

DAS DIGITALE ORTHOPHOTO UND SEINE MÖGLICHKEITEN

H.-P. Bähr, Karlsruhe

1. EINFÜHRUNG

1.1. Begriffe

Mit den Begriffen beginnen die Mißverständnisse:

Ein "Orthophoto" ist ein in orthogonale Abbildung transformiertes Bild. In der photogrammetrischen Praxis ist das Bildoriginal das Luftbild einer konventionellen Reihenmeßkamera. Die o.a. Definition faßt den Begriff jedoch absichtlich weiter, um so neuen Entwicklungen gerecht zu werden.

Mit "digital" bezeichnet man in der Photogrammetrie Verfahren, welche erlauben, Bilder vollständig mit einem Digitalrechner zu verarbeiten. Diese müssen dazu in digitaler Form vorliegen, also in diskreten Abtastschritten i, j mit quantifizierten Grauwerten $g_{i,j}$. Der Begriff "digital" wird also zur Vermeidung von Mißverständnissen jedoch absichtlich enger gefaßt als im umgangssprachlichen Sinn, wo er lediglich bedeutet, daß ein Digitalrechner zum Einsatz kommt.

Anfang und Ende eines digitalen Orthophotos sind strenggenommen digital und damit nicht direkt anschaulich. A/D und D/A-Wandlung müssen also bei der Behandlung digitaler Orthophotos - im doppelten Sinn des Wortes - mitbetrachtet werden, um dieses Handwerkszeug nicht als "Mantel ohne Ärmel" werden zu lassen (Abb. 1).

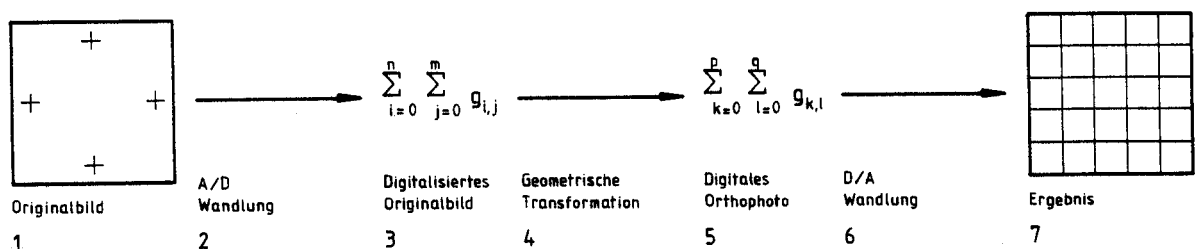


Abb. 1: Datenfluß bei der Herstellung digitaler Orthophotos

Der Weg vom digitalisierten Originalbild zum digitalen Orthophoto umfaßt in der Praxis mehr als nur eine geometrische Transformation. Hierher gehören beispielsweise auch Bildverbesserung (z.B. Kontrastveränderung) und kartographische Überarbeitung (z.B. Randgestaltung und Beschriftung).

1.2 Entwicklung

Im Jahre 1976, auf dem Kongreß der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie in Helsinki, legte KREILING erste Karlsruher Arbeiten zur digitalen Umbildung vor. Man nahm die Ergebnisse als interessante Novität zur Kenntnis in der sicheren Überzeugung, daß noch viele Jahrzehnte bis zur Praxisreife vergehen würden. Die Einschätzung war so falsch nicht, denn die digitale Bildverarbeitung entwickelte sich (beflügelt durch den Start von LANDSAT-1) zunächst im Bereich der Fernerkundung. Fernerkundung jedoch, als "Fortsetzung der Photointerpretation mit anderen Mitteln", lag damals für viele photogrammetrische Fachkollegen vermeintlich außerhalb ihres Zuständigkeitsbereichs. Der eindeutige und irreversible Durchbruch der digitalen Bildverarbeitung in der Photogrammetrie war erst auf dem Kongreß in Kyoto 1988 vollzogen, wobei neben der Fernerkundung als zweiter Arbeitsschwerpunkt die Industriemeßsysteme hinzugekommen waren. Diese stimulieren übrigens das kommerzielle Interesse auch stärker als es die Fernerkundung tut.

Aber nicht nur digitale Bildverarbeitung benötigte relativ lange bis zur allgemeinen Akzeptanz. Weit länger noch geht die Diskussion um das Orthophoto selbst und seinen praktischen Nutzen im Vergleich zur konventionellen Strichkarte. Die Argumente pro und contra sind genügend bekannt und brauchen hier nicht wiederholt zu werden (vgl. Schwidersky 1965). Die Diskussion - wenn sie überhaupt als abgeschlossen betrachtet werden könnte - muß heute mit Blick auf das digitale Orthophoto jedoch ganz neu begonnen werden. Der vorliegende Aufsatz soll dazu einen Beitrag liefern.

Drei Aussagen stehen dabei am Anfang:

1. Die Produkte "topographischer" Photogrammetrie werden zukünftig in Geo-Informationssysteme (GIS) einzufließen haben
2. Das konventionelle analoge Orthophoto ist mit Geo-Informationssystem nicht kompatibel
3. Das digitale Orthophoto läßt sich nicht nur leicht in Geo-Informationssysteme integrieren, es eröffnet auch Möglichkeiten zur automatischen Bildauswertung und repräsentiert damit ein Handwerkzeug mit Zukunft.

2. HERSTELLUNG DIGITALER ORTHOPHOTOS

2.1 "Off-line" versus "On-line"-Systeme

Digitale geometrische Umbildung geschieht schon lange operationell für diejenigen Ausgangsdaten, die original in digitaler Form vorliegen, wie etwa Satellitenaufnahmen (z.B. LANDSAT). Für konventionelle photographische Luftbilder steht jedoch am Anfang das Problem der A/D-Wandlung. Dazu bieten sich alternativ Off-line und On-line-Verfahren an.

"Off-line" bedeutet Digitalisierung von Luftbildern an einem "Stand-alone"-Gerät ohne direkte Anbindung an einen weiteren Bildverarbeitungsprozeß. Ein Beispiel dazu ist der OPTRONICS-Scanner, der Bildelemente in der Größe zwischen $12,5\mu\text{m}$ und $100\mu\text{m}$ erzeugen kann. Die an einem solchen Gerät digitalisierten Bilddaten stehen dann - etwa auf Magnetband - für Off-line-Weiterverarbeitung an einer Bildverarbeitungsanlage zur Verfügung.

"On-line" bedeutet hingegen Digitalisierung von Luftbildern mit einem Gerätesystem, welches gleichfalls für die Herstellung von digitalen Orthophotos verwendet wird. Ein Beispiel dazu sind analytische Plotter (AP) mit integrierten CCD-Kameras. Der Zentralrechner des AP übernimmt dann auch die digitale geometrische Bildverarbeitung.

Beide Wege haben jeweils Vor- und Nachteile, und man erinnert sich an die frühere On-line/Off-line-Diskussion bei der konventionellen Orthophotoherstellung, die schließlich zugunsten der Off-line-Herstellung entschieden würde:

Geräte zur Off-line-Digitalisierung sind jedoch sehr teure Spezialprodukte, so daß der Anwender von einer Anschaffung häufig zurückschreckt. Dies Argument könnte durch neuste Entwicklungen gemindert werden (FAUST 1989). Der Vorteil einer Trennung von Digitalisierung einerseits und Bildverarbeitung andererseits liegt zweifellos darin, daß die einzelnen Bildverarbeitungskomponenten flexibel einsetzbar bleiben. Die Off-line-Verfahren eignen sich daher besonders für die Herstellung digitaler Orthophotos in großen Stückzahlen mit festliegenden Standards etwa im Rahmen "industrieller" Produktion.

On-line-Digitalisierung mit analytischen Plottern liegt zwar im Prinzip von den Gerätekosten her gesehen in der gleichen Größenordnung wie die Off-line-Alternative, sie kann aber für die photogrammetrische Praxis zunächst naheliegender sein, wenn analytische Plotter als Basisgeräte zur Verfügung stehen, so daß in diesem Fall nur die Investitionskosten für die CCD-Kameras zählen. Es lassen sich mit einem CCD-System überdies weitere Aufgaben lösen, wie automatische digitale Korrelation zur DGM-Herstellung oder automatische Punktmessung. Als Nachteil bei der Orthophotoherstellung ist die notwendige Kamerakalibrierung anzuführen - die nicht unkritisch ist (BEHR 1989), sowie vor allem das Blockieren des Gesamtsystems des AP durch die vergleichsweise primitive Digitalisierungsaufgabe.

2.2 Datenmenge digitaler Bilder

Die Kardinalfrage im Zusammenhang mit den Ausgangsdaten jedoch ist die nach der Datenmenge. Tatsächlich führt die Digitalisierung von 23 cm x 23 cm-Luftbildern auf sehr große Datenmengen, die bisher als der limitierende Faktor bei der Einführung digitaler Orthophotos in die Praxis galten: Wenn die Qualität des photographischen Luftbildes auch im späteren digitalen Orthophoto erhalten bleiben soll, dann müßte die Modulationsübertragungsfunktion des digitalisierten Bildes mit der des Analogbildes übereinstimmen. Etwas vereinfacht ergibt sich für die Angabe der Auflösung in Linienpaaren/Millimeter (lp/mm) bei n lp/mm unter Beachtung des Abtasttheorems (vgl. BÄHR 1985):

$$\text{Bildelemente Luftbild in [MB]} = \left(\frac{230 \text{ mm} \cdot 10^{-3}}{\frac{1 \text{ mm}}{2 n}} \right)^2 = (0,46 \cdot n)^2 \quad (1)$$

was in Abb. 2 graphisch veranschaulicht ist.

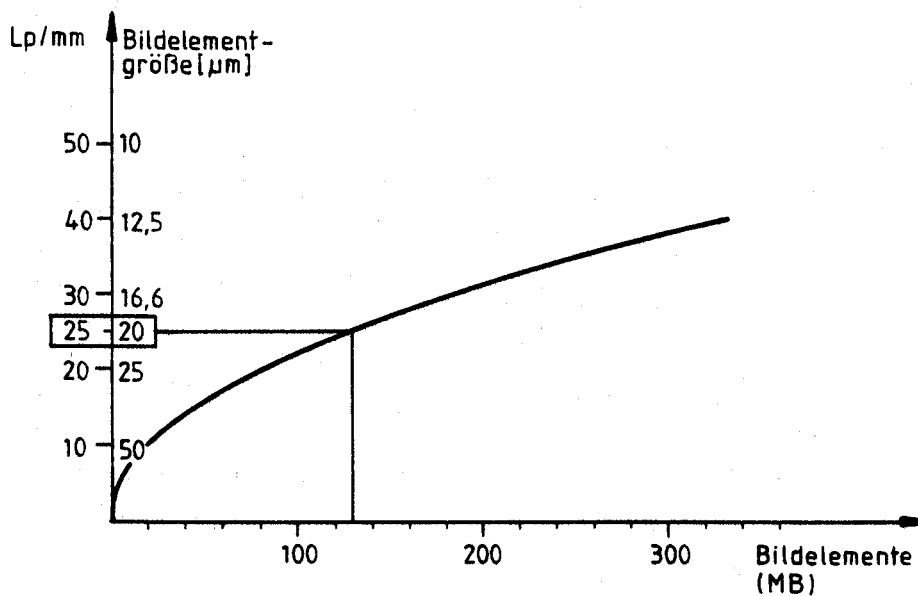


Abb. 2: Anzahl der Bildelemente eines Luftbildes 230 mm x 230 mm als Funktion der Bildelementgröße

Bei Annahme von 25 lp/mm über die gesamte Bildfläche führt (1) auf 132 MB. Dies bedeutet, daß ein einziges Schwarz-Weiß-Luftbild digitalisiert gerade auf einem Magnetband mit 6250 BPI Platz hat. Man kann aber auch fordern, daß die Auflösung des digitalen Orthophotos nicht die des Originalbildes, sondern lediglich die eines analog produzierten und gedruckten Orthophotos zu haben brauchte (WIESEL 1985). In diesem Fall erfordert das lediglich eine Bildelementgröße von 50 μm und damit eine Datenmenge von nur 21 MB. Der Faktor 6 im Vergleich zum obigen Beispiel bleibt größenordnungsmäßig auch für die Kosten und damit für die Wirtschaftlichkeit der Herstellung digitaler Orthophotos bestehen.

Über die "richtige" Bildelementgröße bei der Digitalisierung von Luftbildern ist viel diskutiert und geschrieben worden. Mehr als alle theoretische Überlegung zählt am Ende aber, wieviel dem Benutzer digitaler Orthophotos die Bildqualität des Ergebnisses wert ist. Hier kann es sicher keine allgemein gültige Antwort geben. Festzuhalten wäre jedoch folgendes:

- Eine Bildelementgröße von $12,5 \mu\text{m}$ erhält die Qualität des Originalbildes - ein theoretischer Wert, da bisher bei der Abtastung kleinere Elemente als $20 \mu\text{m}$ durch Rauschen praktisch ausgeschlossen waren. Auf neueste Entwicklungen von ZEISS darf man gespannt sein (FAUST 1989).
- Bei einer Bildelementgröße von $50 \mu\text{m}$ entstehen für das menschliche Auge sichtbar Sprünge an linienhaften Elementen hohen Kontrasts ("Treppeneffekt")

In Tabelle 1 sind die Datenmengen verschiedener Bildtypen zusammengestellt. Bei der Digitalisierung photographischer Vorlagen kommt man auf Größenordnungen, die praktisch nicht mehr auf Magnetband gespeichert werden können, wenn man an Massenproduktion von Orthophotos denkt. Der Einsatz von optischen Platten zeigt jedoch einen Ausweg.

Sensor	Bildgröße (Objekt- raum)	Bildelement- größe (Bildraum)	Bildelemente pro Bild	Bilder pro Magnetband 6250 BPI	Bilder pro optische Platte 2 x 1 GB
LANDSAT- MSS	$(185\text{km})^2$	$(80\text{m/M})^2$	7,4 MB	17,8	135,1
LANDSAT- TM	$(185\text{km})^2$	$(30\text{m/M})^2$	40,4 MB	3,2	24,7
SPOT	$(60\text{km})^2$	$(10\text{m/M})^2$	36,0 MB	3,7	27,8
Luftbild	$(230\text{mm} \cdot \text{M})^2$	$(50\mu)^2$	21,0 MB	6,3	47,6
Luftbild	$(230\text{mm} \cdot \text{M})^2$	$(20\mu)^2$	132,0 MB	1,0	7,6
KFA-1000	$(300\text{mm} \cdot \text{M})^2$ =(80km)	$(12,5\mu)^2$	576,0 MB	0,2	1,7

Tab. 1: Datenmenge von Bildern verschiedener Sensoren

M bedeutet die jeweilige Bildmaßstabszahl

Einkanalige Bildvorlagen

Die sowjetische KFA-1000-Kamera, im Rahmen des COSMOS-Programms vom Satelliten aus eingesetzt (vgl. KRAEMER 1988), wird als ein Beispiel für extrem hochauflösendes photographisches Bildmaterial angeführt.

2.3 DIGITALE BILDENTZERRUNG

Die folgende Darstellung basiert auf dem vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der Universität Karlsruhe bis zur Praxisreife entwickelten Systems zur digitalen Bildentzerrung (vgl. WIESEL, BEHR 1988).

Die geometrische Verbindung zwischen Bild- und Geländekoordinaten ist gegeben durch die Kollinearitätsgleichungen

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_0 + \lambda A^T \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{pmatrix}_i \quad (2)$$

wobei die Matrix A die Elemente der äußeren Orientierung des zu entzerrenden Einzelbildes enthält.

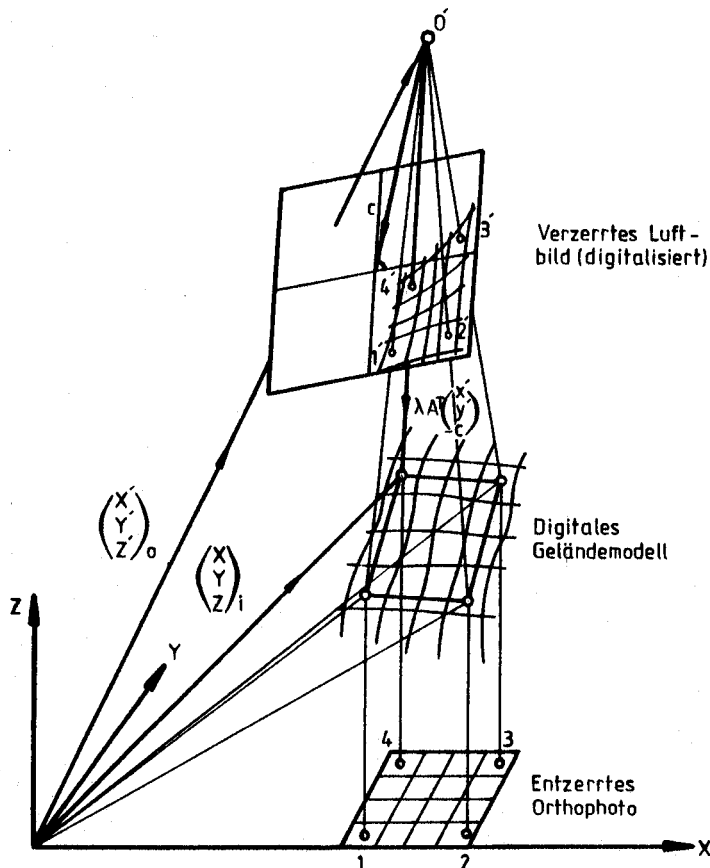


Abb. 3: Herstellung von Orthophotos auf digitalem Wege (schematisch)

Bei der Umbildung geht man vom entzerrten Orthophoto aus und berechnet über Kollinearitätsgleichungen die Positionen der Bildelemente ("Pixel") in den verzerrten Daten, wie in Abb. 3 veranschaulicht. Dieses "indirekte Verfahren" hat den Vorteil, daß eine Entzerrung ohne Lücken oder Überlappungen entsteht; außerdem läßt sich das Verfahren so programmieren, daß eine systematische blockweise Abarbeitung erfolgt. Die Position x' , y' der Grauwerte $g_{x',y'}$ findet man im verzerrten Originalbild nach Umformung von (2) bei bekannter innerer und äußerer Orientierung sowie des DGM.

Die digitalen Originaldaten müßten dafür mit der inneren Orientierung der analogen Originaldaten vorliegen; das ist aber weder beim On-line noch beim Off-line-System der Fall. Die Transformation der digitalisierten Bilddaten in das Sollsystem erreicht man z.B. mit einer Affintransformation. Dabei können neben geometrischen auch radiometrische Abweichungen berücksichtigt werden, die sich bei der A/D-Wandlung ergeben. Zu solchen Abweichungen gehört z.B. der Lichtabfall in CCD-Kameras von analytischen Plotttern. Die Modellierung und digitale Korrektur des Lichtabfalls ist zwar im Prinzip gut bekannt (BÄHR 1979), jedoch trifft man häufig auf praktische Schwierigkeiten, so daß man sich in solchen Fällen damit behilft, jeweils immer nur den zentralen Teil des Bildes auszuwerten.

Die Anwendung der strengen Kollinearitätsgleichungen für jedes einzelne Orthophoto-Bildelement bedeutet natürlich einen extrem hohen Rechenaufwand, den man in der Praxis zu vermeiden trachtet. Dies geschieht dadurch, daß man nur für einige ausgewählte Punkte - sogenannte "Ankerpunkte" - die strengen Gleichungen nimmt und die Zwischenpunkte interpoliert. Es ist naheliegend, als Ankerpunkte die Maschenecken des DGM zu wählen, (vgl. Abb. 3) da die Maschenweite gleichzeitig ein Genauigkeitsmaß darstellt. Als Interpolationsalgorithmus bietet sich die Bilineare Interpolation an (siehe Abb. 4 sowie Gl. 4). Weil die Rechenzeiten trotzdem noch unangenehm hoch liegen, wurde am IPF ein spezielles Interpolationsverfahren entwickelt ("flächenhafte Bilineare Interpolation", BEHR 1989), welches sehr effektiv arbeitet, wie Tab. 3 nachweist.

Rechner	Anzahl Zwischenpunkte	Interpolationsverfahren		
		streng	bilinear	flächenhaft
PDP 11/73	25 x 25	0.98	0.63	0.05
	50 x 50	3.87	2.48	0.10
	100 x 100	15.40	9.85	0.38
	200 x 200	61.43	39.37	1.43
PRIME 750	25 x 25	0.30	0.14	0.01
	50 x 50	1.21	0.56	0.03
	100 x 100	4.82	2.25	0.11
	200 x 200	19.23	8.94	0.42

Tab. 3: Vergleich von Rechenzeiten für verschiedene Interpolationsverfahren
 bei der maschenweisen Entzerrung (aus BEHR 1989), Angaben in Sekunden

Bei der On-line-Entzerrung mit CCD-Kameras am Analytischen Plotter ist die nutzbare Sensorfläche unter Umständen kleiner als die Fläche einer DGM-Masche. Das kommt besonders dann vor, wenn man die verwendete Sensorfläche zur Reduzierung des Lichtabfall-Effekts stark begrenzen muß. In diesem Fall sind die Maschen weiter zu zerlegen, was softwaremäßig gelöst ist.

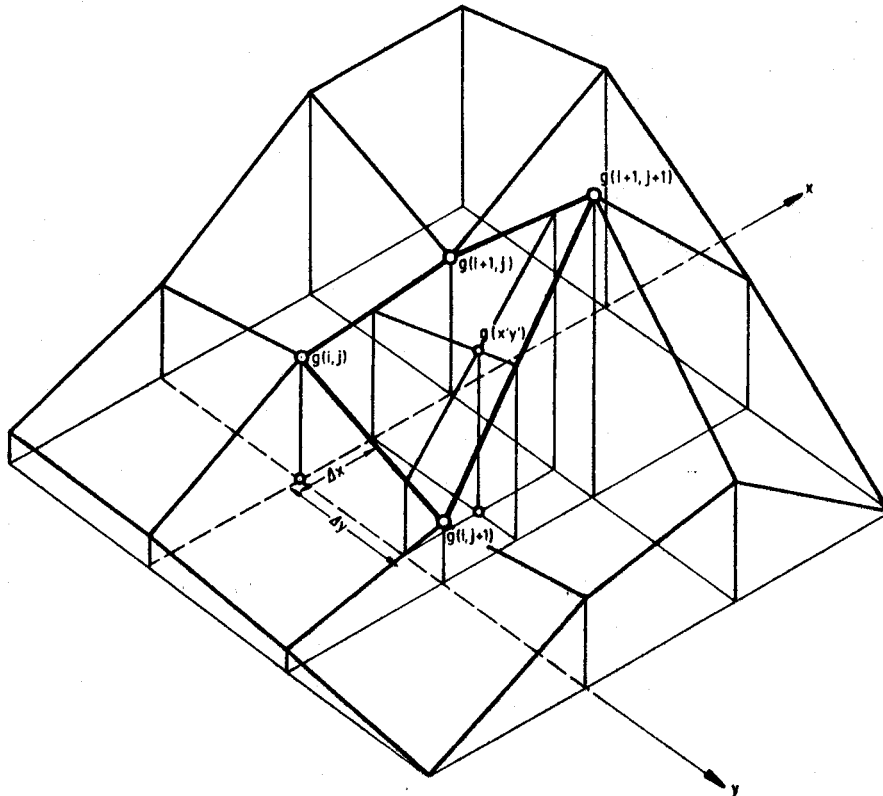


Abb. 4: Interpolation eines Grauwertes aus den Grauwerten seiner Umgebung

Abb. 4 veranschaulicht das Problem der Grauwertzuordnung im Subpixelbereich (Resampling), welches entsteht durch die kontinuierlichen x', y' -Werte aus (2) bei diskret vorliegender Grauwertmatrix g_{ik} . Offensichtlich ist das Problem mit der Höheninterpolation in einem DGM verwandt, und es können auch die gleichen Interpolationsalgorithmen verwendet werden. Allerdings besteht ein grundsätzlicher Unterschied darin, daß für das Resampling eine "Sollfunktion" existiert, was man für eine DGM-Interpolation nicht behaupten kann. Es läßt sich aus den diskreten digitalen Daten die korrekte kontinuierliche Bildfunktion wiederherstellen, und zwar mit einer sinc-Funktion als Interpolationsfunktion der Form

$$g(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} g(ni, nj) \frac{\sin\left(\frac{\pi x}{n} - \pi in\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi y}{n} - \pi jn\right)}{\left(\frac{\pi x}{n} - \pi in\right) \cdot \left(\frac{\pi y}{n} - \pi jn\right)} \quad (3)$$

wo n die Abtastschrittweite bedeutet und $g(x,y)$ der zu interpolierende Punkt. Aus dieser strengen Formel ist ersichtlich, daß theoretisch alle Bildelemente eines digital vorliegenden Bildes zum interpolierenden Grauwert beitragen. Natürlich wäre die Berechnung der kontinuierlichen Bildfunktion auf diese Weise viel zu aufwendig, aber (3) gibt immerhin einen Sollwert, an dem man einfachere Interpolationsfunktionen exakt messen kann.

Für eine praktische Realisierung ist es naheliegend, nur eine beschränkte Umgebung von $g_{x,y}$ zu betrachten. Die einfachste Zuordnung besteht aus der "nächsten Nachbarschaft", bei der $g_{x,y}$ den Grauwert des nächsten digitalen Wertes $g_{i,j}$ erhält. Der Interpolationsfehler beträgt in diesem Fall 15,7% (PRATT 1978, S. 119). Ein weitaus besseres Ergebnis - mit anderen Worten ein entzerrtes Bild höherer Qualität - erhält man bei Verwendung von 4 umgebenden Punkten (vgl. Abb. 4). Diese Bilineare Interpolation ist sehr verbreitet, da sie relativ wenig Rechenaufwand erfordert bei einem Interpolationsfehler von nur 3,7%. Aus Abb. 4 liest man ab:

$$g_{x,y} = g_{i,j} + \Delta x(g_{i+1,j} - g_{i,j}) + \Delta y(g_{i,j+1} - g_{i,j}) + \Delta x \Delta y (g_{i+1,j+1} - g_{i+1,j} - g_{i,j+1} + g_{i,j})_{(4)}$$

Prinzipiell kann man natürlich auch Interpolationsfunktionen höherer Ordnung wählen, wie die Bikubische Interpolation, welche statt 4 die 16 Nachbarelemente benutzt. Der Rechenaufwand steigt dann jedoch sprunghaft an.

2.4 ERGEBNISDARSTELLUNG

Nach der Verarbeitung steht das Ergebnis im Original digital abgespeichert zur Verfügung. Natürlich wird man eine lesbare Version, also ein Halbtonbild, verlangen. Mehr noch: Im allgemeinen wird man ein "Produkt" herstellen wollen, welches formal und inhaltlich festgelegten Standards zu entsprechen hat.

Es ist hier kein Platz, um alle damit zusammenhängenden Aspekte zu beleuchten, so daß lediglich auf die naheliegende Möglichkeit hingewiesen werden soll, im Zusammenhang mit der Herstellung von digitalen Orthophotos gleichzeitig die kartographische Überarbeitung vorzunehmen, und zwar mit der gleichen digitalen ("Raster"-) Technik: Kartenrahmen und Beschriftung können, ebenso wie Höhenlinien und Symbole, interaktiv im Dialog am Bildschirm positioniert werden (vgl. SCHWEINFURTH 1985). Der "Treppeneffekt" der binären Rastergraphik kann dabei durch Interpolation an den Kontrastsprüngen für den Betrachter eliminiert werden. Aus dem "Orthophoto" entsteht durch die kartographische Überarbeitung eine "Orthophotokarte".

Die Ausgabe in Bildform (D/A-Wandlung) ist, ähnlich wie die A/D-Wandlung, bisher noch ein kritischer Punkt, weil große Hardwarekosten anfallen. Anforderungen an ein Bildausgabegerät für die Orthophotoherstellung sollten heute sein:

- * geometrische Präzision (0,1 mm auf 50 cm)
- * Farbfähigkeit
- * hohe Schreibgeschwindigkeit (pro Bild ca. 15 Minuten)

Die Schreibgeschwindigkeit wird durch den Steuerrechner bestimmt. Dieser hat die Bilddaten i.a. von einer Magnetplatte zu holen und sodann zu schreiben. Dabei wird der Q-Bus des Rechners zweimal belastet, dessen Bandbreite ja begrenzt ist. Ein Überschlagsrechnung ergibt:

$$230 \text{ mm}/25 \text{ } \mu\text{m} = 92,0 \text{ MB}$$

$$92 \text{ MB}/15 \text{ min} \sim 100 \text{ KB/s}$$

Die Belastung des Q-Bus mit etwa 200 KB/s ist nicht unkritisch und geht an die Grenze der Kapazität üblicher Steuerrechner, wenn die Dateien unsystematisch gespeichert sind.

Ohne daß hier auf Details eingegangen werden kann, soll darauf hingewiesen werden, daß es nach den Erfahrungen im IPF bei farbigen Orthophotos vorteilhaft ist, das Endprodukt mit konventionellen photographischen Reproduktionsverfahren herzustellen. Dabei geht man von 3 Farbauszügen aus, welche vor ihrer Abspielung auf digitalem Wege für die jeweilige Anwendung optimiert werden, und zwar über Transformation vom R-G-B-Farbraum in den I-H-S-Farbraum und zurück (siehe KAUFMANN 1984).

Abschließend sei noch ein wichtiger Punkt herausgestellt: Die heute verfügbaren Präzisionsausgabegeräte sind (noch?) sehr teuer: Das preiswerteste Gerät liegt ohne Steuerrechner in der Größenordnung von DM 200.000,-, wobei die Preisliste nach "oben offen" ist als Funktion von Bildformat und Steuerrechner. Ein Nutzer hat sich auch darauf einzustellen, daß es einiger Erfahrungen (also Zeit) bedarf, ehe das Bildausgabesystem im Rahmen eines Produktionsprozesses stabil läuft. Was Preise einerseits und Benutzerfreundlichkeit andererseits anbetrifft, so sind die Instrumentenfirmer herausgefordert, Alternativen zu den heute verfügbaren Geräten anzubieten. Die Investitionen werden sich auszahlen, denn der Markt ist da.

3. MÖGLICHKEITEN DIGITALER ORTHOPHOTOS

Von einer neuen Technik erwartet man selbstverständlich, daß zunächst das konventionelle Produkt unter etwa den gleichen Bedingungen hergestellt werden kann was Zeit, Qualität und Kosten anbetrifft. Darüber hinaus müssen die Investitionen, die mit der Einführung einer neuen Technik verbunden sind, zu einer Produktverbesserung führen, wenn sie sich rechtfertigen lassen sollen - und zwar in der Regel zu einer erheblichen Produktverbesserung.

Im Falle des digitalen Orthophotos besteht diese erhebliche Produktverbesserung nicht in einer Verbesserung der Qualität oder einer Senkung der Kosten, sondern in einer gewaltigen Erweiterung der

Möglichkeiten gegenüber dem konventionellen Orthophoto. Nicht für alle, aber für die wichtigsten dieser Möglichkeiten besteht ein dringender Bedarf der Praxis. Was digitale Orthophotos in diesem Zusammenhang anbieten, wird im Folgenden anhand von Beispielen erläutert.

3.1. Verfeinerung des Produkts und Integration in Geo-Informationssysteme (GIS)

Wenn Lage und Höhe von Einzelobjekten im DGM separat vorliegen, dann lassen sich diese zusammen mit der Geländeinformation so umbilden, daß radiale Versetzungen wegen Abweichung der Objekte von DGM entfallen. Abb. 5 zeigt dies am Beispiel einer Autobahn-Talbrücke. Mit Bezug auf das digitale Geländemodell, also die Höhen des Geländes unter der Brücke, wird diese geometrisch völlig falsch abgebildet. Die korrekte Darstellung gelingt durch separate Entzerrung der Fahrbahnfläche.

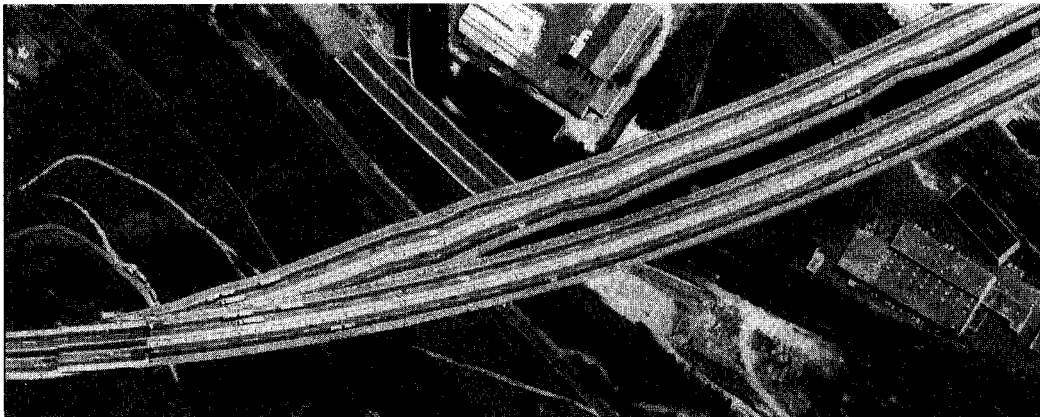


Abb. 5: Falsche und korrekte Darstellung einer Autobahnbrücke in einem Orthophoto.
Oben: DGM bezogen auf Gelände
Unten: DGM bezogen auf Fahrbahnen (aus BEHR 1989)

Die bei der separaten Entzerrung von Einzelobjekten unvermeidlichen Flächen ohne Information lassen sich übrigens durch Hinzunahme der Nachbarbilder wieder füllen: Für das Beispiel der Brücke können die unter der Brücke liegenden, im Bezugsbild verdeckten Bildteile aus den Nachbarbildern eingefügt werden. Der zusätzliche Aufwand ist dabei abhängig von den umzubildenden Objekten und kann natürlich - etwa bei Häusern! - erheblich groß werden. Andererseits ist hier ein Weg aufgezeichnet, wie auf digitalem Wege der störende "Umklappeffekt" in Orthophotos vermieden werden kann.

Die Beziehungen (2) gestatten natürlich grundsätzlich die Transformation des digitalen Bildoriginals in jede beliebige Perspektive, es braucht also kein Senkrechtbild mit Orthoprojektion zu sein. Besonders Regionalplaner werden zu schätzen wissen - mit Hinblick auf ihre eigene Arbeit sowie auf die "Visualisierung" von Planungsvorhaben bei den Betroffenen -, daß ihnen die digitale Umbildung viel Flexibilität erlaubt. Abb. 6 zeigt ein in Schrägansicht transformiertes Senkrechtluftbild einer Feldlage, in welche außerdem auf rein digitalem Wege die Ansicht einer geplanten Gebäudegruppe hineingesetzt wurde. Die Realisierung solcher und ähnlicher Möglichkeiten ist "lediglich" eine Softwarefrage, wobei die digitale Orthophototechnik insgesamt eine ideale Voraussetzung bildet.



Abb. 6: Kombination eines
 Perspektivbildes mit einer
 Bauplanung (aus KUHN 1989)

Während die bisherigen Beispiele eine Verfeinerung des Produkts "Orthophoto" zeigen, vermittelt Abb. 7 einen Eindruck davon, wie in Zukunft digitale Orthophotos in Geo-Informationssystemen Eingang finden können. Abb. 7 zeigt eine Anwendung aus dem Bereich der Bauleitplanung: Die wichtigsten Daten des Flächennutzungsplans von Bad Homburg v.d.H. sind auf der Grundlage eines digitalen Orthophotos dargestellt; auch die Randgestaltung und die Legende wurden zusammen mit der Halbtoninformation verarbeitet und ausgegeben. Die Bauleitplanung ist ein besonders überzeugendes Beispiel dafür, wie das digitale Orthophoto als 1 Datenebene im Rasterformat in einem GIS Verwendung finden kann.



THEMATISCHE ORTHOPHOTOKARTE

Legende

-  Wohnbauflächen
-  Gemischte Bauflächen
-  Gewerbliche Bauflächen
-  Sondergebiete
-  Gemeinbedarfsflächen
-  Flächen für die Forstwirtschaft
-  Grünflächen
-  Wasserflächen
-  Überörtliches Straßennetz
-  Flächen für den Schienenverkehr

0 100 200 300 400 500 m

Thematik:

Ausschnitt aus dem Flächennutzungsplan
 des Landesverbandes Frankfurt
 Blattnummer: 7005
 Bad Homburg v. d. Höhe

Bildverarbeitung und digitale Kartographie:

E. Schulz, G. Schweinfurth
 Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
 Universität Karlsruhe, BRD

Abb. 7: Ausschnitt Bebauungsplan Bad Homburg v.d.H. mit unterlegtem Orthophoto (Original in Farbe)

Mittelfristig wird der größte Nutzen und die größte Verbreitung digitaler Orthophotos im Zusammenhang mit GIS gesehen, und zwar für die Bereiche Planung und Umwelt.

3.2. Einstieg in die automatische Bildauswertung

Langfristig kommt zu den in Kapitel 3.1 dargestellten Möglichkeiten noch hinzu, daß das digitale Orthophoto Basis für eine automatische Bildauswertung ist, automatisch im Sinne der Substitution des Operateurs durch den Rechner. Entsprechende Verfahren sind z.Zt. an vielen Stellen der Welt unter intensiver Entwicklung, vor allem zunächst bezogen auf Anwendungen in der Ingenieurvermessung und der Qualitätskontrolle bei der Industrieproduktion.

Bekanntlich können Punktmessungen mit Korrelationstechniken zu erstaunlich hohen Genauigkeiten führen. Tabelle 4 stellt Ergebnisse der Bestimmung von Rahmenmarken aus automatischer und manueller Messung einander gegenüber. Die Messungen erfolgten am KERN DSR-11 des IPF, wobei für die Korrelation im Feinmodus das Maximum des Grauwertgebirg durch Ausgleichung zu bestimmen ist, modelliert als elliptisches Paraboloid:

$$g = Ax^2 + Bx + Cy^2 + Dy + E$$

Maximum $x = -B/2A$ (5)

bei: $y = -D/2C$

Tabelle 4 gibt die innere Genauigkeit an. Die Dauer der 4 Messungen liegt sowohl für den manuellen als auch für den automatischen Fall zwischen 1 und 2 Minuten (PDP 11/73). Die Messungen von Rahmenmarken ist sicher ein Sonderfall der Punktmessungen, aber das Verfahren läßt sich für signalisierte Punkte entsprechend modifizieren.

	Automatische Messung		Manuelle Messung	
	$M_x \pm$	$M_y \pm$	$M_x \pm$	$M_y \pm$
1	0,6	1,0	1,7	2,7
2	0,0	0,4	2,2	1,7
3	0,5	0,8	2,5	3,3
4	0,5	0,7	2,3	2,8

Tab. 4: Positioniergenauigkeit bei der Bestimmung von Rahmenmarken aus jeweils
 10 Wiederholungsmessungen an KERN DSR-11 des IPF. Angaben in μm

Korrelationstechniken werden immer häufiger eingesetzt zur automatischen Bestimmung von DGMs als eine Voraussetzung für Orthophotos. Andererseits können Orthophotos wiederum DGMs kontrollieren. Nach einem

Vorschlag von FINSTERWALDER (1985) sind am IPF zwei digitale Orthophotos untersucht worden, die dasselbe Gebiet zeigen, die mit demselben DGM, aber verschiedenem Bildmaterial hergestellt wurden. Vorausgesetzt, das DGM sei korrekt, so müßte die stereoskopische Betrachtung das Gebiet als eine vollkommene Ebene erscheinen lassen. Das Auge reagiert auf Abweichungen von der Ebene sehr empfindlich - so erkennt man neben Fehlern des eigentlichen Geländes auch den Einfluß von Objekten wie Bäume und Häuser, die vom DGM abweichen.

Es bietet sich an, aus digitalen Orthophotos automatisch Objekte zu extrahieren. Daß dies keine triviale Aufgabe ist, haben schon die Arbeiten des Forschungsinstituts für Informationsverarbeitung und Mustererkennung (FIM) gezeigt (GROCH 1980, KAZMIERCZAK et al. 1986, STIES et al. 1986). Anhand von Abb. 8 sehen wir den automatischen Vergleich zwischen zwei digitalen Orthophotos, deren Aufnahmen 13 Jahre auseinanderliegen. Hier geht es darum, Häuser zu detektieren, die in dieser Zeit neu gebaut wurden. Dazu werden über einen Formansatz zunächst Häuser in beiden Vorlagen getrennt ermittelt und sodann durch Überlagerung die Neubauten festgestellt.

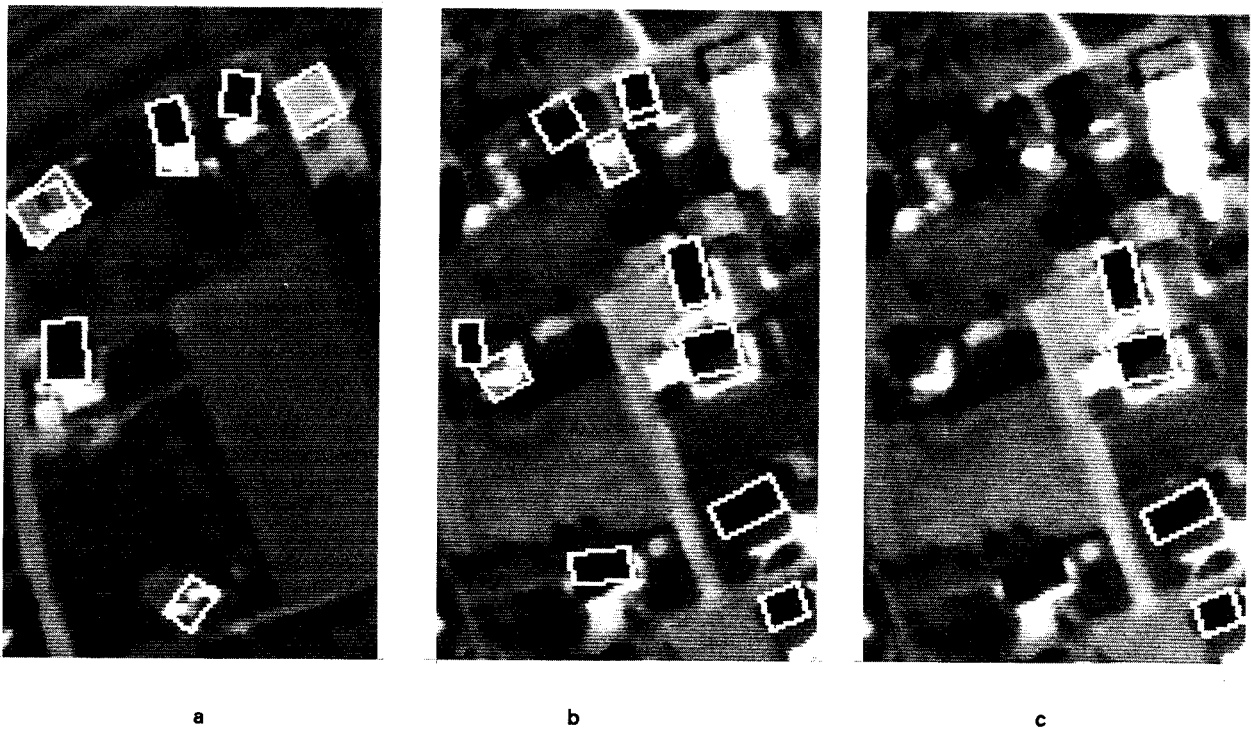


Abb. 8: Vergleich eines alten (a) und neuen (b) Orthophotos zur Extraktion von Neubauten (c),
 aus PETERLE (1989)

Die automatische Erfassung linienhafter Elemente kann prinzipiell durch Linienverfolgungsalgorithmen oder durch Kantenextraktion erfolgen (PETERLE 1989). Eine Kombination beider Möglichkeiten liegt nahe.

Automatische Mustererkennung in natürlichen Szenen bedarf noch erheblichen Forschungsaufwandes, ehe an praktische Anwendung zu denken ist. Eine Entwicklungslinie geht dahin, über Expertensysteme Zusatzinformation in den Entscheidungsprozeß bei der Objektextraktion mit einzubeziehen.

4. AUSBLICK

Die Zukunft der Photogrammetrie (teilweise bereits die Gegenwart!) ist digital - selbst Skeptiker sind inzwischen überzeugt. Es ist zwar kein Widerspruch, wenn die Praxis heute noch effektiv und erfolgreich mit konventionellen Systemen und Verfahren arbeiten kann, wie etwa im Bereich der Orthophotoherstellung. Jedoch: Größere neue Investitionen wird man heute selbstverständlich zukunftsorientiert digital vornehmen.

Das digitale Orthophoto ist ein technologisches Leitfossil: Es zeigt an, daß der Schritt aus der analogen in die digitale Welt getan wurde. Wie bei vergleichbaren technologischen Umbrüchen geht die Entwicklung dabei schrittweise und nach festen Regeln vor sich:

(1) In einem ersten Schritt wird versucht, mit neuen Methoden die konventionellen Produkte herzustellen.

(2) Erst in einem zweiten Schritt erfolgt konsequent die Ausnutzung der neuen Methoden für neue Produkte (BÄHR 1988).

Bezogen auf das abgehandelte Thema heißt dies: Man wird dem digitalen Orthophoto nicht gerecht, wenn man dabei lediglich geometrisch entzerrte Papierbilder im Sinn hat. Die Möglichkeiten, die sich neu eröffnen, repräsentieren die eigentlichen Aufgaben für die Photogrammetrie. Mittelfristig ist dies die Integration von digitalen Orthophotos in Geo-Informationssysteme, langfristig die Entwicklung weitgehend automatischer Bildauswerteverfahren.

Was immer unentbehrlich sein wird, das ist die gewaltige Informationsfülle von Bildern und teilweise wohl auch der unmittelbare Zugriff des menschlichen Betrachters auf diese Information. Information über die Erdoberfläche ist ein wachsender Markt. Die Photogrammetrie ist herausgefordert, hier zu investieren.

LITERATUR

- Bähr, H.-P.: Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung. In: Digitale Bildverarbeitung - Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung. Wichmann Verlag, Karlsruhe 1985
- Bähr, H.-P.: Analytische Bestimmung und digitale Korrektur des Lichtabfalls in Bildern eines Hochleistungsobjektivs. Bildmessung und Luftbildwesen 3/1979
- Bähr, H.-P.: Wechselwirkungen von Aufgaben, Instrumenten und Verfahren bei geobezogenen Informationssystemen. Seminar Geo-Informationssysteme in der öffentlichen Verwaltung, Karlsruhe 1988 (erscheint bei SPRINGER)
- Behr, F.-J.: Einsatz von CCD-Kameras zur differentiellen Entzerrung photogrammetrischer Aufnahmen. Diss. IPF Karlsruhe, 1989
- Faust, H.: Digitalisierung photogrammetrischer Bilder. 42. Photogrammetrische Woche, Stuttgart 1989
- Finsterwalder, R.: Orthophoto - Selbstkontrolle. Bildmessung und Luftbildwesen, 3/1985
- Groch, W.-D.: Automatisierung der Extraktion linienhafter Objekte aus Grauwertbildern - Forschungsinstitut für Informationsverarbeitung und Mustererkennung Bericht Nr. 81, Karlsruhe, 1980
- Kaufmann, H.: A multiple approach in remote sensing for structural and lithological mapping by use of MOMS/LANDSAT/HCM data. Proc. EARSeL/ESA-Symp., Integrativ Approaches, Guildford UK, ESA SP-215, 1, ESTEC, 39-45, 1984
- Kazmierczak, H.: Integration of Artificial Intelligence Concepts into the Methods for Extracting et al. Line Objects from Monochromatic Aerial Image - Forschungsinstitut für Informationsverarbeitung und Mustererkennung, Bericht Nr. 156, Ettlingen 1986
- Kraemer, J.: Map Production and Revision with Satellite Photographes taken by the MKF-6 Camera and by the Cameras KATE-140, KATE-200 and KFA-1000. ISPRS Intercomm 1/II, Kyoto 1988
- Kreiling, W.: Ein digitales System zur Herstellung von Orthophotos. Festschrift Kurt Schwidersky, Karlsruhe 1975
- Kuhn, H.: Digitale Erzeugung von Perspektivbildern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, HeftNr. 347, München 1989

- Peterle, J.: Fortführung topographischer Karten mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung.
 Diss. IPF Karlsruhe 1989
- Pratt, W.K.: Digital Image Processing. John Wiley and Sons, New York 1978
- Schweinfurth, G.: Vom digitalen Orthophoto zur digitalen Orthophotokarte,
 In: Digitale Bildverarbeitung - Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung.
 Wichmann Verlag, Karlsruhe 1985
- Schweinfurth, G.: Satellite and Thematic Orthophotomaps by means of Image Optimization and Digital
 Cartographie, IGPF Kongress, Komm. IV Kyoto 1988
- Schwidefsky, K.: Die Orthophotokarte und die Entzerrungsverfahren für unebenes Gelände.
 Bildmessung und Luftbildwesen 4/1965
- Sties, M. et al.: Bausteine für ein automatisches System zur wissensgestützten Bildanalyse. Teil 1:
 Übersicht über das Gesamtprojekt - Forschungsinstitut für Informationsverarbeitung und
 Mustererkennung, Bericht Nr. 171, Ettlingen, 1986
- Wiesel, J.: Herstellung digitaler Orthophotos. In: Digitale Bildverarbeitung - Anwendung in
 Photogrammetrie und Fernerkundung. Wichmann Verlag, Karlsruhe 1985
- Wiesel, J./
 Behr, F.-J.: Orthophotoherstellung auf digitalem Wege mit dem KERN DSR-11.
 Bildmessung und Luftbildwesen, 1988

ZUSAMMENFASSUNG

Die Publikation stellt im wesentlichen die Arbeiten zusammen, die in den vergangenen 15 Jahren am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung auf dem Gebiet der digitalen Orthophotos bis hin zur Operationalität geleistet wurden. Methodisch wird, ausgehend von der Datenmenge, unterschieden zwischen Off-line- und On-line-Verfahren, wobei Gesichtspunkte der Wirtschaftlichkeit von Algorithmen mit behandelt werden. Die Möglichkeiten digitaler Orthophotos gehen weit über das konventionelle Produkt hinaus: Mittelfristig bietet sich die Integration in Geo-Informationssysteme an, langfristig die Entwicklung vollautomatischer Bildauswerteverfahren.

ABSTRACT

The paper presents particularly the procedures which have been developed to operational standard at the Institute for Photogrammetry and Remote Sensing during the past 15 years. As far as the methods are concerned, off-line and on-line methods are discussed, considering data quantity and taking into account economy of algorithms. Digital orthophotos exceed the possibilities of the conventional product: At the short run integration into geo-information systems, at the long run development of fully automatic image analysis is offered.

Prof. Dr.-Ing. H.-P. Bähr

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF)

Universität Karlsruhe

Englerstr. 7

D-7500 Karlsruhe 1