

## Abbildungsschärfe II:

### Das photographische Auflösungsvermögen

#### Die Kontrastübertragungsfunktion (MTF) – Das zentrale Element zur Bestimmung des Auflösungsvermögens

Das Auflösungsvermögen unserer Aufnahme- und Ausgabegeräte wird in **Linienpaaren pro Millimeter (Lp/mm)** angegeben. Dieses rein technische Maß mutet auf den ersten Blick seltsam an, weil unsere Motive doch aus mehr oder weniger komplizierten Strukturen, aus sanften oder abrupten Tonwertübergängen und groben bzw. feinen Objektdetails bestehen. Aber wenn wir es herunterbrechen, können wir uns jedes Objekt als Summe peri-

Die hohen Ortsfrequenzen der MTF korrespondieren mit feinen Bilddetails. Je ausgedehnter die Kurve, umso feinere Details werden abgebildet und umso schärfer erscheint das Bild.

odischer Strukturen unterschiedlicher Feinheit und Orientierung vorstellen. Der Auflösungstest mit dem Balkengitter ist nur ein sehr einfaches Beispiel

dafür. Statt seiner abrupten Übergänge von Schwarz zu Weiß müssen wir uns in der Realität nur weiche Übergänge vorstellen. Sie bilden die Objektstruktur, die wir mit unserem Aufnahmesystem abbilden. Auf dem Weg hindurch wird der Kontrast gemäß der **Kontrastübertragungsfunktion (Modulations Transfer Funktion – MTF)** jeder Komponente geschwächt, so daß das resultierende Bild nur noch eine mehr oder weniger gute Entsprechung des Objekts darstellt.

Um zu bestimmen, wie viele Linienpaare eine Systemkomponente auflösen kann, kam lange Zeit der schon bekannte **Balkentest** zum Einsatz. Sein Testmuster wurde z.B. mit der zu prüfenden Optik auf einen möglichst hochauflösenden Film belichtet, an dem dann durch Inaugenscheinahme mittels Lupe oder Mikroskop festgestellt wurde, wie viele **Linienpaare pro Längeneinheit** (in der Regel pro Millimeter) gerade noch zu erkennen waren. Da auf diesem Weg der Auflösungsfeststellung die menschliche Wahrnehmung und Urteilskraft beteiligt waren, ergaben sich zwangsläufig inkonsistente Ergebnisse. Die Anzahl der Linienpaare pro Millimeter wäre aussagekräftiger gewesen, wenn ihre Bestimmung bei einem festgeschriebenen Kontrastniveau erfolgt wäre. Aufgrund der erforderlichen Instrumen-

## Die Kontrastübertragungsfunktion (MTF)

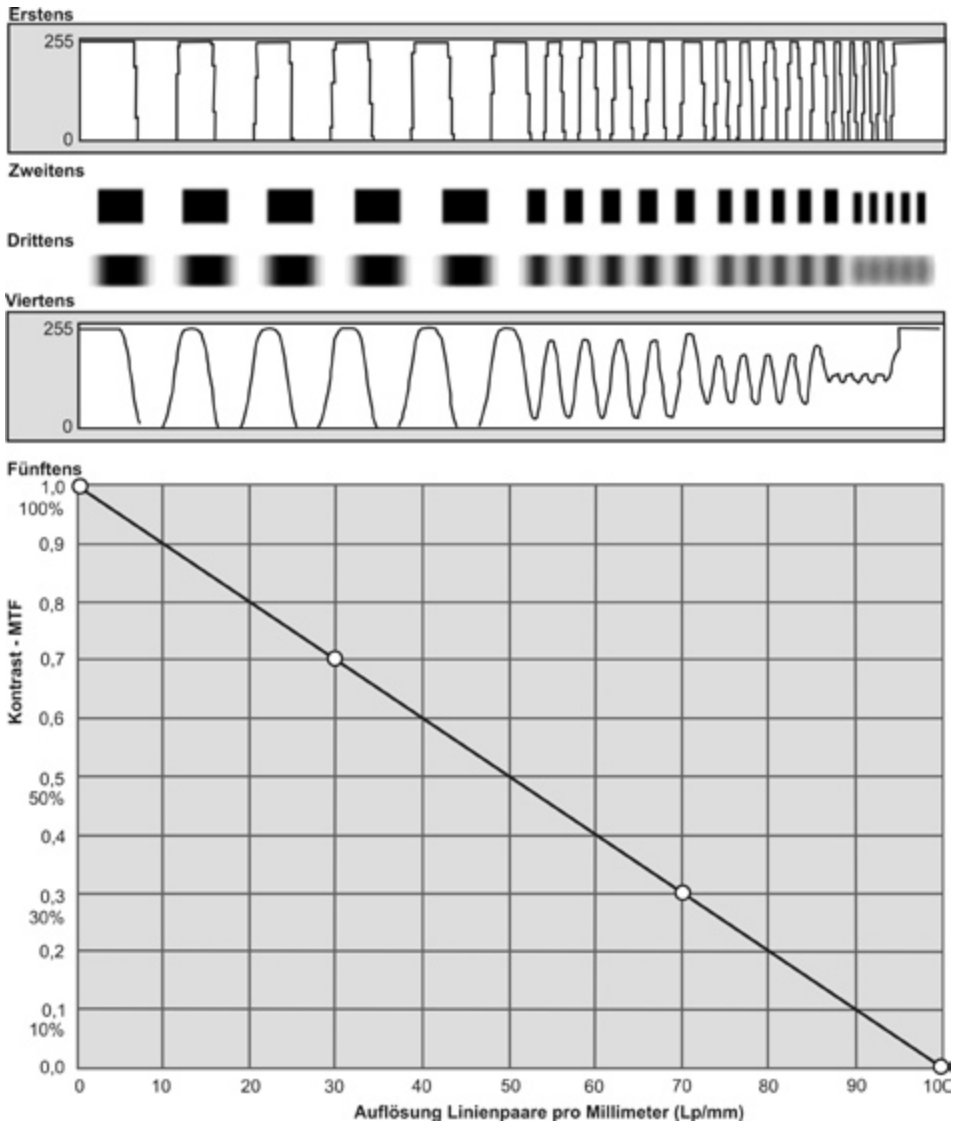


Abb. 40: Herleitung der Modulations Transfer Funktion

## Abbildungsschärfe II:

### Das photographische Auflösungsvermögen

tierung war diese Anforderung aber sehr schwer zu erfüllen.

Erst die Einführung der **Kontrastübertragungsfunktion** (MTF) in den 1940er Jahren bei *Carl Zeiss* in Jena löste das Problem der Auflösungsbestimmung unter Berücksichtigung der wahrgenommenen Schärfe. Die MTF gibt den Kontrast einer zu testenden Ortsfrequenz  $f$  relativ zum Kontrast der geringsten Frequenz an, weil dieser dort 100 % beträgt und man davon ausgehen kann, daß der Kontrast in der Vorlage über alle Frequenzen hinweg konstant ist. Schauen wir uns die mathematischen Bestandteile an, bevor wir zur tatsächlichen Definition der Funktion kommen:

$V_s$  – Die minimale Helligkeit eines schwarzen Bereichs bei der geringsten Ortsfrequenz

$V_w$  – Die maximale Helligkeit eines weißen Bereich bei der geringsten Ortsfrequenz

$V_{Min}$  – Die minimale Helligkeit des Testmusters bei der zu testenden Ortsfrequenz  $f$

$V_{max}$  – Die maximale Helligkeit des Testmusters bei der zu testenden Ortsfrequenz  $f$

$C_{(0)}$  –  $((V_w - V_s) / (V_w + V_s))$  ergibt den Kontrast bei der geringsten Ortsfrequenz

$C_{(f)}$  –  $((V_{max} - V_{Min}) / (V_{max} + V_{Min}))$  ergibt den Kontrast bei der zu testenden Ortsfrequenz  $f$ . Die Division durch den Term  $(V_{Max} + V_{Min})$  reduziert eventuelle Fehler bei der Erfassung des Testmusters

Die **Kontrastübertragungsfunktion** für eine zu testende Ortsfrequenz  $f$  definiert sich dann wie folgt:

#### Formel 28

$$MTF_{(f)} = 100 * C_{(f)} / C_{(0)}$$

Das ist ziemlich theoretisch und man kann sich wenig darunter vorstellen, ich weiß. Anschaulicher wird der Vorgang, wenn wir die MTF auf etwas Greifbares beziehen, so wie es Abb. 40 tut. In 1. sehen wir ein Testmuster aus dunklen und hellen Streifen (Balkentest). Es gibt vier Streifensätze, die jeweils enger beieinanderstehen. In 2. sehen wir ein Profil dieses Testmusters, also eine Darstellung der Helligkeit des Testmusters aus 1. Als Zugeständnis an die unaufhaltsame Digitalisierung bezeichnen wir die größte Helligkeit der weißen Bereiche mit 255 und die geringste der Schwarzen mit 0, denn 0 bis 255 ist der Helligkeitsbereich in einem mit 8 Bit codierten Digitalbild. 3. gibt wieder, wie das Testmuster aussehen könnte, wenn es durch ein Ob-

ektiv abgebildet wird. Die schwarzen und die weißen Bereiche sind verwischt und diese Unschärfe nimmt zu, je enger sie zusammenstehen. 4. zeigt dann das Helligkeitsprofil dieser hypothetischen Abbildung mit den MTF-Werten, die sich daraus ergeben. 5. bringt dies in eine andere Form. Dort steht der MTF-Wert als prozentuale Angabe des Kontrasts an der y-Achse und die Anzahl der Linienpaare pro Millimeter an der x-Achse. Aus der Übertragung der Helligkeitsverteilung in das MTF-Diagramm ist zu erkennen, daß der Abbildungskontrast der groben Strukturen ganz links gleich 1 ist, also 100% beträgt, bei den mittleren auf 0,3 bzw. 30% sinkt und für die sehr feinen Strukturen auf der rechten Seite nur noch 5% beträgt. Unter der Maßgabe, daß eigentlich alle Strukturen, die groben wie die feinen, mit gleich großem Kontrast abgebildet werden sollen, ist die Qualität der Optik besser, je höher der Kontrast im Verhältnis zur Anzahl der Linienpaare pro Millimeter bleibt. Die **maximale Auflösung**, an der wir ja ursächlich interessiert sind, stellen wir dort fest, wo die feinsten Strukturen gerade noch zu erkennen sind. Zur Festlegung von „gerade noch erkennbar“ legt man MTF-Werte zwischen 5% und 2% zugrunde. In unserem Fall sind dies 90 Lp/mm.