

Übertragungsfunktionen und exakte Bildrestaurierung bei digitalen Luftbildaufnahmen

OTTO KÖLBL, Lausanne, Schweiz

Keywords: photogrammetry, exact image restoration, MTF, transfer functions, digital aerial images, digital aerial cameras, DMC, ADS40

Zusammenfassung: Im Folgenden wird ein Verfahren zur pixelscharfen Bildrestaurierung von digitalen Luftbildaufnahmen entwickelt. Das Verfahren basiert auf der Berechnung der Verwaschungsfunktion an Kanten. Die Verwaschungsfunktion für Bildprofile wird als Bandmatrix angesetzt, die nun auch streng invertiert werden kann und damit eine exakte Rekonstruktion der Objektfunktion erlaubt. Aus der inversen Verwaschungsfunktion für Profile wird in der Folge ein zweidimensionales Filter zur Bildrestaurierung ermittelt. Das Verfahren wurde an Bildern der digitalen Luftbildkamern ADS40 und DMC angewendet und auch an mittelformatigen Kamern. Ganz grob lässt sich damit die Bildauflösung um den Faktor 2 steigern. Es setzt voraus, dass hochwertige Aufnahmeobjektive eingesetzt werden, so dass Objekte, die nur durch ein Pixel getrennt sind, im Bild nicht völlig verschmelzen.

Résumé: *Fonction de transfert et restauration exacte des images prises par des caméras numériques aériennes.* La procédure proposée permet de restaurer des photos aériennes numériques à une netteté d'un pixel près. La procédure se base sur le calcul du mollifier (spread function) déterminé sur des bords d'objets. Le mollifier d'un profil d'image est écrit comme matrice de bande qui peut être invertie rigoureusement, ce qui permet de reconstruire exactement la fonction d'objet à

Summary: *Transfer functions and exact image restoration for digital aerial images.* A procedure is proposed for a pixel sharp restoration of digital aerial photographs. The procedure is based on the computation of the image spread function on edges. The spread function for image profiles is set up as band matrix which can be rigorously inverted, which allows an exact reconstruction of the object function. Subsequently a two-dimensional Filter is computed from the inverse of the spread function. The procedure was applied to images of the digital aerial cameras ADS40 and DMC and also to medium format cameras. Roughly it allows increasing the image resolution for about a factor 2. However this requires the use of high performance lenses so that objects, which are separated by only one pixel do not fuse completely.

partir de celle de l'image. Par la suite un filtre bidimensionnel est calculé à partir de l'inverse du mollifier. Cette procédure a été appliquée à des images de caméras numériques aériennes et aussi à des caméras de format moyen. Elle permet d'augmenter la qualité des images approximativement d'un facteur deux. Cela exige cependant l'utilisation d'objectifs de prise de vue de haute qualité, ainsi 2 objets séparés par un seul pixel ne doivent pas fusionner complètement.

1 Einführung

Aufnahmen mit digitalen Kamern weisen, wie auch Filmaufnahmen, eine gewisse Unschärfe auf, die vor allem durch das Aufnahmeobjektiv, aber auch durch die Bewegungsunschärfe und Ladungsdiffusion zwischen

den Bildsensoren verursacht werden. In der Vergangenheit wurden verschiedene Verfahren zur Bildverbesserung entwickelt, welche vielfach auf Fourier-Transformationen basieren. Auch recht einfache Bildverarbeitungsprogramme offerieren derartige Möglichkeiten; dabei wird im Allgemeinen mit

einer einfachen Kantenverstärkung gearbeitet; es handelt sich hierbei um Näherungslösungen, die sogar zu skurrilen Nebeneffekten führen können.

Im Folgenden wird ein Ansatz entwickelt, der die Verwaschungsfunktion nicht über die Fouriertransformierte berechnet, sondern unmittelbar im Ortsraum. Durch Inversion der Verwaschungsmatrix lässt sich dann aus der Bildmatrix streng die Objektmatrix rekonstruieren, also das Bild nach Elimination der Verwaschungseffekte. Diese Rekonstruktion eines pixelscharfen Bildes erfolgt auf Grund der spezifischen Filter.

Damit wird bei der Bildrestaurierung völlig anders vorgegangen als in der gängigen Praxis, wobei die Verwaschungsfunktion meist durch eine Gauß'sche Glockenkurve angenähert wird (vgl. REULKE et al. 2004, LEBERL et al. 2002, ALAMÛS et al. 2005). Die Glockenkurve wird dort meist nur durch einen einzigen Parameter definiert und berechnet sich aus den an Kanten ermittelten Gradienten. Bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren wird die Verwaschungsfunktion nicht nur auf Grund des maximalen Böschungswinkels an der Kante berechnet, sondern es werden zudem die Streulichtverluste und die Verwaschung im weiteren Verlauf der Kante einbezogen. Die Verwaschungsfunktion wird durch ein Polynom approximiert, ohne dass eine vordefinierte mathematische Funktion nötig wäre. Damit ergibt sich eine große Flexibilität und es wird eine höhere Genauigkeit bei der Bildrestaurierung erzielt, da diese mathematisch exakt erfolgt.

Bei der Bildrestaurierung werden die idealisierten Grauwerte des Objekts aus dem verwaschenen Bild berechnet. Das bedingt eine Multiplikation der Pixelwerte im Bild mit Faktoren zwischen 2 bis 5 und selbst mehr, je nach der Größe der Verwaschung; damit wird natürlich zudem das Rauschen verstärkt. Verfahren zur Bildrestaurierung sind daher nur sehr begrenzt für Filmaufnahmen geeignet; digitale Sensoren weisen dagegen ein wesentlich geringeres Rauschen auf. Es sollte jedoch auch bei digitalen Sensoren das Rauschen und der Dynamikbe-

reich der Aufnahmen in die Überlegungen mit einbezogen werden.

Die hier gezeigten Bildbeispiele wurden für kleine monochromatische Bildausschnitte berechnet, veranschaulichen aber sehr gut die Effizienz des Verfahrens. Für eine Anwendung über ein ganzes Luftbild wäre zu berücksichtigen, dass die Bildqualität im Allgemeinen im Zentrum des Bildes am höchsten ist und gegen den Bildrand graduell abnimmt. Es darf daher für eine digitale Aufnahme nicht mit einem konstanten Filter über das gesamte Bild gerechnet werden. Ferner wird die Bildqualität bei verschiedenen Objektiven durch die chromatische Aberration zusätzlich beeinträchtigt. Diese ist separat zu korrigieren, was bei Farb- oder Multispektralaufnahmen recht gut möglich ist. Zu berücksichtigen ist ferner, dass die Abbildungsqualität bei Luftbildern zeitlich stark variieren kann, da das Aufnahmesystem durch Temperatureffekte und Druckunterschiede beim Bildflug beeinträchtigt werden kann. Die Korrekturfilter sind daher entsprechend anzupassen. Mit vorliegender Arbeit wird ein Weg zu einer Steigerung der Bildqualität aufgezeigt; die eigentliche Umsetzung für die Praxis bedingt aber die Erstellung entsprechender Rechenprogramme. Zweifellos werden sich im Zuge einer operationellen Anwendung noch weitere Verfeinerungen des Ansatzes ergeben.

Im Folgenden werden zunächst das hier gewählte Vorgehen zur Berechnung der Verwaschungsfunktion und deren Inverse behandelt. Daran anschließend werden Bildbeispiele für die gängigsten Luftbildkamern aufgezeigt, soweit dafür Bildmaterial vorlag; es handelt sich um die ADS40 von Leica und die DMC von Z/I Imaging. Überlegungen werden auch angestellt, inwieweit das Verfahren für die mittelformatigen Kamern Hasselblad H1 und die Rollei AIC modular LS angewendet werden können.

Vorliegende Arbeit entstand auf Grund einer Einladung für einen Vortrag zu der Photogrammetrischen Woche 2005 durch DIETER FRITSCH zum Thema „Transferfunktionen in image data collection“ (vgl. KÖLBL

2005). Allerdings konnte die spezifische Arbeit zu dem Thema und insbesondere die Bildrestaurierung noch nicht in der schriftlichen Fassung voll behandelt werden. Wegen der Aktualität des Themas wurde daher ein spezieller Beitrag für diese Zeitschrift verfasst.

2 Die Verwaschungsfunktion und ihre Inverse

Die Verwaschungsfunktion kann als Bild eines idealen Punktes im Raum aufgefasst werden. Man kann auch davon ausgehen, dass es sich im Objektraum um ein Rechtecksignal handelt, das ein ganzes Pixel ausfüllt. Mittels Faltung kann das Bild eines beliebigen Objekts berechnet werden; dabei überlagern sich die einzelnen Punktbilder und müssen entsprechend aufaddiert werden. Aus praktischen Gründen wird dies hier nur für ein Bildprofil demonstriert.

Die Verwaschungsfunktion erlaubt also mittels Faltung aus der Objektfunktion die Bildfunktion zu berechnen (vgl. Abb. 1). Bezeichnet man die idealisierten Pixelwerte im Objektraum mit Obj_i , die entsprechenden Pixelwerte im Bildraum mit Img_i und beschreibt man die Verwaschung als numerisches Filter ($F_i = \dots B, A, Z, A, B, \dots$) dann gilt folgender Zusammenhang in Matrizenform:

$$Img_i = Fb_{i,j} * Obj_j \tag{1}$$

Hierbei wird das numerische Filter einer einzigen Zeile F_i als Bandmatrix $Fb_{i,j}$ eingeführt:

$$Fb_{i,j} = \begin{matrix} \dots & B, & A, & Z, & A, & B, & \dots \\ \dots & \dots & B, & A, & Z, & A, & B, & \dots \\ \dots & \dots & \dots & B, & A, & Z, & A, & B, & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & B, & A, & Z, & A, & B, & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & B, & A, & Z, & A, & B, & \dots \end{matrix} \tag{2}$$

Das Filter selbst wurde hier mit 5 Elementen beschrieben, kann aber beliebig ausgedehnt werden; Z ist der Zentralwert, A und B sind die Nachbarwerte. So lässt sich die Verwaschungsfunktion bei der ADS40 mit den Werten $Z = 0.66$, $A = 0.15$ und $B = 0.02$ beschreiben. Die Summe der Filterwerte einer Zeile oder Spalte der Matrix Fb ($Z + 2A + 2B$) muss natürlich eins sein, um die Lichtenergie konstant zu halten.

Aus Gleichung (1) lässt sich nun auch streng die Inverse der Filterfunktion berechnen und somit die Objekhelligkeit aus den Pixelwerten im Bild; man erhält damit ein pixelscharfes Bild:

$$Obj_i = Fb_{i,j}^{-1} * Img_j \tag{3}$$

Dies setzt voraus, dass die Bandmatrix Fb invertierbar ist, also die Determinante nicht null wird. Eine Bedingung hierfür ist, dass A kleiner ist als $Z/2$, das heisst die Verwaschungsfunktion muss relativ schmal sein. Dies ist verständlich, denn bei größerem A verschmelzen bereits 2 Objekte im Abstand von nur zwei Pixel und können folglich nicht mehr getrennt werden; eine korrekte Bildrestaurierung ist dann nicht mehr möglich. Solange also obige Bedingung erfüllt ist, kann die Invertierung der Filterfunktion exakt erfolgen; erst bei einer breiteren Verwaschungsfunktion ist das Problem als „ill-

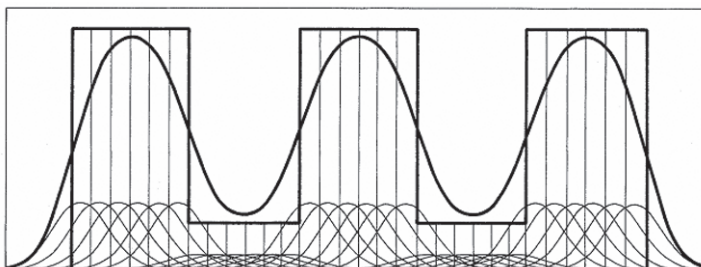


Abb. 1: Bildaufbau durch die Überlagerung der Verwaschungsfunktionen der einzelnen Rechtecksignale und deren Interferenz (Faltung-dünne Linien). Die dicken Linien stellen die Objektfunktion, hier eine Rechteckfunktion und die Bildfunktion (geschwungene Linie) dar.

posed“ zu betrachten (vgl. REULKE et al. 2004).

3 Praktische Berechnung der Verwaschungsfunktion und deren Inverse

Die Überlegungen zur Ermittlung der Verwaschungsfunktion beschränkten sich hier auf Profile. An sich lassen sich diese auch auf den zweidimensionalen Bildraum ausdehnen. Allerdings ist man bei der praktischen Berechnung gezwungen Annahmen über die Objektfunktion zu machen, um die Verwaschungsfunktion zu ermitteln. Relativ einfach ist es, wenn spezielle Signaltafeln, wie etwa der Siemensstern, zur Verfügung stehen. Im Allgemeinen wird man sich jedoch mit der Kantenganalyse begnügen müssen; in diesem Fall kann genauso gut mit Profilen gearbeitet werden, wobei Unterschiede in Flugrichtung und senkrecht dazu gegebenenfalls zu berücksichtigen wären.

Praktisch wurden möglichst scharfe Kanten in den Bildern in Zeilenrichtung der Bildmatrix und senkrecht dazu eruiert und die Pixelwerte ausgelesen. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Objektkanten weitgehend mit den Pixelkanten übereinstimmen. Eine Verschiebung des Objektrandes gegenüber der Pixelbegrenzung führt zu einer Asymmetrie, lässt sich aber numerisch berücksichtigen. Ferner wurde die Objektfunktion

normiert, um die Berechnung zu vereinfachen. Tab.1 veranschaulicht das rechnerische Vorgehen.

Liegt die Verwaschungsfunktion in numerischer Form vor, so lässt sich daraus die Modulationsübertragungsfunktion mittels Fouriertransformation berechnen. Dieser kommt bei der hier entwickelten Bildrestaurierung keine Bedeutung zu, erlaubt aber die Zuverlässigkeit der berechneten Verwaschungsfunktion durch den Vergleich mit Labormessungen zu überprüfen, wie dies für die ADS40 (Abb. 2) und die Hasselblad H1 (Abb. 9) möglich war.

Die Inverse der Verwaschungsfunktion ergibt sich aus der Inversen Bandmatrix F_b , wobei wieder die Zeilen die eigentlichen Werte des linearen Filters darstellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bandmatrix der Verwaschungsfunktion für die Berechnung abgeschnitten werden muss. An sich kann dies als Approximation betrachtet werden. Wird diese aber entsprechend groß gewählt, beispielsweise 20×20 Elemente, so ist dieser Randeffekt vernachlässigbar.

Für die Berechnung eines pixelscharfen Bildes wäre es aber unzureichend, nur ein lineares Filter zu verwenden. Hierfür wird selbstverständlich ein zweidimensionales Filter benötigt. Das aus der Matrizeninversion abgeleitete lineare Filter gibt nur die Zeilen- bzw. Spaltensummen des 2D Filters wieder. Damit lässt sich aber ein Gleichungs-

Tab. 1: Erläuterung der numerischen Berechnung der Verwaschungsfunktion: Kolonne 1 gibt die angenommene Helligkeit im Objektraum wieder, Kolonne 2 die normierten Werte; die Summen in Kolonne 3 ergeben sich aus der Matrizenmultiplikation (vgl. Formel (1)) und stellen die normierten Pixelwerte im Bildraum dar, also nach der Verwaschung. Kolonne 4 ergibt sich durch Aufsummierung aus Kolonne 3. In Kolonne 5 werden die effektiv gemessenen Pixelwerte eines Bildprofils ausgewiesen (Beispiel ADS40) und in Kolonne 6 die entsprechend normierten Werte. Die Filterwerte in Kolonne 7 lassen sich dann direkt aus den Werten der Kolonne 6 ermitteln.

Obj _j ^{eff} effekt.	Obj _j ^{norm} normiert	F _{b_{ij}} * Obj _j ^{norm} für normierte Objekte	F _{b_{ij}} * Obj _j ^{norm} Summe aus (3)	Img _i ^{eff} effekt.	Img _i ^{norm} norm.	Filter Werte
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
150	+1	B+A+Z+A+B	= Z + 2A + 2B	150	+ 1.00	B = 0.02
150	+1	. B+A+Z+A-B	= Z + 2A	148	+ 0.96	A = 0.15
150	+1	. . B+A+Z-A-B	= Z	133	+ 0.66	Z = 0.66
50	-1	. . . B+A-Z-A-B	= Z	67	- 0.66	Z = 0.66
50	-1	. . . . B-A-Z-A-B	= - Z - 2A	52	- 0.96	A = 0.15
50	-1	. . . . . B-A-Z-A-B	= - Z - 2A - 2B	50	- 1.00	B = 0.02

system aufstellen, um die einzelnen Filterwerte zu berechnen, wobei Zwischenwerte als Interpolationswerte der Hauptachsen aufgefasst werden können. Damit ist dann die Berechnung eines kompletten zweidimensionalen Filters möglich.

4 Verschiedene Bildbeispiele

Für die praktischen Untersuchungen wurden die verschiedenen Hersteller von Luftbildkamern und Fliegerfirmen um Bildmaterial angefragt. Freundlicherweise hatte die Firma Leica Geosystems Bilder von der ADS 40 zur Verfügung gestellt, desgleichen die Swisstopo, Bilder mit der DMC die Firma Z/I Imaging und das Institut Cartogràfic de Catalunya; letzteres stellte zu dem Luftbilder mit der digitalen Rollei Kammer zur Verfügung, wie auch die Firma Memier in Grenoble. Die Luftbilder mit der Hasselblad 903 mit Biogon und der H1 stammen vom Institut für Photogrammetrie und der Firma „UW+R SA“ in Nyon, Schweiz.

Bei sämtlichen Kamern wurden nur monochromatische Aufnahmen analysiert. Bei der ADS40 lässt sich das Verfahren problemlos auf Farbberegistrungen ausdehnen; demgegenüber ist die Hauptkammer bei der DMC für den panchromatischen Bereich ausgelegt, die Farbkanäle weisen eine wesentlich geringere Auflösung auf und die

Farbbilder werden über einen „pansharpening“ Prozess erhalten; ähnliches gilt für die mittelformatigen Kamern Rollei und Hasselblad, bei denen ein Bayerfilter verwendet wird. Das heisst die einzelnen Elemente des Flächensensors werden abwechselnd mit roten grünen und blauen Filtern versehen, meist überwiegen die grünen Filter.

4.1 Bildrestaurierung bei der ADS40 von Leica Geosystems

Die ADS40 ist eine Zeilenkammer mit drei panchromatischen Liniensensoren (vorwärts, senkrecht und rückwärts gerichtet) und 4 Farbkanälen (vgl. u. a. SANDAU 2005). Die Zeilensensoren weisen 12.000 Pixel auf, wobei die panchromatischen Kanäle über doppelte Zeilensensoren verfügen. Der zweite Sensor ist gegenüber dem ersten um ein halbes Pixel seitlich versetzt und um 4 Pixel in Flugrichtung („gestagerte“ Anordnung). Damit wird an sich die Pixelauflösung in Zeilenrichtung verdoppelt. Durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs wird ein zweidimensionales Bild erhalten; auf Grund der hohen Zeilenauslese (800 Hz) kann die Auflösung in Flugrichtung bei einer entsprechenden Fluggeschwindigkeit erhöht werden. Die ADS40 weist damit mit einem einzigen Aufnahmekopf die höchste Aufnahmekapazität aller bisher gängigen digitalen Luftbildkamern auf.

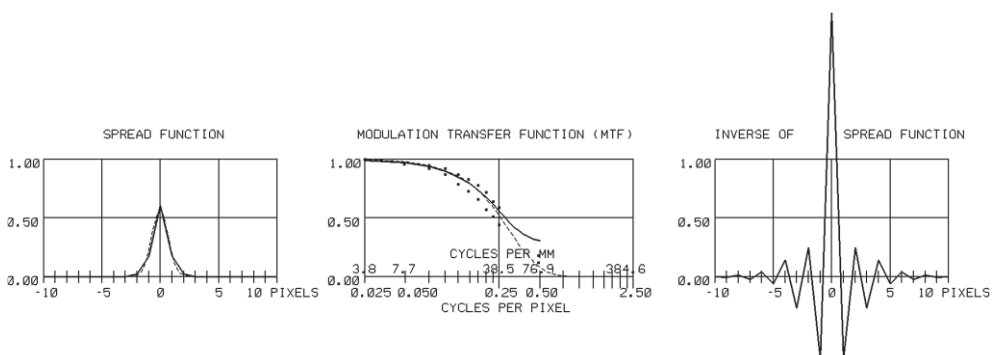


Abb. 2: Links die Verwaschungsfunktion mit überlagerter Gaußfunktion (punktiert) mit einer Spreizung (Full Width at Half Maximum: FWHM) von 2.0 Pixel. Im Diagramm der Modulationsübertragungsfunktion werden auch die Ergebnisse von Labormessungen (Quadrate) ausgewiesen sowie die MTF, welche der Gaußfunktion mit der Spreizung von 2 Pixel entspricht (gestrichelt). Rechts findet sich die Inverse der Verwaschungsfunktion.

Die telezentrische Linse hat eine Brennweite von 62.5 mm, Öffnung 1 : 4, die Pixelgröße beträgt 6.5 μm , es werden 12-bit Werte registriert. Das Prinzip der Zeilenkammer bedingt eine sehr genaue Registrierung der Position und der Winkelneigungen der Aufnahmeplattform. Dies erfolgt mittels eines Trägheits- und Kreiselsystems (IMU) und eines GPS Systems. Die Aufnahmeplattform wird auch weitgehend stabilisiert, allerdings müssen die Rohbilder um verbleibende Restabweichungen korrigiert werden.

Bei der Analyse des Bildflugs Waldkirch wurden die in Abb. 2 wiedergegebene Verwaschungsfunktion und Modulationsübertragungsfunktion erhalten; zudem wird die Inverse der Verwaschungsfunktion ausgewiesen.

Wie man erkennt, stimmt die Modulationsübertragungsfunktion sehr gut mit Messungen des Kammerherstellers überein (vgl. SCHUSTER & BRAUNECKER 2000). Aus der Inversen der Verwaschungsfunktion wurde ein zweidimensionales Filter abgeleitet (vgl. Abb. 4), mit dem eine beträchtliche Kon-

trastverstärkung am Beispiel des Bahnkörpers erreicht wird (vgl. Abb. 3).

Betrachtet man die einzelnen Werte des Filters, dann erkennt man, dass der Zentralwert des Filters 3.011 beträgt; dementsprechend wird bei der Filterung bzw. bei der Restaurierung des Bildes das zentrale Pixel jeweils mit 3 multipliziert und damit auch das Rauschen des Bildes um einen Faktor 3 verstärkt. Dies ist bei digitalen Bildern mit ihrem geringen Rauschen durchaus zulässig, aber bei Luftbildern mit einem 5–10-mal stärkeren Rauschen nicht mehr sinnvoll.

Vom Bildflug Vahigen mit der ADS40 lagen zudem die Rohbilder vor. Bei diesem Bildflug überlagern sich die Bildzeilen in Flugrichtung um ca. 50 %, d. h. es wurde mit doppelter Bildauflösung geflogen. Bei der Ermittlung der Verwaschungsfunktion wurde ein Zentralwert $Z = 0.38$, $A = 0.14$ und $B = 0.06$ erhalten. Da A noch kleiner als 50 % des Zentralwerts ist, kann die Inverse der Verwaschungsfunktion und das exakte Restaurationsfilter berechnet werden. Der Vollständigkeit halber werden hier noch die numerischen Werte der Verwaschungsfunk-

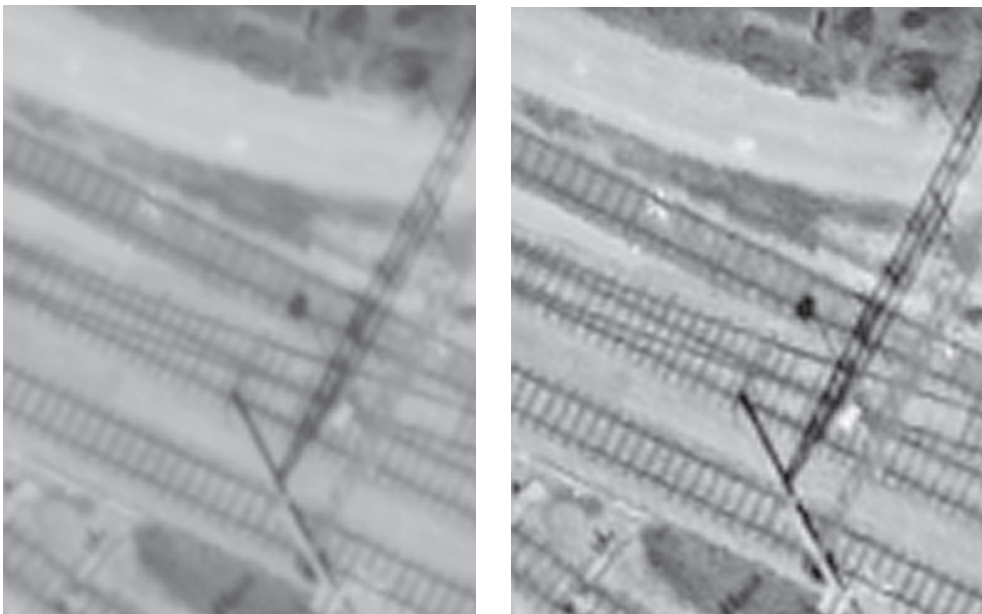


Abb. 3: Links: Originalbild, rechts restauriertes Bild, die Pixelgröße entspricht in etwa der Breite der Schwellen; Größe des Bildausschnitts 96 \times 124 Pixel.

	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.000	-0.001	-0.004	-0.006	-0.006	-0.006	-0.004	-0.001	0.000	0.000
2	0.000	-0.006	-0.019	-0.027	-0.030	-0.027	-0.019	-0.006	-0.002	0.000
3	-0.001	-0.024	-0.007	0.020	0.030	0.020	-0.007	-0.024	-0.006	-0.001
4	-0.004	-0.007	0.028	0.020	0.017	0.020	0.028	-0.007	-0.019	-0.004
5	-0.006	0.020	0.020	-0.169	-0.298	-0.169	0.020	0.020	-0.027	-0.006
6	-0.006	0.030	0.017	-0.298	3.011	-0.298	0.017	0.030	-0.030	-0.006
7	-0.006	0.020	0.020	-0.169	-0.298	-0.169	0.020	0.020	-0.027	-0.006
8	-0.004	-0.007	0.028	0.020	0.017	0.020	0.028	-0.007	-0.019	-0.004
9	-0.001	-0.024	-0.007	0.020	0.030	0.020	-0.007	-0.024	-0.006	-0.001
10	0.000	-0.006	-0.019	-0.027	-0.030	-0.027	-0.019	-0.006	-0.002	0.000
11	0.000	-0.001	-0.004	-0.006	-0.006	-0.006	-0.004	-0.001	0.000	0.000
Summe:	-0.027	-0.005	0.055	-0.620	2.437	-0.620	0.055	-0.005	-0.138	-0.027

Abb. 4: Wiedergabe des vollständigen Filters, das für die Restauration des Bildausschnittes von Abb. 3 verwendet wurde.

tion von Abb. 2 wiedergegeben.: $Z = 0.61$, $A = 0.17$, $B = 0.02$. Prinzipiell lässt sich daher über den gestaggerten Sensor ein Bild mit doppelter Auflösung ($3.5\ \mu\text{m}$) berechnen. Allerdings weisen die Bilder eine viel zu hohe Rollbewegung auf. Die Größe der Rollbewegung lässt sich sehr leicht am Rand von Bildern ablesen, bei denen die Flugbewegungen korrigiert wurden (L1-Bilder, vgl. auch REULKE et al. 2004). Möchte man sicher gehen, dass die versetzten Bilder (B-Sensor) tatsächlich auf Lücke des A-Sensors sind, so sollte die seitliche Rollbewegung 1 Pixel auf einer Länge von 20 Pixel nicht überschreiten ($0.1\ \text{mrad}$ bei 40 Hz), dies wegen der Distanz von 4 Pixel zwischen den beiden Zeilensensoren. Ansonsten überlagern sich periodisch die B Pixel mit den A Pixel und es wird keine zusätzliche Bildinformation über den gestaggerten Array erhalten. Ähnliche Toleranzen würden auch für die anderen Kammerbewegungen gelten.

4.2 Bildrestaurierung bei der DMC von Z/I Imaging

Die digitale Luftbildkamera DMC von Z/I Imaging ist ein Mehrkopfsystem von Rahmenkamern. Die Standardversion benutzt 4 panchromatische Divergentkammern mit einer Brennweite von 120 mm (Öffnung 1:4) und Flächensensoren von 4096×7168 Pixel, Pixelgröße $12\ \mu\text{m}$; es werden jedoch auch andere Sensoren offeriert. Zur Farbregistrie-

rung werden kleinformatigere Kammern mit kürzeren Brennweiten benutzt. Die Aufnahmen aus den 4 panchromatischen Kammern werden zu einem virtuellen Bild von 7680×13824 Pixeln zusammengesetzt. Die Rohbilder und die Bildkombinationen werden in 12 bit codiert (vgl. u. a. HINZ et al. 2001).

Die Kammer erlaubt eine elektronische Kompensation der Bewegungsunschärfe. Dazu werden die Bildregister während der Aufnahme zeilenweise verschoben. Allerdings ist eine korrekte Kompensation der Bewegungsunschärfe nur bei flachem Gelände und bei Senkrechtaufnahmen möglich. Bei den Divergentkammern variiert der Aufnahmemaßstab, und die Bildkompensation weist daher gewisse Grenzen auf; nichtsdestoweniger wird damit eine beträchtliche Steigerung der Ladungssammlung und des Belichtungsspielraums erreicht, was sich bei 12-bit Bildern in einem geringeren Rauschen niederschlagen dürfte.

Zur Ermittlung der Verwaschungsfunktion wurden die zusammengesetzten Bilder verwendet. Dabei ergaben sich die in Abb. 5 wiedergegebene Verwaschungsfunktion und die entsprechende Inverse.

Gleichfalls wurde das Restaurationsfilter berechnet (Abb. 6) und ein Bildausschnitt restauriert (Abb. 7). Es handelt sich hierbei um eine Hausfassade, die sich ganz am Bildrand befindet.

Die Möglichkeit auch streng geometrische Formen, die diagonal verlaufen, erfolg-

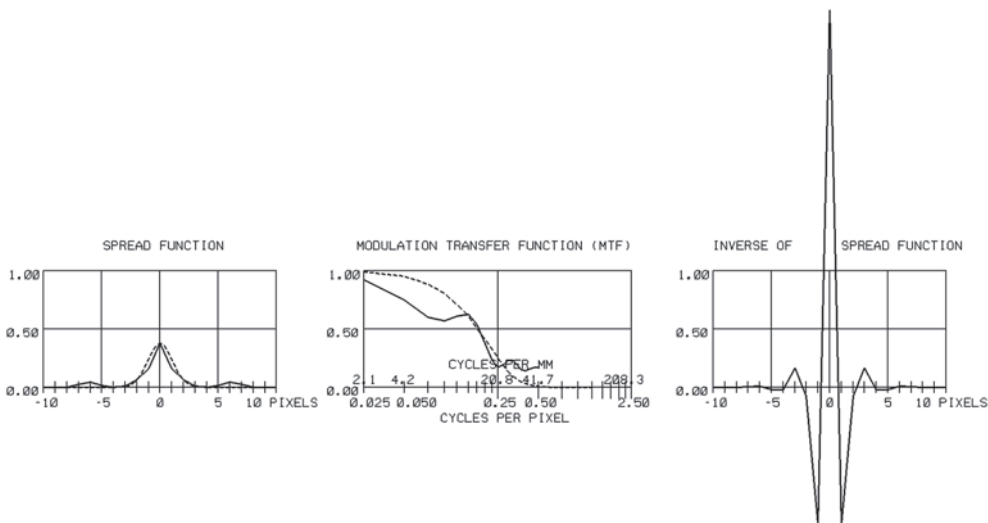


Abb. 5: Verwaschungsfunktion, Modulationsübertragungsfunktion und Inverse der Verwaschungsfunktion, ermittelt an einem Bild der DMC. Die Spreizung der Gaußfunktion (strichliert) beträgt 3 Pixel. Wegen der unterschiedlichen Pixelgröße ergibt sich bei der DMC eine andere Skalierung bei der Modulationsübertragungsfunktion in „cycles per mm“ als bei der ADS40.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.000	0.000	-0.001	-0.002	-0.004	-0.004	-0.004	-0.002	-0.001	0.000	0.000
2	0.000	-0.001	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004	-0.004	-0.001	0.000
3	-0.001	-0.004	-0.004	0.022	0.053	0.064	0.053	0.022	-0.004	-0.004	-0.001
4	-0.002	-0.004	0.022	0.037	-0.053	-0.090	-0.053	0.037	0.022	-0.004	0.002
5	-0.004	-0.005	0.053	-0.053	-0.389	-0.597	-0.389	-0.053	0.053	-0.005	-0.004
6	-0.004	-0.005	0.064	-0.090	-0.597	5.105	-0.597	-0.090	0.064	-0.005	-0.004
7	-0.004	-0.005	0.053	-0.053	-0.389	-0.597	-0.389	-0.053	0.053	-0.005	-0.004
8	-0.002	-0.004	0.022	0.037	-0.053	-0.090	-0.053	0.037	0.022	-0.004	-0.002
9	-0.001	-0.004	-0.004	0.022	0.053	0.064	0.053	0.022	-0.004	-0.004	-0.001
10	0.000	-0.001	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004	-0.004	-0.001	0.000
11	0.000	0.000	-0.001	-0.002	-0.004	-0.004	-0.004	-0.002	-0.001	0.000	0.000
Summe:	-0.018	-0.033	0.194	-0.091	-1.391	3.842	-1.391	-0.091	0.194	-0.033	-0.018

Abb. 6: Restaurationsfilter für die DMC für den Bildausschnitt von Abb. 7.

reich zu restaurieren, demonstriert die Effizienz des Verfahrens. Ein fehlerhaftes Restaurationsfilter würde sehr schnell zu Artefakten führen.

Soweit bekannt, wurden keine Werksangaben über die MTF des Aufnahmeobjektivs publiziert, vielmehr haben der Hersteller, wie auch andere Benutzer der Kammer, den Siemensstern zur Analyse der Bildqualität benutzt (vgl. u. a. ALAMUS et al. 2005). Freundlicherweise hatte das ICC die entsprechenden Bilder für diese Arbeit zur Ver-

fügung gestellt. Berechnet man an diesen Testtafeln die Verwaschungsfunktion, so wird ein wesentlich besseres Ergebnis erhalten, als in Abb. 5 ausgewiesen. Eine genauere Analyse dieser Bilder zeigt allerdings Effekte einer Kantenverstärkung (vgl. Abb. 8, rechtes Bild). Das Bild weist einen sehr hohen Kontrast auf, im hellen Bildbereich wurden Pixelwerte um 3500 (12 bit) gemessen, der dunkle Teil weist einen Wert um 300 auf und die Kante fällt auf 10 und selbst auf 0 ab.

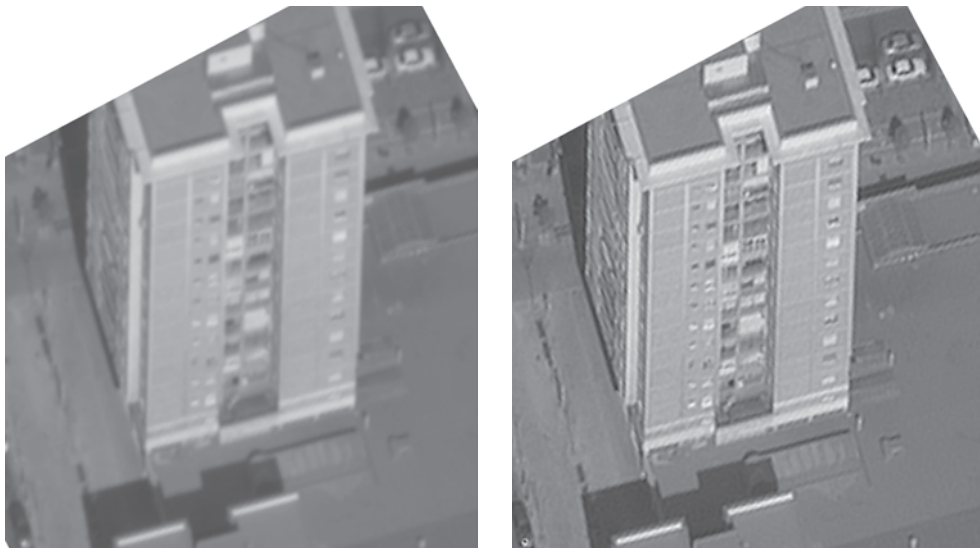


Abb. 7: Beispiel für die Restaurierung eines Bildausschnitts der DMC. Die Hausfassade befindet sich ganz am Rande des Bildes in diagonaler Richtung. Die abgeschnittene linke Kante des Bildausschnittes entspricht dem effektiven Bildrand des Luftbilds. Man erkennt rechts leicht die Pixelstruktur; diese starke Vergrößerung lässt den Effekt der Bildverbesserung deutlicher werden, Größe des Bildausschnitts 217×250 Pixel.

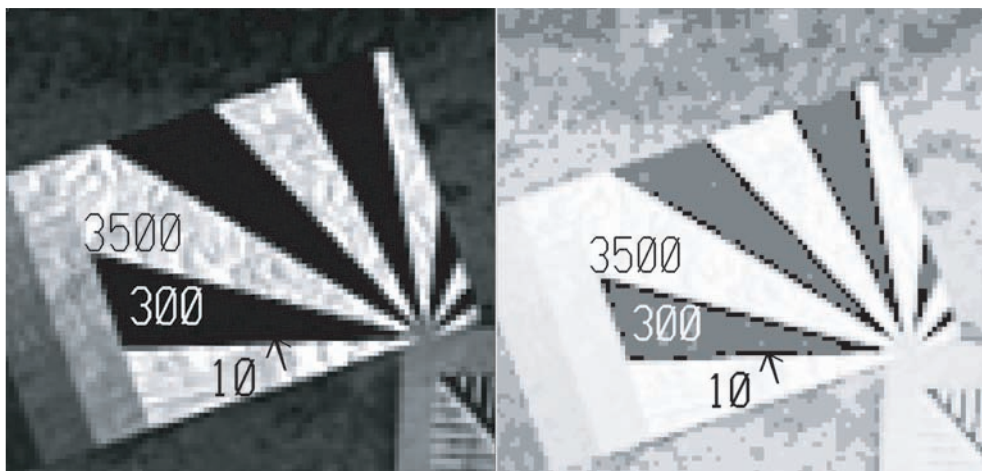


Abb. 8: Siemens-Stern, aufgenommen mit der DMC. Beim rechten Bild wurde der Kontrast verstärkt, damit in den dunklen Bildpartien der Effekt der Kantenverstärkung sichtbar wird. Die Zahlen weisen auf die mittleren Pixelwerte der Bildpartien (3500 hell, 300 dunkel, 10 Kante) hin; Maximalwert bei 12 bit: 4096.

Es dürfte sich bei der Kantenverstärkung um einen elektronischen Effekt des Sensors handeln, der zu einer offensichtlichen Steigerung der Bildschärfe führt, dies vor allem bei hohem Kontrast. Inwieweit dieser Effekt

auch bei der hier vorgeschlagenen Bildrestaurierung zu berücksichtigen ist, konnte auf Grund des begrenzten Bildmaterials nicht weiter analysiert werden.

4.3 Überlegungen zur Bildrestaurierung bei Mittelformatkammern

Zum Teil werden für Luftbildaufnahmen auch Mittelformatkammern (vorwiegend Hasselblad oder Rollei) eingesetzt. Meist weisen die Kammer zurzeit eine Bildgröße von etwas mehr als 4000×5000 Pixel (22 Mega-Pixel) auf. Dies kommt nahe an die Bildgröße einer Einzelkammer der DMC. Bei der DMC werden jedoch 4 Einzelkammern zu einem Aufnahmesystem kombiniert. Gerade bei den mittelformatigen Kammer darf aber mit einer raschen Entwicklung gerechnet werden. So wurde von Hasselblad bereits ein Sensor mit 39 Mega-Pixel angekündigt. Zur Erzeugung von Farbbildern wird jedoch im Allgemeinen mit dem Bayerfilter gearbeitet, d. h. es steht für den Grünkanal bestenfalls die Hälfte der Sensorelemente zur Verfügung. Diese Art Kammer ersetzen folglich keinesfalls die professionellen Luftbildkammer wie die ADS40 oder die DMC, sind aber für Sonderanwendungen durchaus geeignet. Es ist daher interessant, die Güte dieser Kammer in diesem Zusammenhang zu analysieren.

Die Hasselblad H1 kam 2003 auf den Markt und stellt eine komplette Neuentwicklung dar. Die Kammer ist mit dem Imaconxpress Bildsensor 132C mit 4072×5438 Pixel ausgerüstet, Pixelgröße $9 \mu\text{m}$. Für die Registrierung von Farbbildern wird, wie bereits erwähnt, das Bayerfilter verwendet. Die Objektiv der Kammer wurden von Fuji entwickelt, unter anderem sind folgende Typen verfügbar: HC 35 mm/f 3.5, HC 80 mm/f 2.8, HC 150 mm/f 3.5 und Zoomobjektive; weitere Brennweiten sind in Vorbereitung.

Die Verwaschungsfunktion wurde für das 35 mm Weitwinkelobjektiv bestimmt. Die Spreizung der Gaußfunktion beträgt 1.35 Pixel für terrestrische Aufnahmen an einer Testtafel und 1.5 Pixel bei Flugaufnahmen (vgl. Abb. 9); gegen den Bildrand steigt die Spreizung auf 2.0 Pixel an. Zudem wurde am Bildrand eine chromatische Aberration von ca. 2 Pixeln beobachtet. Diese lässt sich weitgehend korrigieren, sollte aber beim Gütevergleich mit den professionellen Luftbildkammer berücksichtigt werden, denn letztere registrieren im panchromatischen Bereich. Das 80 mm Fujiobjektiv erbringt eine etwas höhere Bildqualität.

Die Rollei Kammer AIC modular LS stellt ebenfalls eine Neuentwicklung dar. Die Kammer ist, soweit bekannt, mit dem Bildsensor „Phase one“ ausgerüstet, Bildformat 4080×5440 Pixel; die Kammer kann mit den Rollei-Objektiven des Systems 6000 und mit Rodenstock/Schneider Objektiven ausgerüstet werden.

In Abb. 10 wird die Verwaschungsfunktion für das 50 mm Weitwinkelobjektiv wiedergegeben. Die Spreizung der Gaußfunktion beträgt demnach 1.7 Pixel und für das 80 mm Objektiv 1.9 Pixel jeweils im Bildzentrum; die Bilder weisen am Bildrand zudem eine chromatische Aberration auf. Bemerkenswert ist die recht starke Kantenverstärkung bei den Bildern (vgl. Abb. 11). Es ist daher nicht möglich aus der ermittelten Verwaschungsfunktion effektiv auf die Güte des Aufnahmeobjektivs zu schließen. Der Kanteneffekt ist jedenfalls viel markanter als bei der DMC. Durch diese Kantenverstärkung wird auch die Möglichkeit für die Bildres-

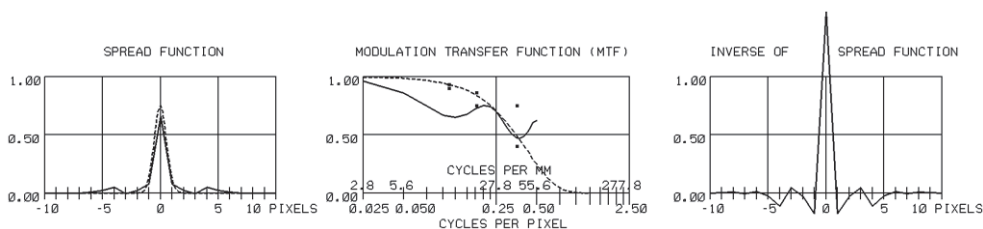


Abb. 9: Verwaschungsfunktion (links), Modulationsübertragungsfunktion (Mitte) und die Inverse für eine Flugaufnahme mit der Hasselblad mit dem Fuji-Objektiv 35 mm. Die schwarzen Quadraten bei der MTF weisen Labormessungen für das Zentrum (oberer Wert) und den Bildrand (unterer Wert) aus, publiziert von Hasselblad.

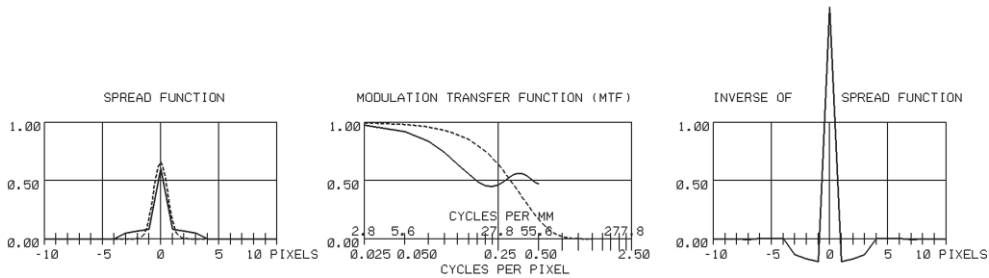


Abb. 10: Verwaschungsfunktion, Modulationsübertragungsfunktion und Inverse des 50 mm Objektivs der Rolleiflex.



Abb. 11: Effekte der Kantenverstärkung bei Aufnahmen mit der Rolleiflex; man beachte den dunklen Rand der Schatten und den anschließenden hellen Streifen, Größe des Bildausschnitts 229×134 Pixel.

taurierung eingeschränkt. In dieser Beziehung unterscheidet sich die Rolleiflex recht markant von der Hasselblad.

5 Schlussbemerkungen

In dem Beitrag wird ein Verfahren gezeigt, das erlaubt, die Unschärfe von Bildern streng numerisch zu korrigieren. Voraussetzung ist jedoch, dass die Bildunschärfe nicht zu groß ist, das heißt, benachbarte Objekte dürfen nicht verschmelzen. Die aufgezeigten Ergebnisse bestätigen die Effizienz des Ver-

fahrens. Das Verfahren ist jedoch nur in der Lage, im Rahmen des mathematischen Modells die gewünschten Ergebnisse zu liefern. So basiert die Bildrestaurierung auf der Verwaschungsfunktion; diese wird als invariant für den gesamten Kontrastbereich angenommen. Spezielle Effekte der Kantenverschärfung durch Ladungsdiffusion, wie sie bei verschiedenen Bildsensoren auftraten, wurden, zumindest vorerst, nicht berücksichtigt. Ferner sei daran erinnert, dass die Bildschärfe auch von der Objektfarbe abhängig ist, dies auf Grund der chromati-

schen Aberration. An sich ist es durchaus möglich das Rechenverfahren zur Bildrestaurierung noch weiter zu verfeinern. Dazu ist aber ein weit umfangreicheres Bildmaterial mit geeigneten Testtafeln erforderlich.

Bei den analysierten Bildern ergab sich zudem der Eindruck, dass die Bildgüte durch den Kontrastumfang begrenzt wird. Vor allem bei den mittelformatigen Kammerm betrug der Dynamikbereich nur in etwa 1:6 bis 1:7. Bei den professionellen Kammerm ist er an sich höher, allerdings wurde dieser bei den analysierten Bildern nur sehr begrenzt genutzt, da sich der Großteil des Bildinhalts auf etwa 30% des Dynamikbereichs beschränkt. Wahrscheinlich wollte man auch noch Objekte mit Spiegelreflexion korrekt belichten, um eine Sättigung von Pixel und Effekte der Überstrahlung (Blooming) zu vermeiden. Der Großteil der Bildszene wurde daher unterbelichtet und Schattenpartien sind nur sehr begrenzt auswertbar. Dies bewirkt, dass dunkle Objekte in Schattenpartien wie Schachteldeckel kaum mehr erkennbar sind. Wir versuchten im Speziellen schwarze Autos in Schattenpartien zu analysieren, aber nur mit sehr mäßigem Erfolg. Demnach ergibt sich der Eindruck, dass der Dynamikbereich von digitalen Luftbildern geringer ist als bei Schwarzweiß-Filmaufnahmen (z. B. mit dem Fliegerfilm Kodak Plus X).

Mit diesen Anmerkungen soll keinesfalls die Effizienz von digitalen Luftbildaufnahmen in Frage gestellt werden. Vielmehr wird durch die digitale Bildregistrierung eine enorme Qualitätssteigerung gegenüber Film-

aufnahmen erreicht und es ist sogar möglich, diese rechnerische noch weiter zu steigern.

Literatur

- ALAMÜS, R. et al., 2005: Validation Process of the ICC Digital Camera. – Int Arch.PhRS, Bd. XXXVI 1/W3. Hannover.
- HINZ, A., DÖRSTEL, CH. & HEIER, H., 2001: DMC-The digital sensor technology of Z/I-Imaging. – Photogrammetric Week 01, Wichmann Verlag.
- KÖLBL, O., 2005: Transfer Functions in Image Data Collection. – Photogrammetric Week 05, Wichmann Verlag.
- LEBERL, F., PERKO, R., GRUBER, M. & PONTICELLI, M., 2002: Novel Concepts for aerial digital cameras. – Comm. 1, ISPRS.
- REULKE, R., TEMPELMANN, U., STALLMANN, D., CRAMER, M. & HAALA, N., 2004: Improvement of Spatial Resolution with Staggered Arrays As Used in The Airborne Optical Sensor Ads40. – Comm. 1, p. 114ff, ISPRS.
- SANDAU, R., 2005: Digitale Luftbildkamera. – p. 341, Wichmann Verlag.
- SCHUSTER, R. & BRAUNECKER, B., 2000: Calibration of the LH Systems ADS40 airborne digital sensor. – IAPRS, Vol. XXXIII, Part B1, Amsterdam, pp. 288–294.

Anschrift des Autors:

Prof. i.R. Dr. OTTO KÖLBL
 Chemin de l'Eglise 17
 CH-1066 Epalinges, Schweiz
 e-mail: otto.koelbl@epfl.ch

Manuskript eingereicht: Januar 2006

Angenommen: Februar 2006