

SPATIAL RESOLUTION OF A DIGITAL CCD-CAMERA RÄUMLICHES AUFLÖSUNGSVERMÖGEN EINER DIGITALEN CCD-KAMERA

Manfred Schroeder

DLR-Institut of Optoelectronics
D-8031 Oberpfaffenhofen, Germany
Commission I

ABSTRACT

The spatial resolution of a digital CCD-camera will be described in terms of the optical transfer theory. A reasonable MTF for a linear CCD-detector array will be defined and a threshold modulation curve will be derived from the Signal/Noise Ratio. A relationship between pixel size and spatial resolution in lp/mm will be given for a camera system with a CCD-detector of 10,7 μm pixel size.

ZUSAMMENFASSUNG

Das räumliche Auflösungsvermögen einer digitalen CCD-Kamera wird mit den Begriffen der optischen Übertragungstheorie behandelt. Es wird eine sinnvolle MTF für einen CCD-Detektor definiert und eine Schwellwertfunktion aus dem Signal/Rausch-Verhältnis hergeleitet. Für ein Kamerasystem mit einer linearen CCD-Detektorzeile, deren Pixel 10,7 μm groß sind, wird eine Beziehung zwischen der Pixel-Größe und dem Auflösungsvermögen in lp/mm angegeben.

Keywords

Modulation Transfer Function, Threshold Curve, Spatial Resolution, Digital Camera.

1. EINLEITUNG

Es ist üblich geworden, als Auflösungsvermögen von CCD-Kameras die Größe des Einzeldetektors anzugeben, die auch als 'pixel' (Bildelement) bezeichnet wird. Die dem pixel entsprechende Grundauflösung ergibt sich dann durch Multiplikation mit der Maßstabzahl:

$$\Delta g = a \cdot \frac{H}{f} \quad (1)$$

Δg : Grundauflösung
a : Detektorgröße
H : Flughöhe
f : Brennweite

Bei dieser Definition des Auflösungsvermögens ist es schwierig, einen Vergleich mit photographischen Systemen anzustellen, deren Auflösungsvermögen üblicherweise in Linienpaaren pro Millimeter (lp/mm) angegeben wird. Im folgenden soll deshalb versucht werden, das Auflösungsvermögen von CCD-Systemen mit Hilfe der optischen Übertragungstheorie zu definieren und es in der Einheit lp/mm zu bestimmen.

2. MTF DER DISKRETEN ABTASTUNG

Es stellt sich als erstes die Frage, ob und wie sich einem CCD-Bildempfänger eine Modulationsübertragungsfunktion (MTF) zuordnen läßt, die die Beziehung zwischen Objektfunktion $g_i(x)$ und Bildfunktion $g_o(x)$ herstellt. (Die Indizes i und o stehen für 'input' und 'output'.) Der Einfachheit halber werden Objekt- und Bildfunktion zunächst als eindimensional- nur von der Ortskoordinate x abhängig - angenommen; es wird dann später sehr einfach sein, die Ergebnisse auf den zweidimensionalen Fall zu erweitern.

Mit einem Photodetektor der Kantenlänge a kann man nicht exakt den zum Punkt x gehörigen Funktionswert $g_i(x)$ messen, sondern aufgrund des endlichen Gesichtsfeldes des Detektors nur einen zum Punkt x gehörigen lokalen Mittelwert $\bar{g}_i(x)$ der Funktion $g_i(x)$:

$$\bar{g}_i(x) = \frac{1}{a} \int_{x-a/2}^{x+a/2} g_i(x') dx' \quad (2)$$

Mit Hilfe der Rechteckfunktion

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } -\frac{1}{2} \leq x \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

läßt sich Gl.(2) als Faltung (Convolution) darstellen:

$$\bar{g}_i = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left(\frac{x'}{a} \right) \cdot g_i(x-x') dx' \quad (4)$$

Würde man nun bei der Abbildung die Objektfunktion $g_i(x)$ an allen Stellen x mit einem Photodetektor abtasten, so erhielte man die Bildfunktion $g_o(x)$ gemäß Gl. (4):

$$g_o(x) = \bar{g}_i(x) \quad (5)$$

Diese Art von Abbildung, bei der jedem Punkt der Objektfunktion ein lokaler Mittelwert zugeordnet wird, soll als 'dichte' Abtastung bezeichnet werden. In der Terminologie der optischen Übertragungstheorie besagt Gl. (4), daß die Punktzerstreuungsfunktion (PSF; point spread

function) der 'dichten' Abtastung mit der Abtastöffnung a gegeben ist durch:

$$PSF = \frac{1}{a} \operatorname{rect} \left(\frac{x}{a} \right) \quad (6)$$

Gl.(4) zeigt weiter, daß die Abbildung mittels dichter Abtastung isoplanar ist, d.h. die PSF ist unabhängig vom Bildort; dies ist eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung der optischen Übertragungstheorie. Die zugehörige MTF ergibt sich als Fouriertransformierte der PSF zu:

$$MTF = \frac{\sin \pi \cdot a \cdot v}{\pi \cdot a \cdot v} = \operatorname{sinc} a v \quad (7)$$

v : Ortsfrequenz in x-Richtung in lp/mm

Diese Funktion wird für $v = 1/a$ Null, d.h. eine CCD-Kamera kann praktisch nur Ortsfrequenzen $v < 1/a$ registrieren, woraus folgt, daß die Bildfunktion frequenzbegrenzt ist. Nach dem Abtasttheorem reicht es aus, die Bildfunktion $g_0(x)$ (Gl.5) in äquidistanten Abständen $\Delta x = a/2$ abzutasten, um sie vollständig rekonstruieren zu können.

Tatsächlich werden jedoch bei der Abbildung mittels eines linearen CCD-Chips die Funktionswerte $g_0(x)$ (Gl.5) nur in äquidistanten Abständen $\Delta x = a$ gebildet und über die Strecke a verschmiert. Deshalb ist die durch Abtastung mit einem linearen CCD-Chip entstandene Bildfunktion $g_d(x)$ immer eine Näherung von $g_0(x)$; (der Index d steht für 'diskrete' Abtastung). Diese Art von Abbildung soll als diskrete Abtastung bezeichnet werden. Die einzelnen Schritte dieser Abbildung von der Objektfunktion $g_i(x)$ über die gemittelte Funktion $g_0(x) = \bar{g}_i(x)$ zur Bildfunktion $g_d(x)$ sind in Abb. 1 veranschaulicht.

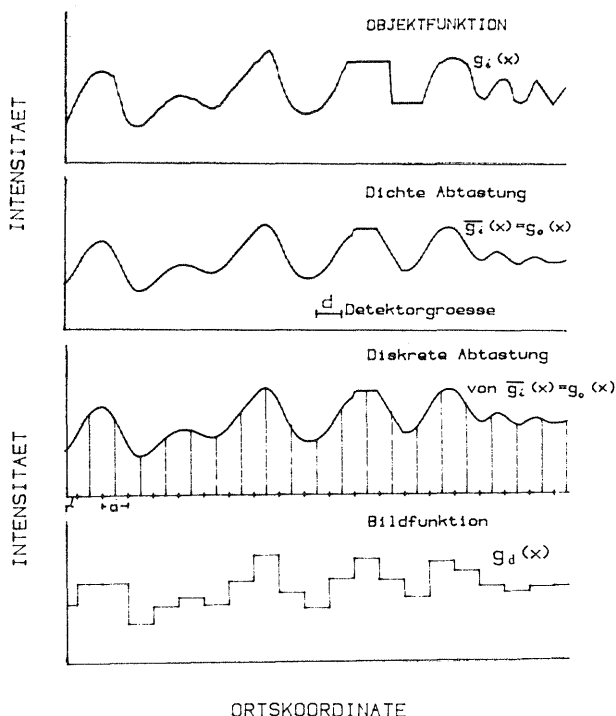


Abb. 1: Abbildung durch diskrete Abtastung mittels einer Photodetektor-Zeile

Bei der diskreten Abtastung werden die Werte der Bildfunktion aus $\bar{g}_i(x)$ (Gl.2) durch Abgreifen an den Stellen

$$x_n = r + (n + 1/2) a \quad (8)$$

gebildet. In Gl.(8) sind:

$n = 0, 1, \dots, N-1$

N : Anzahl der Detektorelemente

$r = [0, a]$; relative Position der Abtastzeile zur Objektfunktion mit Bezug auf ein gemeinsames Koordinatensystem

Je nach relativer Position r , die man auch als Phase bezeichnen kann, ergeben sich unterschiedliche Werte für die Bildfunktion g_d . r kann Werte zwischen $-a/2$ und $+a/2$ annehmen, d.h. erst bei Verschiebung der Zeile um a ergeben sich wieder gleiche Bildfunktionswerte.

Es stellt sich jetzt die Frage, welche der möglichen Bildfunktionen (für die verschiedenen r) man als die 'eigentlichen' betrachten soll. Es liegt nun nahe, den Mittelwert aus allen möglichen Bildfunktionen, die sich durch diskrete Abtastung mit unterschiedlichen Phasenlagen r zwischen $-a/2$ und $+a/2$ ergeben, als die 'eigentliche' Bildfunktion anzusehen.

$$\bar{g}_d = \frac{1}{a} \int_{x-a/2}^{x+a/2} \bar{g}_i(x') dx' \quad (9)$$

Das Integral der Gl.(9) läßt sich entsprechend zu Gl.(4) als Faltung mit der rect -Funktion (Gl.3) darstellen:

$$\bar{g}_d(x) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rect} \left(\frac{x-x'}{a} \right) \bar{g}_i(x') dx' \quad (10)$$

Setzt man $\bar{g}_i(x)$ aus Gl.(4) ein, so erhält man:

$$\bar{g}_d(x) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rect} \left(\frac{x-x'}{a} \right) \operatorname{rect} \left(\frac{x'}{a} \right) dx' \right] g_i(x-x') dx' \quad (11)$$

Das innere Integral in Gl.(11) stellt die Faltung der rect -Funktion mit sich selbst dar, die als Ergebnis die Dreiecksfunktion liefert, die folgendermaßen definiert ist:

$$\Delta(x) = \begin{cases} 1-|x| & \text{für } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (12)$$

Damit erhält man aus Gl.(11)

$$\bar{g}_d = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta \left(\frac{x}{a} \right) g_i(x-x') dx' \quad (13)$$

Aus Gl.(13) ergibt sich aufgrund der optischen Übertragungstheorie als Punktzerstreuungsfunktion der gemittelten Bildfunktion der diskreten Abtastung:

$$PSF_d = \frac{1}{a} \Delta \left(\frac{x}{a} \right) \quad (14)$$

Diese Punktzerstreuungsfunktion (Gl.14) erfüllt die Voraussetzung der Isoplanasie, d.h. sie ist unabhängig vom Bildort. Diese Voraussetzung wäre für jedes Einzelbild nicht gegeben, das ja von der Phase r , d.h. von der relativen Lage zwischen Objekt- und Bildpunkt abhängt. Durch den 'Trick' der über die Phase gemittelten Bildfunktion wird also die Voraussetzung dafür geschaffen, daß man die optische Übertragungstheorie auf diskret abtastende Systeme anwenden darf.

Für die Fouriertransformierte der Dreiecksfunktion gilt:

$$F. T. \{ \Delta x \} = \text{sinc}^2 v$$

Somit ergibt sich als MTF der gemittelten diskreten Abtastung mit einem Detektorelement der Größe a :

$$MTF_d = \text{sinc}^2 a \cdot v = \left(\frac{\sin \pi \cdot a \cdot v}{\pi \cdot a \cdot v} \right)^2 \quad (15)$$

Es wurden bisher der eindimensionale Fall eines Detektorelements der Kantenlänge a behandelt. Für einen wirklichen zweidimensionalen Detektor mit den Seitenlängen a und b ergibt sich dann als Verallgemeinerung von Gl.(15) als zweidimensionale MTF des Detektors:

$$MTF_d = \text{sinc}^2 a \cdot v \cdot \text{sinc}^2 b \cdot \mu \quad (16)$$

μ : Ortsfrequenz in y -Richtung in lp/mm

Als Resultat erhält man also: die MTF der diskreten Abtastung ist das Quadrat der MTF der 'diskreten' Abtastung und verläuft etwas flacher als diese. Die Funktionen sinc und sinc^2 sind in Abb. 2 dargestellt. Die sinc^2 -Funktion als mittlere MTF der diskreten Abtastung berücksichtigt, daß es je nach Phasenlage zwischen Objekt und Detektorzeile 'besser' und 'schlechter' aufgelöste Bildteile geben kann.

Die mittlere MTF der diskreten Abtastung ist nicht geeignet, um aus einer vorgegebenen Objektfunktion exakt die zugehörige Bildfunktion zu berechnen (nur möglich wenn r bekannt), sondern sie hat ihre praktische Bedeutung bei Systemauslegungen, z.B. wenn es darum geht, eine CCD-Kamera mit definierter mittlerer Auflösung zu entwickeln.

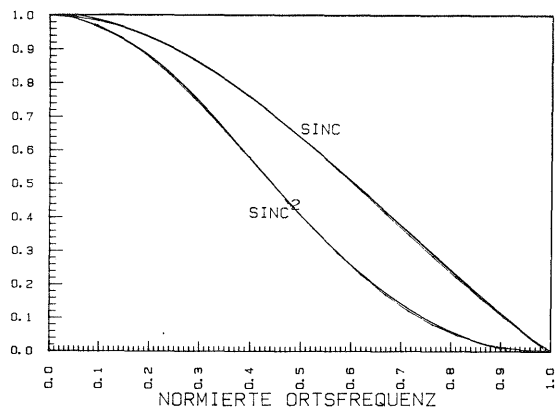


Abb. 2: sinc - und sinc^2 -Funktion. Die Ortsfrequenz ist mit $v_0 = 1/a$ normiert.

3. MTF EINER DETEKTORZEILE MIT SEITLICHEM 'ÜBERSPRECHEN'

Bisher war angenommen worden, daß das auf ein Detektorelement fallende Licht nur an diesem Detektorelement ein Bildsignal erzeugt. Bei einer realen Detektorzeile diffundiert aber ein Teil des Lichtes auch in die beiden benachbarten Detektorelemente und erzeugt auch an diesen jeweils ein Bildsignal. Dieser Effekt wird als 'Übersprechen' (cross talking) bezeichnet. Ein typischer Signalverlauf ist in Abb. 3 wiedergegeben.

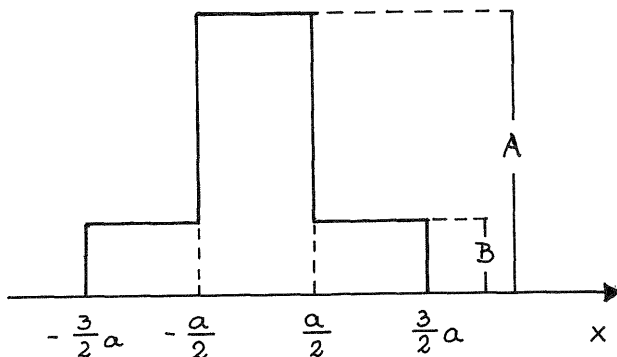


Abb. 3: Verteilung des Bildsignals über drei Detektorelemente, wenn nur der mittlere Detektor ausgeleuchtet ist. A und B zeigt die jeweiligen Signalthöhen an. a: Kantenlänge des Detektorelements.

Der Signalverlauf (Abb. 3) läßt sich darstellen als Summe zweier Rechteckfunktionen

$$\frac{(A-B)}{A} \cdot \text{rect} \left(\frac{x}{a} \right) + \frac{B}{A} \text{rect} \left(\frac{x}{3a} \right) ,$$

bei der die Signalthöhe auf $A = 1$ normiert wurde.

Die zugehörige Punktzerstreuungsfunktion für die dichte Abtastung lautet dann:

$$PSF = \frac{A-B}{A} \frac{1}{a} \text{rect} \left(\frac{x}{a} \right) + \frac{B}{A} \frac{1}{3a} \text{rect} \left(\frac{x}{3a} \right) \quad (17)$$

Durch Mittelung über alle Phasenlagen ergibt sich daraus als Punktzerstreuungsfunktion für die diskrete Abtastung (entsprechend zu Gl.(14)):

$$PSF_d = \frac{A-B}{A} \frac{1}{a} \Delta \left(\frac{x}{a} \right) + \frac{B}{A} \frac{1}{3a} \Delta \left(\frac{x}{3a} \right) \quad (18)$$

Die mittlere MTF der diskreten Abtastung ergibt sich aus Gl.(18) durch Fouriertransformation (entsprechend zu Gl.(15)):

$$MTF_d = \frac{(A-B)}{A} \text{sinc}^2 a v + \frac{B}{A} \text{sinc}^2 3a v \quad (19)$$

An einem linearem CCD-Chip vom Typ TC-104, der eine Pixelgröße von $10.7 \mu\text{m} \times 10.7 \mu\text{m}$ hat, wurden folgende Werte für das Übersprechen gemessen:

$$\frac{A-B}{A} = 0.75 \quad \frac{A}{B} = 0.25$$

Mit diesen Werten ist die MTF nach Gl.(19) in Abb. 4 im Vergleich mit der sinc^2 -Funktion aufgetragen.

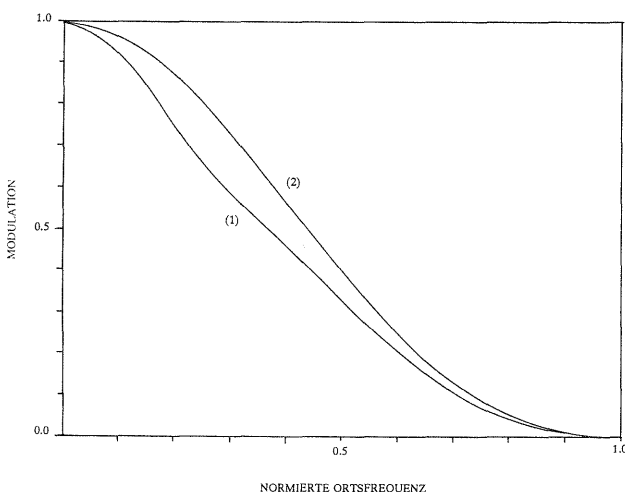


Abb. 4: MTF der diskreten Abtastung (1) für eine reale Detektorzeile mit Übersprechen. Im Vergleich dazu die sinc^2 -Funktion als MTF ohne Übersprechen (2).

4. SCHWELLWERTFUNKTION

Zwischen der auf einen Photodetektor fallenden Strahlung I und dem Detektorausgangssignal S besteht über einen weiten Dynamikbereich der einfallenden Strahlung ein linearer Zusammenhang:

$$S = R \cdot I \quad (20)$$

mit:

S: Detektorsignal, das als Strom, Spannung oder digitaler Zahlenwert angegeben werden kann

I: auf dem Detektor fallende Strahlungsleistung

R: Proportionalitätskonstante, die auch als Empfindlichkeit (responsivity) bezeichnet wird.

S und I in Gl.(20) sind als Mittelwerte anzusehen: belichtet man nämlich den gleichen Detektor nacheinander mit einer Lichtquelle der mittleren Strahlungsleistung I , so schwankt das Ausgangssignal um den Mittelwert S mit der Standardabweichung σ_s . Die Ursache für die statistische Verteilung des Ausgangssignals sind mehrere sich überlagernde, statistisch verlaufende atomare Übergangsprozesse im Detektor und seiner angeschlossenen Elektronik. Die Schwankungen des Ausgangssignals werden als Rauschen bezeichnet. Als Signal/Rausch-Verhältnis (Signal/Noise Ratio) wird der Quotient aus Signal und Standardabweichung bezeichnet:

$$SNR = \frac{S}{\sigma_s} \quad (21)$$

Um zu sehen, wie sich das Rauschen auf das Erkennen kleiner Signalunterschiede auswirkt, werden zwei nebeneinander liegende Detektorelemente (Abb. 5) mit den mittleren erwarteten Ausgangssignalen S_1 und S_2 betrachtet. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit soll $S_2 > S_1$ sein.

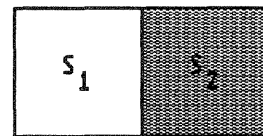


Abb. 5: Zwei nebeneinander liegende Detektorelemente einer CCD-Zeile mit den Signalen S_1 und S_2 .

Jedes Signal ist vom Rauschen σ_s überlagert; für die Trennung ist der Signalunterschied $\Delta S = S_2 - S_1$ von Bedeutung, dessen Rauschen sich dann zu $\sqrt{2} \cdot \sigma_s$ ergibt. Damit der Signalunterschied erkennbar wird, muß gelten

$$\Delta S \geq q \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_s \quad (22)$$

q ist ein Zahlenfaktor, der die Güte der Trennbarkeit angibt: für

q = 2 ist die Wahrscheinlichkeit für die Trennbarkeit ($\Delta S > 0$) 92 %, für q = 3 ergibt sich 98 %.

Den Signalen S_1 und S_2 kann man über die Empfindlichkeitskurve (Gl.20) die wirksamen Eingangssignale

$$I_{w1} = \frac{S_1}{R} \quad \text{und} \quad I_{w2} = \frac{S_2}{R}$$

bzw. die wirksame Eingangsmodulation

$$M_w = \frac{I_{w2} - I_{w1}}{I_{w1} + I_{w2}} = \frac{\Delta I_w / 2}{I_m} = \frac{\Delta S / 2}{S_m} \quad (23)$$

$$\text{mit} \quad I_m = \frac{I_{w1} + I_{w2}}{2}$$

$$S_m = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

zuordnen.

M_w ist nicht die tatsächlich auf die Detektoren fallende Eingangsmodulation M_i , da die Empfindlichkeitskurve (Gl.20) nur für den Fall verschwindender Ortsfrequenz ($\nu = 0$) gilt. Da aber zwei nebeneinander liegende Detektoren mit unterschiedlichen Eingangssignalen betrachtet werden, kann der Einfluß der Ortsfrequenz ($\nu \neq 0$) nicht mehr vernachlässigt werden. In diesem Fall gilt:

$$\frac{M_w}{M_i} = MTF_d \quad (24)$$

MTF_d ist die Modulationsübertragungsfunktion der Detektorzeile und ist im Fall der diskreten Abtastung ohne Übersprechen durch Gl.(15) und im Fall mit Übersprechen durch Gl.(19) gegeben.

Aus Gl.(23) und Gl.(24) erhält man:

$$\Delta S = 2 S_m \cdot M_i \cdot MTF_d \quad (25)$$

Eine auf die zwei Detektorelemente fallende Eingangsmodulation M_i der Ortsfrequenz ν erzeugt den nach Gl.(25) gegebenen Signalunterschied ΔS . Setzt man Gl.(25) in Gl.(22) ein, so ergibt sich für M_i :

$$M_i \geq q \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{1}{S_m / \sigma_m} \cdot \frac{1}{MTF_d} \quad (26)$$

Setzt man nun $M_i = M_s$, wobei M_s die auf die Detektoren fallende Mindest-Modulation der Ortsfrequenz ν ist, die notwendig ist, um einen gerade noch erkennbaren Signalunterschied ΔS zu erzeugen, so erhält man die Schwellwertfunktion der Detektorzeile:

$$M_s = q \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{1}{S_m / \sigma_s} \cdot \frac{1}{MTF_d} \quad (27)$$

Die Schwellwertfunktion hängt vom Zahlenfaktor q und vom Signal-Rausch-Verhältnis

$$SNR = \frac{S_m}{\sigma_s}$$

ab. Für praktische Anwendungen kann man q = 2 setzen, d.h. die Wahrscheinlichkeit für die Trennbarkeit der Signalunterschiede beträgt 92 %. Für ein mittleres Signal S_m erhält man aus panchromatischen Weltraumaufnahmen, die mittels CCD-Kamera mit 8 bit digitalisiertem Ausgangssignal gewonnen wurden, als realistischen Wert für das SNR die Zahl 50 : 1. Mit verbesserten CCD-Kameras dürfte in Zukunft auch ein SNR von 100 : 1 erreichbar sein. Im folgenden Abschnitt wird deshalb auch untersucht, welche Auswirkung die Verdopplung des SNR auf das räumliche Auflösungsvermögen hat.

5. BESTIMMUNG DES AUFLÖSUNGSVERMÖGENS

Sei die durch die CCD-Kamera abzubildende Intensitätsmodulation M_i , die durch die Linse und die Bildwanderung (nur in Flugrichtung) noch abgeschwächt wird; damit das von M_i hervorgerufene Signal ΔS noch als getrennt erkannt werden kann, muß gelten: $M_i \cdot MTF_L \cdot MTF_B = M_s$. Eingesetzt in Gl.(27) ergibt:

$$MTF_L \cdot MTF_B = \frac{1}{M_i} \cdot q \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{1}{S_m / \sigma_s} \cdot \frac{1}{MTF_d} \quad (28)$$

MTF_L : Modulationsübertragungsfunktion der Linse

MTF_B : Modulationsübertragungsfunktion der Bildwanderung

Gl.(28) kann man zur Bestimmung des Auflösungsvermögens benutzen: links steht die MTF des Systems (ohne Detektor) und rechts die Schwellwertfunktion der Detektorzeile für die jeweilige Modulation M_i . Die Lösung geschieht graphisch (Abb. 6). Die Auflösung für hohen Kontrast ergibt sich für $M_i = 1$ und für niedrigen Kontrast für $M_i = 0.23$. Als Beispiel wird eine Kamera mit einer CCD-Detektorzeile genommen, deren quadratische Detektorelemente die Kantenlänge $a = 10.7 \mu\text{m}$ haben.

Es wird weiter angenommen, daß die Bildwanderung in Flugrichtung gerade einem Detektorelement (pixel) entspricht. Dann ist die MTF der Bildwanderung gegeben durch:

$$MTF_B = \text{sinc } a \cdot \nu$$

1. Beispiel (Abb. 6): ° Beugungsbegrenzte Optik mit einem Öffnungsverhältnis 1 : 5.6

° CCD-Detektorzeile ohne Übersprechen

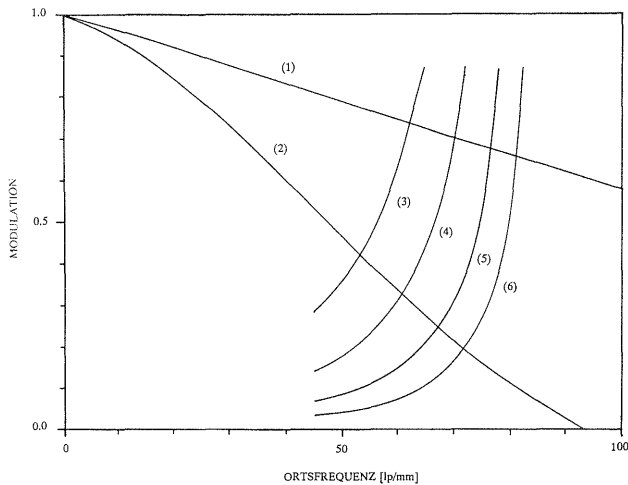


Abb. 6: Bestimmung des Auflösungsvermögens einer CCD-Kamera durch Schnitt der System-MTF mit der Schwellwertkurve des Detektors. (1) MTF der Optik; (2) MTF der Optik mit Bildwanderung (in Flugrichtung); (3) Schwellwert für niedrigen Kontrast und SNR=50 (4) Schwellwert für niedrigen Kontrast und SNR=100 (5) Schwellwert für hohen Kontrast und SNR=50 (6) Schwellwert für hohen Kontrast und SNR=100

Aus Abb. 6 erhält man folgende Auflösungswerte:

SNR = 50

M_i	in Flugrichtung	quer zur Flugrichtung	Mittelwert	pixel/ lp
0.23	53 lp/mm	62 lp/mm	57 lp/mm	1.6
1.00	67 lp/mm	76 lp/mm	71 lp/mm	1.3

SNR = 100

M_i	in Flugrichtung	quer zur Flugrichtung	Mittelwert	pixel/ lp
0.23	61 lp/mm	70 lp/mm	65 lp/mm	1.4
1.00	72 lp/mm	81 lp/mm	75 lp/mm	1.2

2. Beispiel (Abb. 7):
 ° Reale Linsenoptik mit einem Öffnungsverhältnis 1 : 5.6
 ° CCD-Detektorzeile mit seitlichem Übersprechen (Abb. 3)

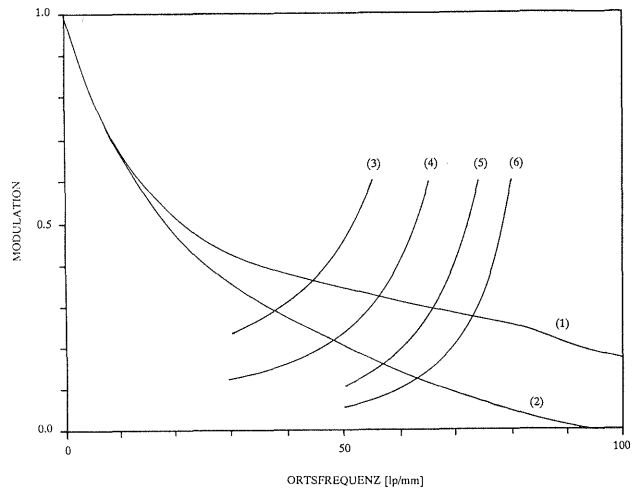


Abb. 7: Bestimmung des Auflösungsvermögens einer CCD-Kamera durch Schnitt der System-MTF mit der Schwellwertkurve des Detektors. (1) MTF der Optik (2) MTF der Optik mit Bildwanderung (in Flugrichtung) (3) Schwellwert für niedrigen Kontrast und SNR=50 (4) Schwellwert für niedrigen Kontrast und SNR=100 (5) Schwellwert für hohen Kontrast und SNR=50 (6) Schwellwert für hohen Kontrast und SNR=100

Aus Abb. 7 erhält man folgende Auflösungswerte:

SNR = 50

M_i	in Flugrichtung	quer zur Flugrichtung	Mittelwert	pixel/ lp
0.23	38 lp/mm	45 lp/mm	41 lp/mm	2.3
1.00	57 lp/mm	66 lp/mm	61 lp/mm	1.5

SNR = 100

M_i	in Flugrichtung	quer zur Flugrichtung	Mittelwert	pixel/ lp
0.23	48 lp/mm	56 lp/mm	52 lp/mm	1.8
1.00	63 lp/mm	73 lp/mm	68 lp/mm	1.4

3. Beispiel:
 ° Beugungsbegrenzte Optik mit einem Öffnungsverhältnis von 1 : 5.6
 ° CCD-Detektorzeile mit Übersprechen

SNR = 50

M_i	in Flug- richtung	quer zur Flugrich- tung	Mittelwert	pixel/ lp
0.23	50 lp/mm	58 lp/mm	54 lp/mm	1.7
1.00	65 lp/mm	75 lp/mm	70 lp/mm	1.3

SNR = 100

M_i	in Flug- richtung	quer zur Flugrich- tung	Mittelwert	pixel/ lp
0.23	58 lp/mm	67 lp/mm	62 lp/mm	1.5
1.00	70 lp/mm	81 lp/mm	75 lp/mm	1.2

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus den ermittelten Auflösungswerten lassen sich die folgenden Schlußfolgerungen ziehen:

- Im Fall einer realen CCD-Kamera (2. Beispiel) mit $10.7 \mu\text{m}$ pixel-Größe ergibt sich für niedrigen Kontrast folgende Relation zwischen pixel und lp:

$$1 \text{ lp} \triangleq 2.3 \text{ pixel}$$

- Bei Verdopplung des Signal/Rausch-Verhältnis läßt sich das Auflösungsvermögen bei niedrigem Kontrast und 'normaler' Optik um ca. 25 % steigern; bei guter Optik um ca. 15 %.
- Mit einer guten Optik (3. Beispiel) läßt sich das Auflösungsvermögen bei niedrigem Kontrast um ca. 30 % steigern. Es läßt sich damit folgende Relation erzielen:

$$1 \text{ lp} \triangleq 1.7 \text{ pixel}$$

- Das Übersprechen in der Detektorzeile hat bei einer guten Optik geringen Einfluß auf das Auflösungsvermögen (1. und 3. Beispiel)
- Der Unterschied im Auflösungsvermögen zwischen hohem und niedrigem Kontrast liegt abhängig von Güte der Optik und von der Höhe des Signal/Rausch-Verhältnisses zwischen 10 und 20 lp/mm.
- Bei nahezu beugungsbegrenzter Optik und bei gesteigertem Signal/Rausch-Verhältnis kann man mit digitalen CCD-Kameras in etwa das gleiche Auflösungsvermögen wie mit photographischen Systemen erzielen.

CONCLUSIONS

From the obtained resolving power values the following conclusions can be drawn:

- For a real CCD-camera with detector elements of $10.7 \mu\text{m}$ pixel size the following relation between pixel and lp for low contrast can be derived:

$$1 \text{ lp} \triangleq 2.3 \text{ pixel}$$

- Doubling the signal/noise ratio increases the resolving power for low contrast and 'normal' optics by approx. 25 %; with a high quality optics the increase is approx. 15 %.

- With high quality optics the resolving power for low contrast can be increased by 30 %. Thus the following relation can be achieved:

$$1 \text{ lp} \triangleq 1.7 \text{ pixel}$$

- The 'cross talking' between adjacent detector elements is for a system with high quality optics of minor influence on the resolving power.

- The difference in resolving power between low and high contrast is in the range of 10 to 20 lp/mm (depending on the quality of the optics and on the signal/noise ratio).

- With a nearly diffraction limited optics and with an improved signal/noise ratio the resolving power of a digital CCD-camera is approx. equal to that of a photographic system.