000x2000 Pixeln bis **2000 x 3000 Pixeln**, bei einer Größe dieser **Elemente** von ca. **0,015 mm** bis **0,012 mm**. Dies ergibt ein Format des Bildsensors von ca. 30x30 mm bzw. **24x36 mm** - also in etwa **Kleinbildformat**.

Daher können wir die Ergebnisse über Bildschärfe direkt übertragen:

- **Das Objektiv muß bis zu 40 Lp/mm mit möglichst hohem Kontrast übertragen.**

Eine Voraussetzung ist dabei wichtig:

- **Auch der Bildsensor muß diese Linienpaar-Zahl mit möglichst hohem Kontrast übertragen!**

Der Sensor kann diese Linienpaarzahl nur übertragen, wenn gerade ein dunkler Balken auf ein Pixel fällt, und ein heller Balken auf das benachbarte Pixel. Oder umgekehrt:

Die höchste **Linienpaar-Zahl**  $R_N$ , die ein Sensor mit dem **Pixelabstand**  $p$  übertragen kann, ist gleich

$$R_N = \frac{1}{2 \cdot p} \text{ Lp / mm}$$

In obigen Beispielen sind dies 33 Lp/mm bzw. gerade 40 Lp/mm.

Mit dem erstgenannten Sensor erreichen Sie (nach unserem jetzigen Kenntnisstand) nicht ganz die angestrebte Bildqualität (bei einem Endbild von ca. DIN A4) mit dem zweiten aber gerade.

Daß es noch weitere sensorspezifische Eigenheiten zu beachten gilt, welche mit der regelmäßigen Pixelstruktur zusammenhängen, werden wir im nächsten Abschnitt sehen. Zuvor sollen noch einige zusätzliche Gesichtspunkte angesprochen werden, welche mit dem veränderten Format zusammenhängen.

### Weitere - formatgebundene - Gesichtspunkte

Wenn Sie bisher mit einer **Großformat-Kamera** (9x12 bzw. 4x5 inch) gearbeitet haben und nun ein **digitales Rückteil** mit einem der genannten Sensoren benutzen wollen, so ist zu bedenken, daß das Format, bezogen auf die **Bilddiagonale** sich ca. um den **Faktor 3,5 verkleinert** hat. Um die gewohnten Bildwinkel zu erhalten, müssen Sie also auch eine 3,5 mal kleinere Brennweite verwenden.

Format	9x12 cm	24x36 mm
Brennweite	90 mm	25 mm
	150 mm	43 mm
	210 mm	60 mm
	360 mm	103 mm
höchste Anzahl Lp/mm	<b>20 Lp/mm</b> (besser als DIN A4 Endformat)	<b>40 Lp/mm</b> (für ca. DIN A4 Endformat)

Tabelle 1: Brennweiten für ungefähr gleichen Bildwinkel, Formate 9x12 cm und 24x36 mm

Soll in der digitalen Fotografie mit diesen Sensoren auch mit **Perspektive-Korrektur** (Shift und Tilt) gearbeitet werden, so muß der **Bildkreisdurchmesser** dieser Objektive natürlich größer sein als die Bilddiagonale (z.B. ca. 60 mm).

Zum Schluß dieses Abschnitts noch eine Anmerkung über die Schärfentiefe und entsprechende Tabellen:

Die **Schärfentiefe** ist abhängig vom zulässigen **Zerstreuungskreisdurchmesser**. Dieser ist normiert und beträgt für das Format **9x12 cm 0,1 mm** und für das **Kleinbild 0,033 mm**. Diesen Zahlen liegt die Annahme zu Grunde, daß die Endvergrößerung (bzw. die Kopie) ein Format von 9x12 cm besitzt. Dann kann dieser Zerstreuungskreis-Durchmesser vom Auge (im Betrachtungsabstand 25 cm) kaum noch wahrgenommen werden. Weil wir aber ein Endformat doppelter Größe angenommen haben, sollte auch der Zerstreuungskreis-Durchmesser nur den halben Wert besitzen, um auch noch am Rande des Schärfentiefenbereichs ausreichende Bildqualität zu erhalten. Natürlich verringert sich dann auch der Schärfentiefenbereich auf die Hälfte.

Bitte bedenken Sie aber:

Durch das kleinere Format wird auch der Abbildungsmaßstab verringert, um denselben Gegenstand formatfüllend abzubilden. Bezieht man sich auf die Formatdiagonalen (um von den unterschiedlichen Seitenverhältnissen wegzukommen), so ergibt sich folgendes Bild:

Format	Diagonale
9x12cm	150mm
24x36 mm	43,2mm

Tabelle 2: Das **Verhältnis der Diagonalen** ist also ungefähr  $V = 1 : 3,5$ .

Um dieses Verhältnis muß auch der **Abbildungsmaßstab  $\beta$**  für das Kleinbild reduziert werden. Anhand von Schärfentiepenformeln kann man dann zeigen, daß auch die Blendenzahl um diesen Faktor V verringert werden kann, bei gleicher **Schärfentiefe T**. Arbeiten Sie also beim Großbild mit der **Blende**

**K = 22**, so können Sie beim Kleinbild bei gleicher Schärfentiefe mit Blende  $K = 22/3,5 = 6,3$  arbeiten ! Dies ist Blende 5,6 plus  $1/3$  Blendenstufe.

Die nachfolgende Tabelle soll dies beispielhaft verdeutlichen:

Großbild		Kleinbild	
K = 22		K = 6,3	
d' = 50 $\mu$ m		d' = 15 $\mu$ m	
$\beta$	T/mm	$\beta$	T/mm
1 : 10	242	1 : 35	238
1 : 20	924	1 : 70	939
1 : 30	2046	1 : 105	2103

Tabelle 3: K = Blende, d' = Zerstreuungskreisdurchmesser,  $\beta$  = Abbildungsmaßstab, T= Schärfentiefe

### 3. Digitale Fotografie Teil II - Ausrichtung an den Leistungsgrenzen der Bildsensoren

Die Tendenz in der Halbleiterindustrie, immer kleinere Strukturen auf engstem Raum unterzubringen, hat ihre Antriebsfeder in der Tatsache, daß die Kosten eines Bauteils (z.B. Bildsensors) mindestens proportional mit der Fläche anwachsen. Zur Zeit sind die kleinsten reproduzierbaren Strukturen von der Größe  $1/4 \mu$ m (das ist ein viertel eines tausendstel Millimeters!) und in den Forschungslabors der Halbleiterindustrie wird an der Realisierung noch kleinerer Strukturen bis hinab zu  $1/10 \mu$ m gearbeitet. Daher ist es vernünftig anzunehmen, daß diese Entwicklung auch den Halbleiter-Bildsensoren zugute kommt, wobei eine Untergrenze für die Pixelfläche gegeben sein wird durch die sinkende Empfindlichkeit. Diese Grenze wird jedoch nicht über  $5 \mu$ m liegen, wie schon jetzige  $1/4$  Zoll-Sensoren zeigen.

Dann besteht die Möglichkeit,

1. bei gleicher Pixelzahl die Fläche des Sensors zu reduzieren, um ihn dadurch zu verbilligen,

oder aber

2. bei gleicher Fläche die Pixelzahl zu erhöhen, um die Bildqualität zu steigern und in Richtung Mittelformat zu bringen.

Dies sei an dem Beispiel des Sensors mit Kleinbildformat und dem Pixelabstand  $12\ \mu\text{m}$  erläutert (2Kx3K Sensor).

Verringerung der Pixelgröße auf  $6\ \mu\text{m}$  bedeutet:

im Falle 1: Reduzierung der Fläche auf  $\frac{1}{4}$  ( $12 \times 18\ \text{mm}$ ), Pixelzahl 2Kx3K = 6 Millionen Pixel, wie gehabt,

im Falle 2: Gleiche Fläche ( $24 \times 36\ \text{mm}$ ), wie gehabt, und Erhöhung der Pixelzahl auf 4Kx6K = 24 Mill. Pixel

In jedem Fall wird dadurch die höchste Linienpaarzahl, die der neue Sensor übertragen kann, verdoppelt:

-	Pixelgröße $P$	Höchste übertragbare Linienpaarzahl $R_N$
Fall <sub>1</sub>	$12\ \mu\text{m} = 0,012\ \text{mm}$	ca. 40 Lp/mm
Fall <sub>2</sub>	$6\ \mu\text{m} = 0,006\ \text{mm}$	ca. 80 Lp/mm

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Pixelgröße und Linienpaarzahl

**Nun gilt es noch eine Besonderheit der digitalen Bildspeicher zu beachten, welche mit der regelmäßigen Anordnung der Pixel zu tun hat, im Gegensatz zu der unregelmäßigen Kornstruktur eines Films.**

Schaut man sich die Kontrastübertragung des digitalen Bildspeichers in der Nähe der höchsten übertragbaren Linienpaarzahl  $R_N$  genauer an, so erkennt man, daß für größere Zahlen der Kontrast nicht etwa plötzlich auf Null fällt, sondern daß eine eigentümliche Verringerung der wiedergegebenen Linienpaarzahl eintritt. Die nachfolgende Abbildung 4 soll dies veranschaulichen.



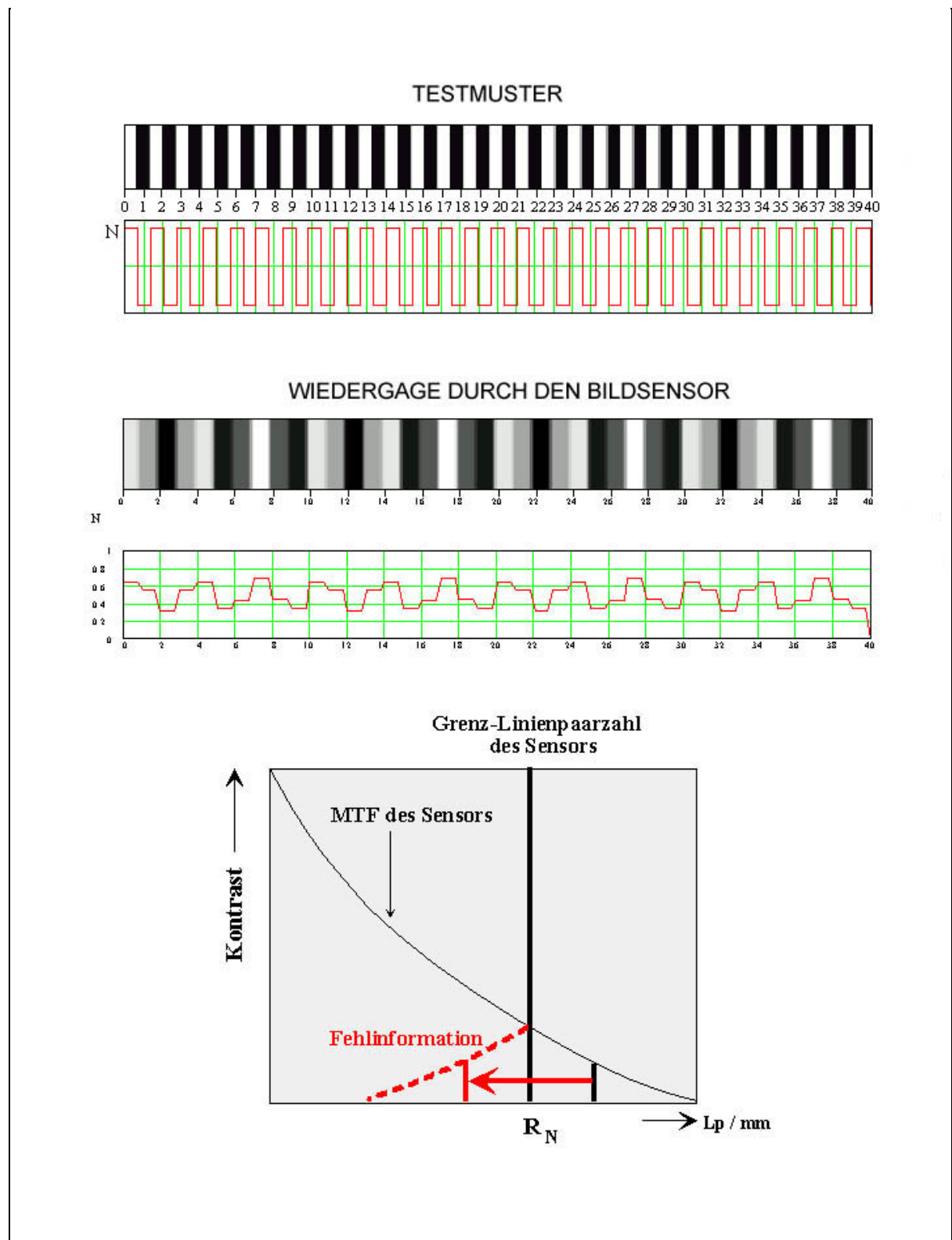


Abb 4: Einfluß der Grenz-Linienpaarzahl des Bildsensors. Bild des Testmusters ist exakt berechnet mit MATHCAD®.

In der Abbildung oben ist der **Balkentest** zu erkennen, sowie die dazugehörige Helligkeitsverteilung zwischen 1 und 0 der hellen und dunklen Balken. Auf der horizontalen Achse ist die Ausdehnung der Pixel aufgetragen, im Beispiel von Pixel Nr. 1 bis Pixel Nr. 40. Man erkennt, daß auf 10 Pixel ca. 7 Hell/Dunkel Balkenpaare (Linienpaare) kommen. Die Balkenbreiten sind jetzt kleiner als ein Pixel (etwa Faktor 0,7), so daß auf ein Pixel ein heller, aber auch noch ein gewisser Anteil eines dunklen Streifens fällt. Das Pixel kann dies natürlich nicht mehr unterscheiden und mittelt die Helligkeit (in etwa so wie bei einer integralen Belichtungsmessung). Daher haben die aufeinanderfolgenden Pixel jetzt verschieden helle Grautöne je nach Flächenanteil der hellen und dunklen Balken auf dem Pixel, wie dies in der Abb. 4 Mitte zu sehen ist.

Die **Helligkeitsverteilung** darunter zeigt, daß jetzt nur noch drei (grob gestufte) Übergänge von



maximaler Helligkeit bis maximaler Dunkelheit pro 10 Pixel erfolgen. Eigentlich sollten es aber 7 Linienpaare pro 10 Pixel sein, wie im Testmuster. Die wiedergegebene Linienpaarzahl hat sich also verringert statt erhöht. Das Bild hat nun keine Ähnlichkeit mit dem Objekt mehr, es besteht nur noch aus Fehlinformation ! Wenn man bedenkt, daß die höchste übertragbare Linienpaarzahl gleich 5 Linienpaare pro 10 Pixel ist, so erkennt man auch die Gesetzmäßigkeit für diesen eigentümlichen **Informationsverlust**:

die über die maximale Linienpaarzahl von 5 Lp/10 Pixel hinausgehenden Linienpaare (7 Lp/10 Pixel - 5 Lp/10 Pixel = 2 Lp/10 Pixel) werden von der maximal wiedergebbaren Linienpaarzahl abgezogen (5 Lp/10 Pixel - 2 Lp/10 Pixel = 3 Lp/10 Pixel) und ergeben so die tatsächlich wiedergegebene (falsche) Struktur von 3 Lp/10 Pixel. Die Kontrastübertragungsfunktion wird also an der maximal wiedergebbaren Linienpaarzahl  $R_N$  gespiegelt, wie die Abb. unten zeigt.

Natürlich sind wir an der Wiedergabe dieser Fehlinformation nicht interessiert und es wäre ideal, wenn die Kontrastübertragung bei der maximalen Linienpaarzahl schlagartig auf Null sinken würde. Leider ist dies nicht machbar, weder für die Optik, noch für den Bildsensor.



Wir müssen also darauf achten, daß die gesamte Kontrastübertragung (aus Objektiv und Bildsensor) bei der maximalen Linienpaarzahl ( $R_N = 1/2 \times p$ ) genügend klein ist, damit diese Störungen nicht ins Gewicht fallen. Andernfalls kann es passieren, daß eine gute Optik mit hohem Kontrast bei der Linienpaarzahl  $R_N$  schlechter beurteilt wird als eine weniger gute mit mäßigem Kontrast.

Die gesamte Kontrastübertragung (aus Objektiv und Halbleitersensor) setzt sich zusammen aus dem Produkt der beiden Kontrastübertragungsfunktionen. Dies gilt dann auch für den Kontrast bei der maximal übertragbaren Linienpaarzahl. Für einen typischen Halbleiter-Bildsensor liegt der Kontrast dort bei etwa 30-50 %, so daß man sinnvollerweise für die Optik bei dieser Linienpaarzahl  $R_N$  etwa 20 % fordern sollte, damit die Fehlinformation sicher unter 10 % liegt ( $0,5 \times 0,2 = 0,1$ ).

Unsere Erkenntnisse aus dem formatgebundenen Ansatz müssen also ergänzt werden:



- Die Kontrastübertragung bei der höchsten, durch den Sensor wiedergebbaren Linienpaarzahl  $R_N$  muß genügend klein sein, damit keine Falschinformation übertragen wird.
- Andererseits soll die Kontrastübertragung bei der durch die Formatvergrößerung bedingten höchsten erkennbaren Linienpaarzahl möglichst hoch sein.

Dieser Widerspruch ist nur zu lösen, wenn die **Grenz-Linienpaarzahl** des Sensors ( $R_N$ ) deutlich höher ist als die maximal erkennbare Linienpaar-Zahl. Am Beispiel des (hypothetischen) Bildsensors mit 6  $\mu\text{m}$  Pixelabstand und  $4\text{K} \times 6\text{K} = 24$  Millionen Pixeln (Format  $24 \times 36$  mm) sei dies erläutert:

Die Grenz-Linienpaarzahl des Sensors  $R_N$  liegt bei 80 Lp/mm. Dort muß die Kontrastübertragung (aus Sensor und Optik) niedrig sein. Die höchste erkennbare Linienpaarzahl für das Format  $24 \times 36$  mm liegt bei ca. 40 Lp/mm, so daß noch genügend Abstand bleibt für eine möglichst hohe MTF bei dieser Linienpaar-Zahl.

Unabhängig von diesen Betrachtungen ist noch zu beachten, daß natürlich **Farbsäume** (ebenso wie in der klassischen Fotografie) störend wirken, sie sollten daher deutlich kleiner als eine Pixelgröße sein, was man durch spezielle Glasauswahl mit sog. **apochromatischen Konstruktionen** erreichen kann.

#### 4. Objektive für die digitale Fotografie - eine neue Baureihe von Schneider Kreuznach

Schneider Kreuznach präsentierte zur Photokina '98 eine neue Reihe von Objektiven, welche für die digitale Fotografie optimiert sind. Die neue Bezeichnung - DIGITARE - soll diesen Anwendungsbereich unterstreichen.



Die Brennweiten befinden sich im Bereich von 28 bis 150 mm bei Bildkreisdurchmessern von 60 mm aufwärts, sind also für die derzeitigen Bildsensoren bestens geeignet. Durch ihre MTF-Werte und die apochromatische Korrektur sind sie größtenteils auch für Bildsensoren der nächsten Generation geeignet.

---

[1]

Heynacher E., Köber F.: *Auflösungsvermögen und Kontrastwiedergabe*  
Zeiss Informationen Nr. 51 (auch als Sonderdruck erschienen)



FON : +49 ( 0 ) 671 601-0 ..... FAX : +49 ( 0 ) 671 601-108 ..... E-mail : [foto@schneiderkreuznach.com](mailto:foto@schneiderkreuznach.com)

