

Eine neue Methode zur Bestimmung der MTF aus dem Kantenbild

Lei Fang und H.J. Tiziani

Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart *)

Eingegangen am 5. März 1986

Inhalt

Zur Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) photographischer Systeme wurde eine neue und relativ einfache Methode der Kantenbildanalyse entwickelt. Statt, wie üblich, das Kantenbild zu differenzieren, kann die MTF als Quotient der Ortsfrequenzspektren des abgetasteten Kantenbildes und der idealen Kante berechnet werden. Zur Elimination der vom Abschneiden der Kantenfunktionen herrührenden Störeinflüsse werden die Kanten mit der sogenannten Hanning-Funktion multipliziert, bevor die Fourier-Analyse durchgeführt wird. Die Methode wird auch mit der computer-simulierten Kantenfunktion untersucht. Das Ergebnis stimmt sehr gut mit der erwarteten MTF überein. Einige Beispiele mit dieser Methode werden gezeigt und diskutiert.

Abstract

A new method for determining the modulation-transfer function from edge traces. A new and relatively simple method for edge gradient analysis has been developed to determine the modulation-transfer function (MTF) of photographic systems. The modulation-transfer function can be calculated as the ratio of the amplitude of those frequencies present in the original edge to the amplitude of the same frequency in the scanned edge trace. Thus a differentiation of the edge scan - as usually implemented - is not necessary. In order to employ a Fourier analysis the edge trace had to be spatially truncated. In order to eliminate the resulting disturbances we multiplied the edge trace by the so called Hanning function before performing the Fourier analysis. The method was tested by a simulated edge trace. The result fits very well to the expected MTF. Some examples are presented and discussed.

1. Einleitung

Zur Beurteilung der Bildqualität von Luftbildern eignet sich die optische Übertragungsfunktion. Sie setzt sich zusammen aus der Übertragungskette der Glieder des photographischen Systems. Dabei sollen die Kamera, der Film, die Bildbewegung (falls kein Kompensationssystem für die Bewegung des Flugzeuges in die Kamera eingebaut ist), Schwingungen und die Atmosphäre berücksichtigt werden [1]. Die optische Übertragungsfunktion des gesamten Systems kann durch Bildanalyse der Bilder von z. B. am Boden ausgelegten Testtafeln erfolgen. Kölbl [2]

verwendete Testtafeln mit Rechteckrastern mit ortsabhängiger Periode. Als Modell des Punktbildes verwendet er eine Kombination zweier Gaußfunktionen. Die resultierende MTF kann auch aus abgebildeten Kantenbildern z. B. Dach- und Hauskanten, Straßenrändern und Schatten ermittelt werden. Die Verwaschungsfunktion kann durch Differentiation des abgetasteten Kantenbildes erhalten werden. Aus der Fouriertransformation der Verwaschungsfunktion folgt die MTF des photographischen Systems [3, 4, 5]. Beim Auswerteverfahren von F. Scott, R. M. Scott und R. V. Shack [6] werden aus dem Kantenbild Rechteckraster unterschiedlicher Ortsfrequenz zusammengesetzt und nach rechnerischer Korrektur die Kantenmethode somit formal auf die Sinusrastermethode zurückgeführt. Die MTF des ganzen Systems ergibt sich auch aus dem Verhältnis der Amplituden des Fourier-Spektrums des abgetasteten Kantenbildes zum Fourier-Spektrum der idealen Kante. In diesem Artikel wird eine neuartige Rechenmethode zur Bestimmung der MTF aus dem Kantenbild gegeben. Das Rechenergebnis der MTF aus der computersimulierten Kantenfunktion wird mit der aus dem Punktbild verglichen. Schließlich werden einige Meßergebnisse beispielhaft diskutiert.

2. Beschreibung der Methode

Für die Beschreibung des Bildes für ortsinvariante, lineare Systeme eignet sich das Faltungsgesetz:

$$B'(u', v') = \iint_{-\infty}^{\infty} B(u, v) \cdot G(u' - u, v' - v) \, du \, dv \\ = B(u', v') * G(u', v') \quad (1)$$

wobei $B(u, v)$, $B'(u', v')$ Intensitätsverteilungen im Objekt bzw. Bild und $G(u', v')$ die Verwaschungsfunktion sind.

Nach dem Faltungsgesetz der Fouriertheorie wird aus der Faltung im Ortsbereich eine Multiplikation im Ortsfrequenzbereich:

$$b'(R, S) = b(R, S) \cdot g(R, S) \quad (2)$$

$b'(R, S)$, $b(R, S)$ und $g(R, S)$ sind die Fouriertransformierten von $B'(u', v')$, $B(u, v)$ und $G(u', v')$.

*) Pfaffenwaldring 9, 7000 Stuttgart 80.

Aus der Definition ergibt sich die MTF:

$$T(R, S) = |g(R, S)| = \left| \frac{b'(R, S)}{b(R, S)} \right| \quad (3)$$

Die MTF wird im allgemeinen für $R = 0, S = 0$ zu 1 normiert. Die Gleichung (3) besagt, daß die Fouriertransformierten vom Objekt bzw. Bild und ihr Quotient zur Bestimmung der MTF berechnet werden müssen.

Bei diesem Verfahren mit Divisionsrechnung ist jedoch eine direkte numerische Fouriertransformation nicht durchführbar, weil die verwendeten Kanten nicht unendlich ausgedehnt sein können und mit einem rechteckigen Fenster abgeschnitten, mit anderen Worten mit einer Rechteckfunktion multipliziert werden. Dadurch ergeben sich Schwingungen der Spektren der begrenzten Kante mit Nulldurchgängen im Ortsfrequenzbereich. Daraus resultieren Schwierigkeiten bei der Division der Fouriertransformierten des Kantenbildes durch die Fouriertransformierte der idealen Kante. Letztere ist null bei geradzahlig höheren harmonischen Frequenzen. Die ideale abgeschnittene Kantenfunktion kann beschrieben werden durch

$$K(u) = \begin{cases} 0 & 0 < u < L/2 \\ 1 & L/2 < u < L \end{cases} \quad (4)$$

wobei L die Länge der abgeschnittenen Kante ist.

Wenn diese abgeschnittene Kante als die Periode einer periodischen Funktion mit Kanten betrachtet wird, was für die numerische Fouriertransformation erforderlich ist, kann sie nach der Fourier-Reihe entwickelt werden. Die Reihenentwicklung der abgeschnittenen periodischen Kanten der Periode L ist:

$$K(u) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \left[\sin(\omega_0 u) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_0 u) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_0 u) + \dots \right] \quad (5)$$

wobei $\omega_0 = 2\pi/L$ ist.

In Gl. (5) fällt auf, daß die Amplituden der geradzahlig höheren harmonischen Ordnungen von ω_0 null sind. Offensichtlich ist das rechteckige Fenster für diese Methode nicht geeignet. Die Hanning-Funktion [7] eignet sich als einfaches Fenster, um die Division durch Null zu vermeiden. In Abb. 1 werden diese Funktion und ihr Spektrum gezeigt.

Die Hanning-Funktion kann geschrieben werden als

$$H(u) = \begin{cases} 1/2 - 1/2 \cos(2\pi u/L) & 0 < u < L \\ 0 & u < 0, u > L \end{cases} \quad (6)$$

Die Fouriertransformation ergibt:

$$h(R) = \frac{1}{2} Q(R) - \frac{1}{4} \left[Q\left(R + \frac{1}{L}\right) + Q\left(R - \frac{1}{L}\right) \right] \quad (7)$$

wobei $Q(R) = \frac{\sin(\pi LR)}{\pi R}$ ist.

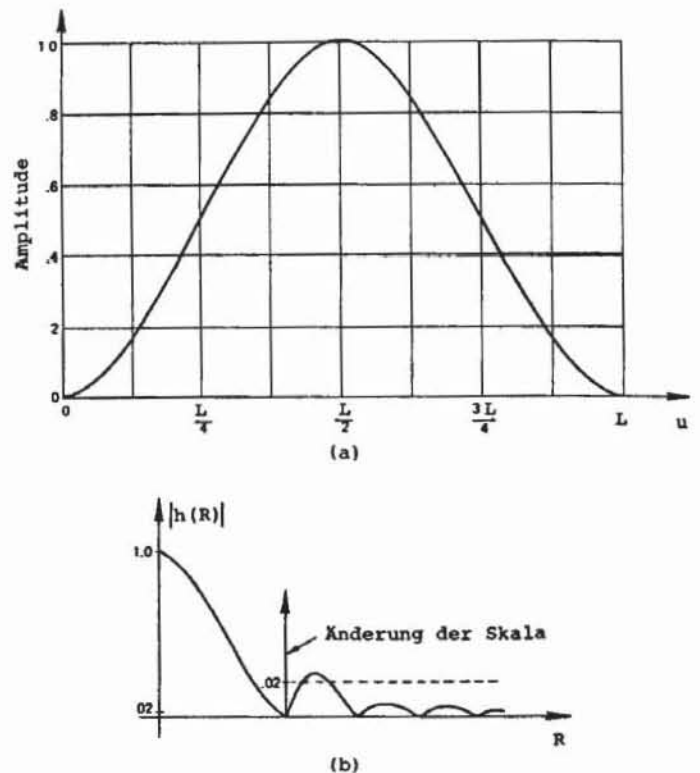


Abb. 1. (a) Hanning-Funktion
(b) Spektrum der Hanning-Funktion.

Nach der Multiplikation mit der Hanning-Funktion ist die Kantenfunktion:

$$K(u) = \begin{cases} 0 & 0 < u < L/2 \\ 1/2 - 1/2 \cos(2\pi u/L) & L/2 < u < L \end{cases} \quad (8)$$

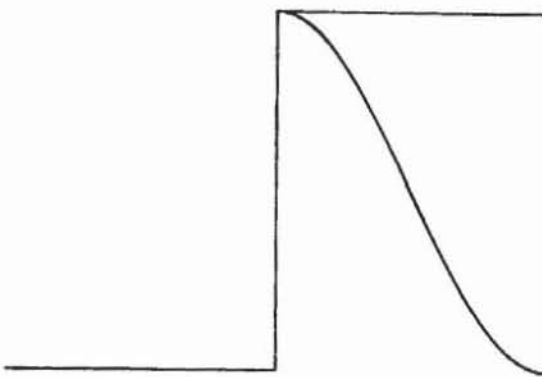
Die Fourier-Reihenentwicklung ergibt:

$$K(u) = \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \cos(\omega_0 u) + \frac{2}{3\pi} \sin(2\omega_0 u) + \frac{4}{15\pi} \sin(4\omega_0 u) + \dots - \frac{1}{\pi} \left[\sin(\omega_0 u) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_0 u) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_0 u) + \dots \right] \quad (9)$$

Im Vergleich zu Gl. (5) enthält die obenstehende Gleichung die Anteile der geradzahlig höheren harmonischen Ordnungen von ω_0 , die ungeradzahlig Ordnungen von ω_0 bleiben unverändert, wenn die Amplituden des konstanten Anteils in beiden Gleichungen auf eins normiert werden. In Abb. 2 sind die Kantenfunktion und die entsprechenden Spektren mit und ohne Multiplikation mit der Hanning-Funktion gezeichnet.

Das Spektrum der mit Hanning-Funktion multiplizierten Kante ergibt eine glatte Kurve, mit der die Einhüllende des Spektrums ohne Multiplikation mit der Hanning-Funktion übereinstimmt. Durch Multiplikation mit der Hanning-Funktion im Ortsbereich verschwinden die Schwingungen im Spektrum im Ortsfrequenzbereich. Die

Intensitätsverteilung der idealen Kante



Spektren der idealen Kante

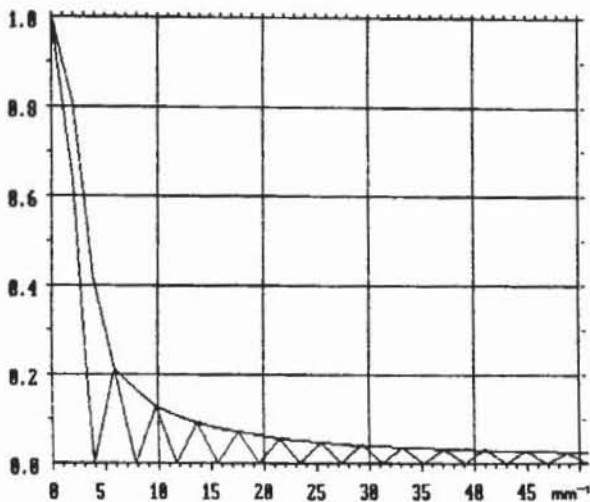


Abb. 2. Kantenbilder mit Hanning-Funktion und ihre Spektren.

Amplituden der geradzahigen höheren harmonischen Ordnungen sind nicht mehr gleich null. Man kann noch andere Funktionen als Fenster verwenden [8]. Sie müssen zwei Bedingungen erfüllen, nämlich einen glatten stetigen Verlauf haben und sollen an den Rändern Null sein. Die Hanning-Funktion ist aber besonders einfach zur Ermittlung der MTF aus dem Kantenbild. Sowohl die ideale Kante als auch das verwaschene Kantenbild werden vorzugsweise vor der Fouriertransformation mit der Hanning-Funktion multipliziert. Man wird nachweisen, daß die Multiplikation der Kantenfunktionen mit der Hanning-Funktion keinen Einfluß auf die MTF hat.

Werden die Kantenfunktionen im Objekt mit $K(u)$ bzw. im Bild mit $K'(u')$ und die nach der Multiplikation mit der Hanning-Funktion gebildeten Kantenfunktionen im Objekt mit $K_h(u)$ bzw. im Bild $K'_h(u')$ bezeichnet, so ist ihre Beziehung:

$$\begin{aligned} K'_h(u') &= K'(u') \cdot H(u') = [K(u') * G(u')] \cdot H(u') \\ &= \int [K(u) \cdot H(u')] \cdot G(u' - u) du \\ &= [K(u') \cdot H(u')] * G(u') = K_h(u') * G(u') \end{aligned} \quad (10)$$

Gemäß Gln. (3) und (10) gilt für die MTF:

$$T(R) = |FT [G(u')]| = \left| \frac{FT [K'_h(u')]}{FT [K_h(u)]} \right| \quad (11)$$

Es gilt auch: $T(R) = \left| \frac{FT [K'(u')]}{FT [K(u)]} \right|$

Daraus folgt, daß aus den Kantenfunktionen mit und ohne Multiplikation mit der Hanning-Funktion die gleiche MTF erhalten wird, allerdings ohne die Probleme, die bei der Division durch Null auftreten.

In Abb. 3 wird der Vorgang der Rechnung im Diagramm dargestellt. Bevor die ideale Kante und das verwaschene Kantenbild fouriertransformiert werden, müssen sie jeweils mit der Hanning-Funktion multipliziert werden, um die nachfolgende Division durchführen zu können.

Aus Gl. (11) folgt, daß sich die MTF nicht ändert, wenn die ideale Kante und das verwaschene Kantenbild auf gleiche Weise behandelt werden.

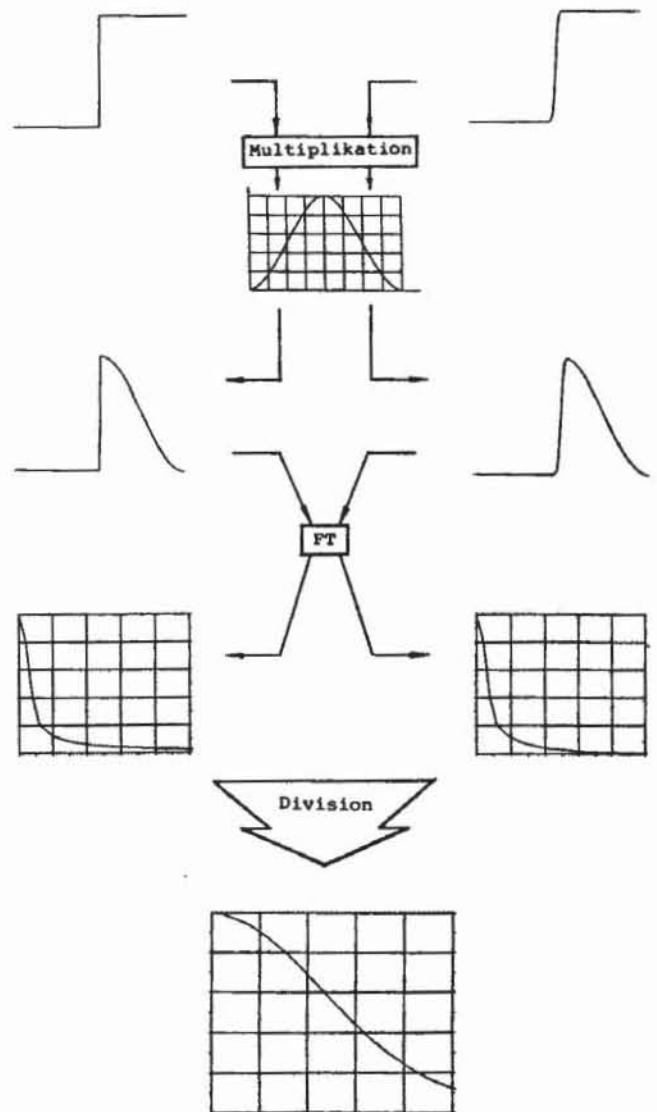


Abb. 3. Diagramm zur Rechnung der MTF mit Hilfe der Hanning-Funktion.

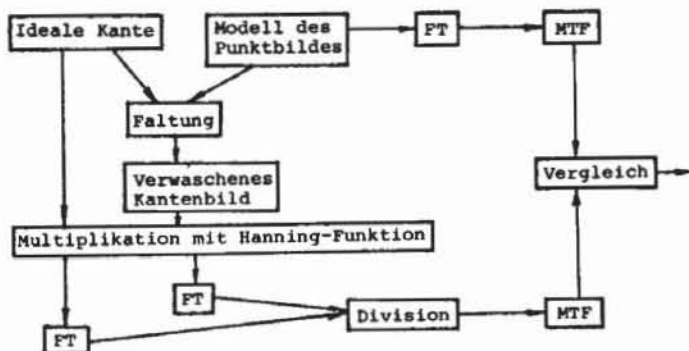


Abb. 4. Diagramm zum Vergleich der MTF aus Punktbild und Kantenfunktion.

Abb. 4 zeigt schematisch den Vergleich der Berechnung der MTF aus Punktbild und Kantenbild unter Verwendung der Hanning-Funktion. Dabei wird die MTF aus dem Punktbild bzw. aus dem Kantenbild ermittelt.

Die ideale Kante wird mit dem Modell des Punktbildes, das z. B. eine Gaußfunktion sein kann, gefaltet. Dadurch erhält man das zum Test verwendete verwaschene Kantenbild. Die Fouriertransformation des Modells des Punktbildes ergibt die MTF. Sie wird mit der MTF, die mit der in diesem Artikel beschriebenen Methode berechnet wird, verglichen. Gute Übereinstimmung der zwei Methoden konnte gefunden werden, was die Verwendung der Hanning-Funktion unterstützt.

3. Messung und Auswertung der Kantenbilder

Für die Anwendung der hier vorgeschlagenen Methode wird die Bestimmung der MTF photographischer Systeme beispielhaft angeführt. Ein Rechenprogramm ist für die Messung und Auswertung von Kantenbildern aus photographischen Luftaufnahmen entwickelt worden. Die MTF photographischer Systeme wurde wie folgt ermittelt:

(1) Das ausgewählte Kantenbild wird mit Hilfe eines rechnergesteuerten Mikrodensitometers mehrmals abgetastet und eine Mittelung mehrerer Messungen wird vorgenommen, um den Einfluß der Körnung des Films zu minimieren.

(2) Der Einfluß des Mikrodensitometers muß gegebenenfalls berücksichtigt werden. Diese kann ebenfalls mit der in diesem Artikel beschriebenen Methode ermittelt werden, indem eine bekannte Präzisionskante als Testobjekt mit dem Mikrodensitometer abgetastet wird.

(3) Der korrigierte Verlauf der Filmtransmission wird über die Schwärzungskurve in den Verlauf der sogenannten effektiven Belichtung umgerechnet.

(4) Die MTF photographischer Systeme wird als Quotient der Ortsfrequenzspektren von dem abgetasteten Kantenbild und der idealen Kante bestimmt.

In Abb. 5 werden eine gemessene und eine mit der Gauß-Funktion korrigierte MTF-Kurve, die aus einer Hausdachkante ermittelt wurden, wiedergegeben. Wie bei anderen Kantenmethoden [3] gibt es auch hier durch das Filmkorn verursachte Verzerrungen der gemessenen MTF-Kurve. Mit der Methode von Blackman [9] (Faltung der

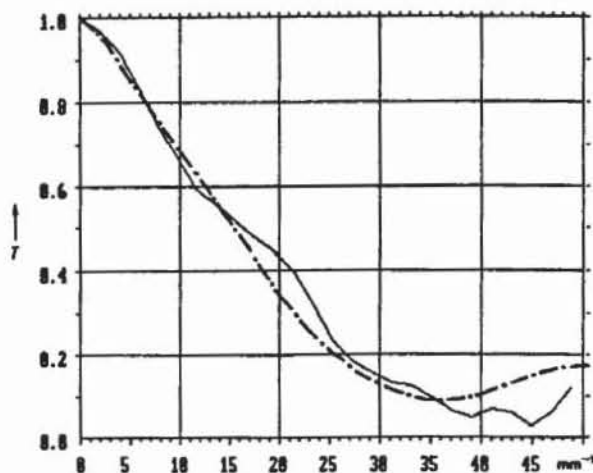


Abb. 5. MTF aus einer Hausdachkante
— gemessene Kurve
- - - verbesserte Kurve

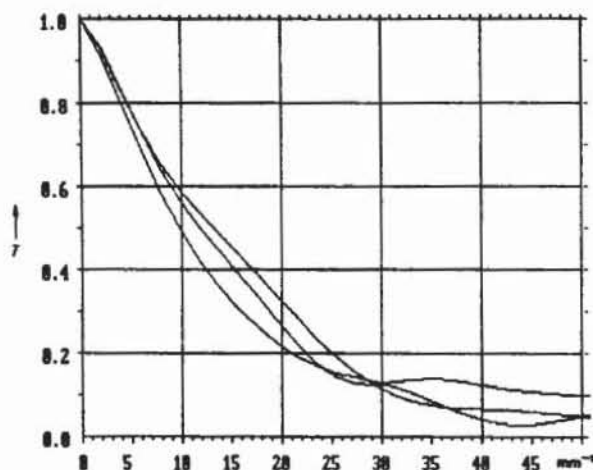


Abb. 6. MTF-Kurven für einen Bildfeldbereich.

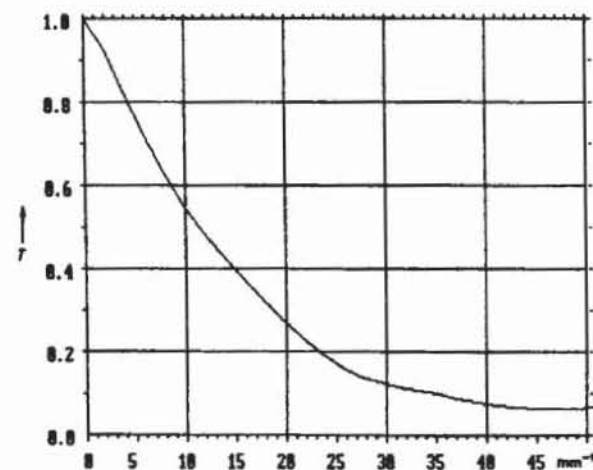


Abb. 7. Mittelwert der MTF für einen Bildfeldbereich.

gemessenen MTF-Kurve mit einer Gauß-Funktion) kann das Rauschen der gemessenen MTF-Kurve unterdrückt werden.

In Abb. 6 wurde eine Kante, die durch ein Hausdach entstanden ist (Übergang: Von der Sonne beleuchtete Seite - Schattenseite), mehrmals an verschiedenen Stellen

abgetastet. Zu jeder Abtastung wurde gesondert die MTF berechnet. Es zeigt sich, daß die MTF-Kurven geringfügig voneinander abweichen. Werden die Abtastungen an der selben Stelle des Hausdaches durchgeführt, so ergibt sich zwischen den entsprechenden MTF's kein meßbarer Unterschied. Daraus folgt, daß die erwähnten Abweichungen auf das Filmkorn zurückzuführen sind. Eine graphische Mittelwertkurve von allen gemessenen MTF-Kurven wird in Abb. 7 gezeichnet. Diese kann als MTF des photographischen Systems des Bildfeldbereichs, in dem das abgetastete Haus steht, angesehen werden.

4. Zusammenfassung

Eine neue Methode zur Bestimmung der MTF aus dem Kantenbild wurde vorgestellt und zur Auswertung von Luftbildern verwendet. Sie ist durch die Multiplikation des Kantenbildes mit der Hanning-Funktion charakterisiert und zeichnet sich durch Einfachheit und gute Genauigkeit aus. Im Vergleich zu anderen Kantendetektionsmethoden erfordert sie kleineren rechnerischen Aufwand. Das Verfahren kann auch auf anderen Gebieten, wo die Kantenanalyse verwendet wird, eingesetzt werden.

Literatur

- [1] H. Tiziani, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik. 4-77 (1977) 137.
- [2] O. Kölbl, Arbeitstagung: Kammerkalibrierung in der photogrammetrischen Praxis. (1985) Deutsche geodätische Kommission, Reihe B, Heft 275, S. 48-64. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, herausgegeben v. G. Kupfer u. W. Wester-Ebbinghaus.
- [3] R. A. Jones, Edward C. Yeadon: Phot. Sci. Eng., 13 (1969) 200.
- [4] R. A. Jones. Phot. Sci. Eng. 11 (1967) 102.
- [5] J. Sievers, Die Kantenbildanalyse als Mittel zur Bestimmung von „Bildparametern“. Beitrag für die Arbeitsgruppe „semantische Information“ der Kommission E der OEEPE (1976).
- [6] F. Scott, R. M. Scott u. R. V. Shack, Phot. Sci. Eng. 7 (1963) 345.
- [7] E. O. Brigham: The Fast Fourier Transform. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey (1974).
- [8] R. B. Blackman, J. W. Tukey, The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering. New York: Dover, 1959.
- [9] E. S. Blackman, Phot. Sci. Eng. 12 (1968) 244.