

Das Facetten-Stereosehen und die neue Generation digitaler Luftbildkameras

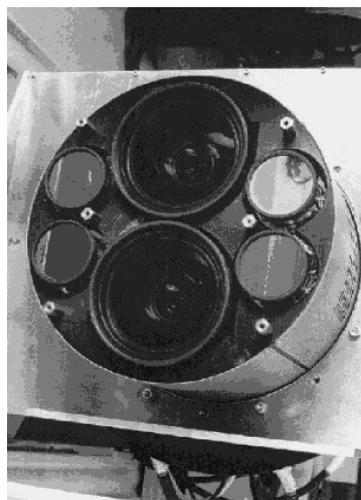
Martin Schlüter

1. Einführung

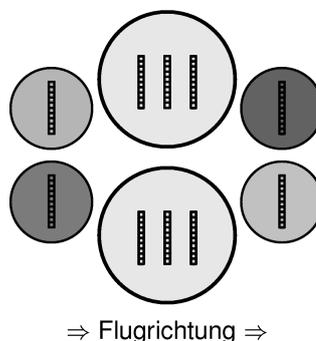
Das Facetten-Stereosehen ist als allgemeine Methode für den Bereich des Computersehens formuliert mit dem Ziel der vollständigen Rekonstruktion der geometrischen und strahlungsphysikalischen Eigenschaften von Objektoberflächen im Rahmen einer vorgegebenen mathematischen, modellhaften Beschreibung, *Wrobel (1987)*. Bereits auf der 42. photogrammetrischen Woche in Stuttgart hat *Wrobel (1989)* konkret auf die Nutzung von Stereobildern der digitalen Dreizeilenkamera als eine von zahlreichen Verallgemeinerungsoptionen des Facetten-Stereosehens hingewiesen. Gerade die konzentrierten Forschungsarbeiten am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der TU Darmstadt in den 90er Jahren haben immer wieder bestätigt, dass das Facetten-Stereosehen als mathematisches Grundgerüst aufgefasst werden darf, in welchem die expliziten Formulierungen sowohl für die Sensormodelle als auch für die Oberflächenmodelle im Objektraum modular austauschbar sind – ganz im Sinne der jeweiligen praktischen Anforderungen.

In der Konsequenz bedeutet dies, dass sich einmal gewonnene Expertise zur Oberflächenrekonstruktion mit dem Facetten-Stereosehen sehr gut auf neue Problemstellungen, neue Anwendungsfelder oder auch neue Kamertechnik übertragen lässt. Dieser Aufsatz vertieft diese These im Hinblick auf digitale Mehrzeilenkameras wie DPA oder HRSC-A und diskutiert die entsprechende Grundgleichung. Die Analyse des Gesamtprozederes zeigt aber auch auf, dass die klassischen Voraussetzungen für den Einsatz der Bildpyramidenteknik im Rahmen der Näherungswertbestimmung durch die Mehrgittertechnik nicht streng gegeben sind. Über eine empirische Untersuchung wird jedoch nachgewiesen, dass die tatsächlich wirksam werdenden Approximationsfehler die Näherungswertbestimmung nicht störend beeinflussen. Insgesamt gesehen erhält man mit dem Facetten-Stereosehen einen bemerkenswert schnörkellosen Weg zur mathematisch strengen Lösung der Aufgabe der automatischen photogrammetrischen Oberflächenrekonstruktion mit Bilddaten der digitalen Mehrzeilenkamera.

Die Ankündigungen kommerziell vertriebener digitaler Luftbildkameras seitens der Industrie bilden den Hintergrund für diesen Aufsatz, *Sandau et al. (1999)*, *Hinz (1999)*. Damit könnten absehbar eine Mehrzeilenkamera (mit einer Optik für alle Sensorzeilen) sowie ein flächensensorbasiertes System (mit je einer Optik pro CCD-Sensor) miteinander in Konkurrenz treten, zumal beide Lösungen auf vergleichbare Bodenpixelgrößen und Spektralbereiche abzielen. Am BKG Frankfurt am Main wurden im Rahmen des Projektes UTOMA praktische Erfahrungen mit Aufnahmen des Kameraprototyps DPA gesammelt, vgl. Abb. 1. Diese auf *Hofmann (1986)* zurückgehende, erste digitale Luftbildkamera vereinigt in sich bereits die genannten Grundzüge der neuen Generation digitaler Luftbildkameras, nämlich sowohl das Prinzip der Mehrfachoptik als auch gleichzeitig das der



(a)



(b)

Designparameter des Stereomoduls:	
Kamerakonstante:	80mm
Pixelgröße:	10 × 10µm ²
Anzahl Pixel pro CCD-Zeile:	2 × 6000
Konvergenz- (Stereo-) winkel:	±25°
Blickfeld senkrecht zur Flugrtg.:	±37°
Spektralbereich:	515 – 780nm

Designparameter des Multispektralmoduls:	
Kamerakonstante:	40mm
Pixelgröße:	10 × 10µm ²
Anzahl Pixel pro CCD-Zeile:	1 × 6000
Konvergenz- (Stereo-) winkel:	–
Blickfeld senkrecht zur Flugrtg.:	±37°
Spektralbereiche:	440 – 525nm 520 – 600nm 610 – 685nm 770 – 895nm

(c)

Abbildung 1: Kameradesign der DPA (=Digital Photogrammetry Assembly) nach *Angermaier et al. (1998)* (a): Laborphoto. (b): Schema der Anordnung von Objektiven und CCD-Zeilen. (c): Ausgewählte Kenngrößen.

CCD-Sensorzeilen und eröffnete damit frühzeitig ein faszinierendes Erprobungsfeld für die ingenieurtechnische Anwendung. Während das flächensensorbasierte Konzept eine möglichst enge Anlehnung an die klassische Luftbildkamera bzw. digitale Nahbereichsaufnahmesysteme sucht, ergeben sich aus dem zeilenbasierten Konzept durch die Notwendigkeit einer externen Erfassung der hochfrequenten Flugbewegungen durch eine inertielle Messeinheit (IME) bzw. durch IME/DGPS Kombinationslösungen gravierendere Unterschiede gegenüber der klassischen Vorgehensweise. Von daher wird im folgenden ausschließlich auf das zeilensensorbasierte Konzept eingegangen.

2. Einsatz des Facetten-Stereosehens im Hinblick auf Mehrzeilenkameras

Um das Facetten-Stereosehen systematisch einzuordnen, wird in der entsprechenden einführenden Literatur meist die Unterscheidung von bildraumorientiert gegenüber objektraumorientiert formulierten Verfahren bemüht, vgl. z.B. *Bähr und Vögtle* (1991). Das Facetten-Stereosehen arbeitet äußerst konsequent im Objektraum und wird daher bevorzugt als typischer Vertreter der Bildzuordnung im Objektraum zitiert. Um die Unterschiede zwischen beiden Herangehensweisen an die Aufgabe der Bildzuordnung am Beispiel der Mehrzeilenkamera zu veranschaulichen, wird ein kleiner Ausschnitt aus einem Bildflug betrachtet, vgl. Abb. 2, aufgenommen mit der Kamera HRSC-A. Bei diesem Kameratyp sind 5 CCD-Zeilen in etwa gleichabständig und parallel zueinander in der Bildebene angeordnet, durch reduzierte Taktraten der zweiten und vierten Zeile gegenüber der nadirblickenden und den äußeren, stereoblickenden Zeilen kommt es zu stark von der quadratischen Form abweichenden Pixelgrößen mit einem Seitenlängenverhältnis von ca. zwei zu eins. Darüber hinaus zeigt der gewählte Ausschnitt eine Szene mit den Auswirkungen von - zugegebenermaßen untypisch starken - unregelmäßigen Bewegungen des kameratragenden Flugzeugs. Es wird deutlich, dass die automatische Bildzuordnung von Rohbilddaten oftmals (zumindest im dargestellten *worst-case*) schwierig sein kann, im Einzelfall sogar unmöglich. Eine erfolgversprechendere Strategie baut auf lokal vorentzerrten Rohbildern auf. Dies geschieht mit der Konsequenz, dass nach dem Vorentzerrungsschritt die grundsätzlich einfache Beziehung zwischen Pixelkoordinatensystem und den sensorzeilenweise vorliegenden äußeren Orientierungen verloren geht und nach der Bildzuordnung in einem iterativen Prozeß wiederhergestellt werden muss, vgl. z.B. *Haala et al.* (1998). Diese Vorgehensweise ist dann akzeptabel, wenn nur relativ wenige Zuordnungen bestimmt werden müssen, z.B. im Rahmen der Generierung von Verknüpfungspunkten in der Phase der präzisen Wiederherstellung der äußeren Orientierungen. Sie ist aber weniger geeignet und auch unökonomisch, wenn die Aufgabenstellung in der möglichst präzisen Wiederherstellung der Objektraumboberfläche mit einer sehr hohen Stützpunktdichte besteht. Hier ist auf den objekt-raumbasierten Ansatz zu verweisen, bei dem sofort der direkte Übergang in den Objektraum vorgenommen wird, bei dem die Normalgleichungskoeffizienten für die Oberflächenrekonstruktion aus Größen im Objektraum abgeleitet werden und bei dem dann konsequenterweise auch auf die Rückkehr in den Bildraum verzichtet wird.

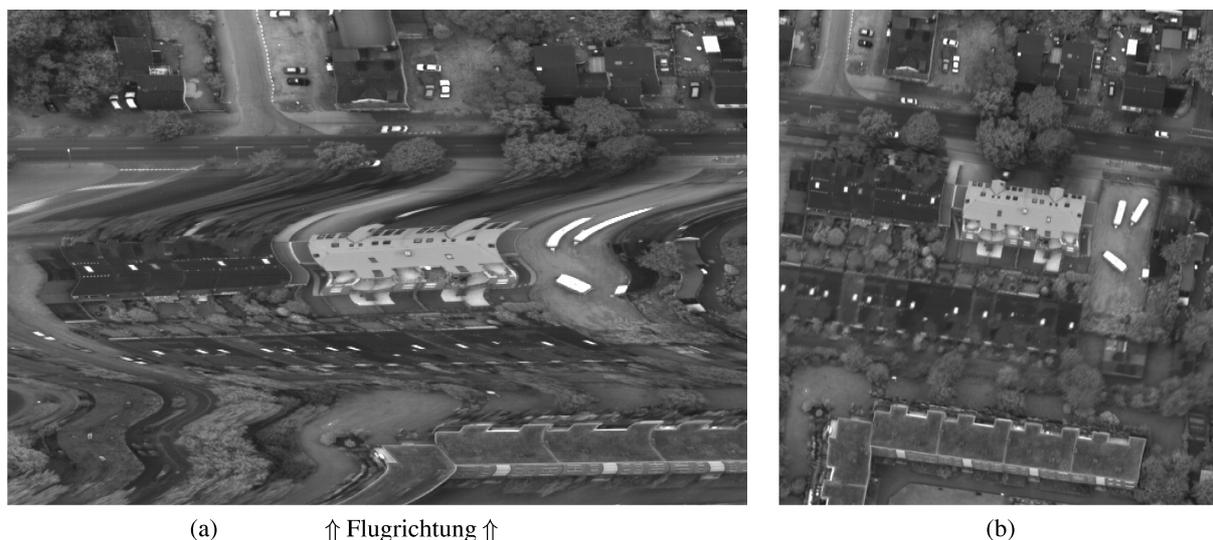


Abbildung 2: Beispiel für extrem unregelmäßige Flugzeugbewegungen; Ausschnitt aus HRSC-A Bilddaten, Bildflug *Duisburg*. (a): Rohbilddaten. (b): Vorentzerrung auf Horizontalebene.

Das Procedere des Facetten-Stereosehens soll nun am Beispiel der Mehrzeilenkamera etwas genauer betrachtet werden. Ein Pixelgrauwert von einem Zeilenscannerbildflug wird geometrisch beschrieben durch die Angabe seiner Zeilen- und Spaltenposition im Rohbild, der jeweiligen CCD-Zeile sowie des jeweiligen Flugstreifens.

Anhand der Daten der inneren Orientierung und den Aufzeichnungen des für die Synchronisation von DGPS, IMS und Pixelgrauwerten unverzichtbaren Zeitsignals kann der Pixelgrauwert in äquivalenter Weise auch über seine Position in der Bildebene und seinen Zeitstempel geometrisch beschrieben werden, vgl. Gleichung 1. Der Zeitstempel t bildet das Bindeglied zu den äußeren Orientierungen, die für jede aufgezeichnete Sensorzeile separat vorliegen. Das "Kochrezept" für die in Abb. 3 illustrierte Bildzuordnung im Objektraum lautet dann in seinen Grundzügen: Betrachte jeden Pixelgrauwert als Beobachtung im Sinne einer vermittelnden Ausgleichung nach Kleinsten Quadraten, projiziere ihn entsprechend seiner inneren und äußeren Orientierung auf eine approximativ vorliegende Startfläche im Objektraum und formuliere dort die Verbesserungsgleichung mit Bezug zu den unbekanntem Parametern im Objektraum. Als unbekannte Parameter werden üblicherweise die Parameter eines geometrischen Oberflächenmodells, die Parameter eines Oberflächengrau- bzw. Oberflächenfarbwertmodells sowie ferner wenige radiometrische Transferparameter eingeführt. Zu dem resultierenden Gleichungssystem sind nach *Wrobel et al.* (1992) weitere Regularisierungsgleichungen mit Bezug auf die Parameter der Oberflächengeometrie zu ergänzen. Anschließend sind die resultierenden Normalgleichungen zu lösen, bei Bedarf können weiterhin die Standardabweichungen aller Unbekannten berechnet werden.

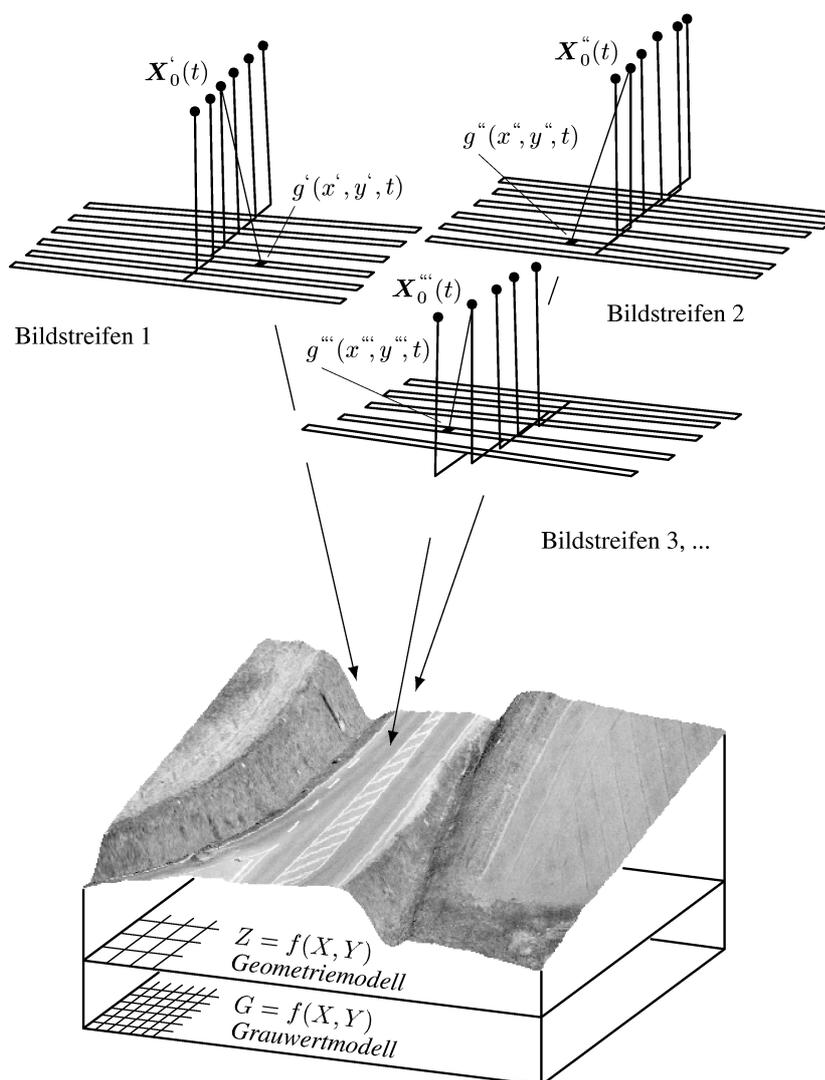


Abbildung 3: Mehrbildzuordnung im Objektraum mit Mehrzeilenkamerabildern. Die Projektionsstrahlen von drei Bildpixeln sind skizziert. Die Oberflächengeometrie $Z = f(X, Y)$ und die Oberflächengrauwerte $G = f(X, Y)$ werden durch vermittelnde Ausgleichung bestimmt. Wie angedeutet, wird für die Oberflächengrauwerte in der Regel eine feinere Auflösung als für die Oberflächengeometrie gewählt.

Die Korrespondenzbeziehung zwischen dem Bildpixelgrauwert und dem Oberflächengrauwert im Objektraum ist die Ausgangsgleichung zur Formulierung der Verbesserungsgleichung. Die radiometrischen Transferparameter werden üblicherweise mit lokal begrenzter Gültigkeit im jeweiligen Bildstreifen definiert:

$$\begin{aligned}
& (g'(x', y', t) + v_{g'}(x', y', t)) \cdot h_2' + h_1' \\
& = G(X, Y) \\
& = G^\circ(X^\circ, Y^\circ) + dG^\circ(X^\circ, Y^\circ) + \left(\frac{\partial G^\circ(X^\circ, Y^\circ)}{\partial X} \left(\frac{X^\circ - X_0'(t)}{Z^\circ - Z_0'(t)} \right) + \frac{\partial G^\circ(X^\circ, Y^\circ)}{\partial Y} \left(\frac{Y^\circ - Y_0'(t)}{Z^\circ - Z_0'(t)} \right) \right) dZ^\circ(X^\circ, Y^\circ)
\end{aligned}$$

mit:	t	Aufnahmezeitpunkt
	(x', y')	Position in der Bildebene
	$(X^\circ, Y^\circ, Z^\circ)$	Schnittpunkt des Projektionsstrahls mit der Startfläche
	$(X_0'(t), Y_0'(t), Z_0'(t))$	Projektionszentrum
	$g'(x', y', t)$	Grauwert im Bildraum
	$v_{g'}(x', y', t)$	Residuum des Grauwerts im Bildraum
	h_1', h_2'	radiometrische Transferparameter
	$G(X, Y)$	Oberflächengrauwert im Objektraum
	$G^\circ(X^\circ, Y^\circ)$	Startwert für den Oberflächengrauwert
	$\partial G^\circ(X^\circ, Y^\circ)/\partial X,$	
	$\partial G^\circ(X^\circ, Y^\circ)/\partial Y$	Grauwertgradienten im Objektraum
	$dG^\circ(X^\circ, Y^\circ)$	Parameterzuschlag für den Oberflächengrauwert
	$dZ^\circ(X^\circ, Y^\circ)$	Parameterzuschlag für die Oberflächengeometrie

Gleichung 1: Verbesserungsgleichung für das Facetten-Stereosehen mit Mehrzeilenkamerabildern.

Der Prozeß der Oberflächenrekonstruktion im Objektraum startet mit einer Approximation der geometrischen Oberfläche $Z^\circ(X, Y)$ und den anhand dieser Vorgabe resultierenden Startwerten der Oberflächengrauwerte $G^\circ(X, Y)$. Der Strahl eines Bildpixels, definiert über die äußere Orientierung mit dem jeweiligen Zeitstempel t , schneidet die Startfläche in $(X^\circ, Y^\circ, Z^\circ)$, wo eine Taylor-Reihenentwicklung angesetzt wird um G° mit dG° und Z° mit dZ° zu korrigieren. Um die endgültige (linearisierte) Verbesserungsgleichung aufzustellen, sind dG° und dZ° anhand der jeweiligen Objektraummodelle zu ersetzen. Zahlreiche Varianten für die Modellierung von Oberflächengeometrie und -grauwerten wurden bislang erfolgreich eingesetzt, angefangen von der Bilinearinterpolation, *Weisensee* (1992), der bikubischen Interpolation und Wavelets, *Tsay* (1996), und Splines für beliebige Flächenverläufe im dreidimensionalen Raum, *Schlüter* (1999). Fragen der Oberflächenmodellierung können hier jedoch vollständig ausgeklammert werden, da die Wahl der Objektraummodelle offensichtlich vollkommen unabhängig davon ist, auf welche Weise der Projektionsstrahl des Pixelgrauwertes zustande kommt, solange nach dem hier verfolgten Grundsatz des *direkten* Pixeltransfers vorgegangen wird. Hier findet man einen grundlegenden Unterschied zu früheren Vorschlägen von *Diehl und Heipke* (1992) für die Anwendung der Bildzuordnung im Objektraum auf der Basis des *indirekten* Pixeltransfers, im Hinblick auf satellitengetragene (nicht auf flugzeuggetragene) Zeilenkameras.

Um nur äußerst geringe Ansprüche an die Qualität der Startfläche $Z^\circ(X, Y)$ stellen zu müssen, greift man in der Regel auf Mehrgittertechniken im Objektraum zurück, in Koppelung mit Bildpyramiden im Bildraum. Diese Strategie hat sich sowohl im photogrammetrischen Nahbereich als auch bei der Luftbildauswertung bewährt, solange die Bilder in ausreichend hoher Auflösung gescannt wurden, *Schlüter und Kempa* (1993), *Schlüter und Wrobel* (1996). Die Berechnung von Bildpyramiden direkt aus den Rohbilddaten einer Zeilenkamera ist aber aus theoretischer Sicht nicht unproblematisch, da insbesondere die Algorithmen für den Schritt der Tiefpassfilterung normalerweise für regelmäßige Pixelgrößen ausgelegt sind. Diese Annahme trifft je nach den lokal unregelmäßig auftretenden Flugbewegungen auf die Zeilenscannerrohbilddaten oft nur bedingt zu. Auf der anderen Seite ist zu erwarten, dass die geometrischen Unregelmäßigkeiten z.B. wegen des grundsätzlich isotropen Charakters der Tiefpassfilterung nicht voll auf das Filterungsergebnis durchschlagen. Insgesamt ist zu klären, ob die Bildpyramidenberechnung unter Einsatz von Standardalgorithmen direkt auf der Basis der Zeilenkamerarohbilddaten eine geeignete Basis für die Näherungswertbestimmung im Rahmen des Facetten-Stereosehens darstellt. Dieser Fragestellung wird im nächsten Abschnitt vertieft nachgegangen. Es ist grundsätzlich im Auge zu behalten, dass von den angesprochenen Approximationsfehlern lediglich die Zwischenergebnisse während der Näherungswertbestimmung betroffen sind! Das Endergebnis der Rekonstruktion wird dagegen unter strenger Einbeziehung aller vorliegender Messwerte bestimmt und ist vollständig frei von der im folgenden den diskutierten Problematik.

3. Erfordert die Bildpyramidenberechnung eine Vorentzerrung?

In welcher Größenordnung beeinflusst nun die unregelmäßige Bildgeometrie der Rohbilddaten der Zeilenkamera die hierarchische Oberflächenrekonstruktion, wenn die Bildpyramiden ohne Vorentzerrung der Bilder berechnet werden? Um diese Frage praxisnah zu beantworten, wurde ein exemplarischer Test auf der Basis eines DPA-Flugstreifens durchgeführt, welcher einer *worst-case*-Abschätzung recht nahe kommt – die unregelmäßigen Flugbewegungen bei den ca. 20 vorliegenden HRSC-A Flugstreifen fallen im Vergleich eher moderat aus. Die Bilddaten wurden auf einer Flughöhe von ca. 3000m über Grund mit einer mittleren Pixelgröße von 37,5cm x 37,5cm am Boden aufgezeichnet, mit einer Streifenbreite von insgesamt etwas über 4km, vgl. Abb. 4. Der Ortskundige erkennt *Hofheim am Taunus* in der Bildmitte. Dieser Bildstreifen weist neben den allgegenwärtigen, typischen hochfrequenten Änderungen zwei extrem starke und unregelmäßige Änderungen der äußeren Orientierungen auf, und zwar für die Zeitpunkte $t_1 = 70s$ und $t_2 = 77s$. Damit wird ein relativ großer Umfang an Sonderfällen abgedeckt. Die entsprechenden Winkeländerungen spiegeln sich übrigens recht deutlich durch die Knickstellen am Rand des entzerrten Gesamtbildstreifen in Abb. 4(c) wider.

Die hier eingesetzten Bildpyramiden basieren auf einer Approximation des sog. idealen Tiefpassfilters, welcher theoretisch die Anforderungen einer „idealen“ 13 x 13 Tiefpassfiltermaske erfüllt, *Meer et al.* (1987), de facto aber nur die Rechenzeit einer 7 x 7 Maske erfordert wegen den mit Null besetzten Zeilen und Spalten, Tab. 1. Nach den am Institut für Photogrammetrie und Kartographie der TU Darmstadt gesammelten Erfahrungen spiegelt dies den maximalen Aufwand wider, den man üblicherweise diesem Rechenschritt zubilligt. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der Verzicht auf die Tiefpassfilterung im Rahmen der Bildpyramidenberechnung immer die schlechteste bzw. sogar eine unpraktikable Lösung darstellt: Die dann auftretenden Aliasing-Effekte sind bereits bei einer visuellen Inspektion deutlich wahrnehmbar und lassen keine robuste und präzise Bildzuordnung auf den höheren Bildpyramidenstufen erwarten.

Größe der Filtermaske	Tiefpaß-Filtermaske = $\ell^T \cdot \ell$	Relative Rechenzeit
3 × 3	$\ell = \frac{1}{4}(1, 2, 1)$	1
5 × 5	$\ell = \frac{1}{25}(1, 4, 6, 4, 1)$	2.78
⇒ 11 × 11	$\ell = \frac{1}{1000}(51, 0, -87, 0, 298, 475, 298, 0, -87, 0, 51)$	5.44 ←

Tabelle 1: Ausgewählte Tiefpassfilter für die Generierung der Bildpyramiden nach *Kaiser, Schmolla und Wrobel* (1992).

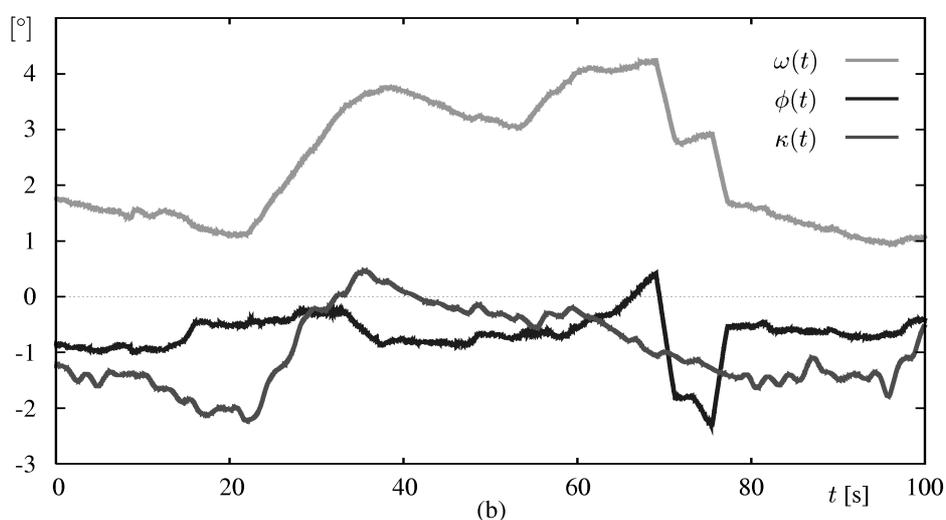
Um einen Überblick über das Fehlerbudget zu bekommen, welches aus der Bildpyramidenberechnung auf Basis der Rohbilddaten resultiert, wird ein Vergleich mit einem komplett vorentzerrten Bild vorgenommen. Es werden also zwei entzerrte Bilder des kompletten Flugstreifens aus Abb. 4 hinsichtlich ihrer geometrischen Unterschiede untersucht, von denen das erste vor der Bildpyramidenberechnung, das zweite jedoch erst nach der Bildpyramidenberechnung auf eine Horizontalebene im Objektraum entzerrt wird. Das erste Bild (=Ist-Bild) steht damit für das *Procedere*, das im Rahmen des Facetten-Stereosehen Verwendung finden soll, nämlich der Verzicht auf die Vorentzerrung im Rahmen der Bildpyramidenberechnung. Die sich an die Bildpyramidenberechnung anschließende Entzerrung stellt lediglich die Vergleichbarkeit zum zweiten Bildbeispiel (=Soll-Bild) her, bei welchem die Rohbilddaten zuerst entzerrt werden und damit die Voraussetzungen für den Einsatz der oben diskutierten Standardalgorithmen zur sich anschließenden Bildpyramidenberechnung hergestellt werden. Unvermeidbar sind einige ergänzende Unterschiede zwischen den beiden zu betrachtenden Bildern durch den jeweiligen Interpolationsschritt bei der Entzerrung. Da hier eine *worst-case*-Abschätzung vorgenommen werden soll, kann diese potentielle zusätzliche Fehlerquelle jedoch problemlos akzeptiert werden. Die hier eingesetzte Methodik zur Entzerrung der Zeilenkameradaten ist in *Schlüter* (2000) ausführlich dargelegt.

Beim visuellen Vergleich zwischen Ist- und Soll-Bild wirkt das Ist-Bild tendenziell etwas stärker tiefpassgefiltert. Diese Beobachtung lässt sich anhand der Histogramme und der einschlägigen statistischen Kennzahlen aber kaum signifikant nachweisen. Für beide Bilder wird Aliasing erfolgreich vermieden. Von Hauptinteresse sind mögliche (lokale) geometrische Verschiebungen der Bildinhalte. Zu deren Detektion wurden die beiden kompletten Bildstreifen mit dem Programm SIR (= *subpixel image registration*) verglichen. SIR arbeitet bildraumorientiert auf der Basis eines regelmäßigen Rasters im Masterbild und ist konzipiert für die subpixelgenaue gegenseitige Referenzierung von zwei Fernerkundungsbildern, *Boochs* (2000). Damit ist das Programm für den angestrebten Vergleich geeignet. Insgesamt wurden ca. 640 000 geometrische Differenzvektoren berechnet, wobei im Hinblick auf die zu erwartenden maximalen Differenzen jeweils eine möglichst kleine Fenstergröße angestrebt werden durfte. 99.7% der geometrischen Differenzbeträge lagen im Intervall von +/- einem Viertel Pixel, absolute Differenzen von größer einem halben Pixel traten nicht auf. Dabei waren kleinräumige systematische Effekte zu beobachten, welche jedoch völlig unabhängig von den oben erwähnten tieffrequenten Änderun-

⇒ Flugrichtung ⇒



(a)



(b)



(c)



Abbildung 4: Übersicht des DPA Flugstreifens 'Frankfurt-West 9A'. (a): Rohbilddaten, $12\,000 \times 24\,000$ Pixel. (b): Drehwinkel $\omega(t)$, $\phi(t)$, $\kappa(t)$ für jeden Aufnahmezeitpunkt. (c): Entzerrter Bildstreifen.

gen der äußeren Orientierungsparameter sind, vgl. den exemplarischen Ausschnitt in Abb. 5, der eine solche Stelle wiedergibt. Es fällt weiterhin auf, dass die geometrischen Differenzen insgesamt in Flugrichtung etwa 20-30% größer sind als die senkrecht zur Flugrichtung. Das bedeutet, dass bei der auftretenden Fehlercharakteristik in stärkerem Maße die X-Parallaxen betroffen sind, was sich in geringfügigen Höhenfehlern der Zwischenergebnisse während der Bearbeitung der Bildpyramidenstufen mit dem Facetten-Stereosehen auswirkt.

Günstig ist, dass die Störungen der Epipolarbedingung (Y-Parallaxen) relativ gesehen geringer ausfallen, da große Y-Parallaxen (weitaus größer als hier beobachtet!) grundsätzlich eine Gefahrenquelle für Fehlzuordnungen darstellt. Insgesamt gesehen sind die absolut beobachteten geometrischen Unterschiede zwischen Ist- und Soll-Bild jedoch derart gering, dass der während des hierarchischen Rekonstruktionsprozesses stets einzuhaltende Konvergenzradius auch für die einfache Variante der Bildpyramidenberechnung nicht in Gefahr gerät.

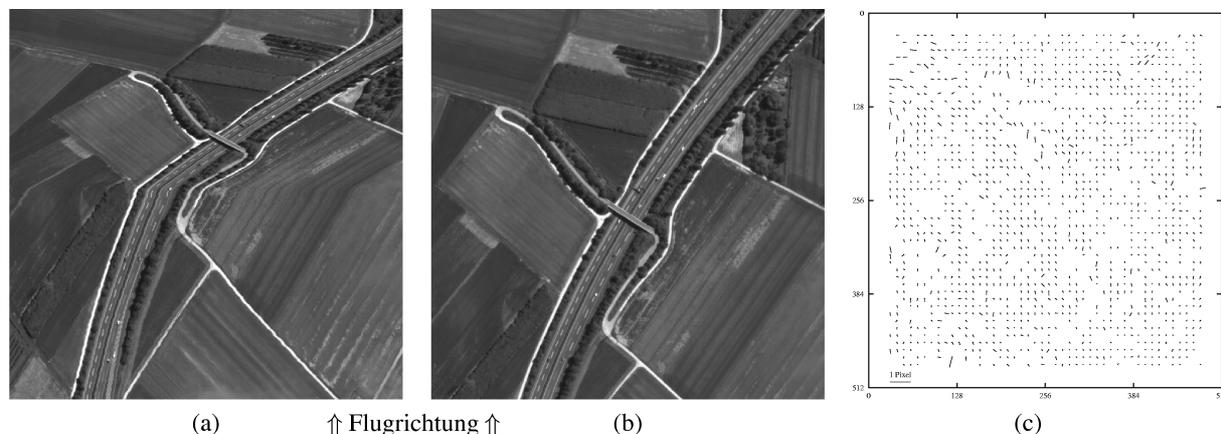


Abbildung 5: DPA-Ausschnitt (B40 bei *Hattersheim am Main*). (a): Rohbilddaten, 1024×1024 Pixel. (b): Vorentzerrtes Bild, 2. Bildpyramidenstufe, 512×512 Pixel; Ist- und Sollbild sind im Druck visuell nicht unterscheidbar. (c): Geometrische Unterschiede zwischen Ist- und Sollbild auf der 2. Pyramidenstufe.

4. Konsequenzen

Der exemplarische Vergleich zweier Varianten zur Bildpyramidenberechnung macht deutlich, dass die photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion mit dem Facetten-Stereosehen auf Bildpyramiden aufgebaut werden darf, welche mit den verfügbaren Standardalgorithmen direkt aus den Rohbilddaten einer flugzeuggetragenen Mehrzeilenkamera berechnet wurden. Eine Vorentzerrung im Zusammenhang mit der Bildpyramidenberechnung ist selbst im Hinblick auf höchste Genauigkeitsansprüche verzichtbar. Aus dieser Erkenntnis erschließt sich ein äußerst stringenter und rechenzeitsparender Weg für die Oberflächenrekonstruktion im Objektraum, bei dem alle vorliegenden Grauwertinformationen konsequent und präzise im Sinne der Gewinnung eines optimalen Endergebnisses einfließen. Im Gegensatz zu bildraumorientierten Ansätzen verlangt die objektraumorientierte Vorgehensweise *keine* Rückprojektion von Koordinaten in den Bildraum (z.B. für die abschließende Bildung von Strahlenschnitten); diese Rückprojektion kann bei Zeilenkameradaten je nach den lokalen Flugbewegungen numerisch mehrdeutig sein, sie wird mit der hier dargelegten Methodik ansatzimmanent vermieden. Das Facetten-Stereosehen kann daher alle vorliegenden Bildinformationen für die Rekonstruktion ausschöpfen.

Darüber hinaus eröffnet sich mit dem Facetten-Stereosehen die Welt der Mehrbildzuordnung in einfacher Weise. Der Übergang von der Zweibild- zur Mehrbildzuordnung bietet überzeugende Vorteile hinsichtlich der Genauigkeit und Robustheit des Rekonstruktionsergebnisses, wie Untersuchungen auf der Basis von digitalisierten „klassischen“ Luftbildern gezeigt haben, *Schlüter und Wrobel* (1996). Für die Mehrzeilenkamera bedeutet dies zunächst eine einfach zu realisierende Option auf die simultane Auswertung auf der Basis aller panchromatisch aufzeichnender Sensorzeilen (drei für das Beispiel DPA, fünf für das Beispiel HRSC-A). Darüber hinaus ist – entsprechende Querüberlappung vorausgesetzt – auch die simultane Einbindung von benachbarten Flugstreifen möglich, was neue Perspektiven hinsichtlich der stark automatisierten Rekonstruktion von Siedlungsgebieten eröffnet, *Schlüter* (1998). Das bislang publizierte Wissen zum Facetten-Stereosehen stellt insgesamt eine tragfähige und ökonomisch einsetzbare Basis für Arbeit und Forschung mit den Daten der neuen digitalen Kamerasysteme bereit.

5. Dank

Die Rohbilddaten des DPA Bildfluges *Frankfurt-West* wurden im Rahmen des Projektes UTOMA bereitgestellt.* Die Daten des HRSC-A Bildfluges *Duisburg* wurden freundlicherweise von Prof. Dr. Gerhard Neukum und seinem Team, Fachbereich für Planetenerkundung, DLR, zur Verfügung gestellt.

* Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 50 EE 9604 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

6. Literatur

Angermaier, A., Hockling, T., Klein, W. und Müller, F., 1998. *Digitale Photogrammetrie-Ausstattung (DPA)*. Schlussbericht FE IV 1 - T/F41G/V0018/24257, Daimler-Benz Aerospace, LFK GmbH, München.

Bähr, H.-P. und Vögtle, T., 1991. *Digitale Bildverarbeitung*. 2. Aufl., Wichmann, Karlsruhe.

Boochs, F., 2000. *Ein Verfahren zur präzisen gegenseitigen geometrischen Einpassung von Multispektralbildern*. In: J. Altbertz (Hrsg.), *Photogrammetrie und Fernerkundung: Neue Sensoren - Neue Anwendungen*; Vorträge 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 13.-15. Oktober 1999, Essen, Publ. der DGPF, Vol. 8, Berlin.

Diehl, H. und Heipke, C., 1992. *Surface reconstruction from data of digital line cameras by means of object based image matching*. In: ISPRS 17th Congress, Vol. IAPRS 29(B3) Comm. III, Washington, D.C., S. 287-294.

Haala, N., Stallmann, D. und Cramer, M., 1998. *Calibration of directly measured position and attitude by aerotriangulation of three-line airborne imagery*. In: ISPRS Comm. III Symposium *Object Recognition and Scene Classification from Multi-spectral and Multisensor Pixels*, Vol. IAPRS 32(3/1), Columbus, Ohio, S. 23-30.

Hinz, A., 1999. *The Z/I Imaging digital aerial camera system*. In: D. Fritsch und R. H. Spiller (Hrsg.), *Photogrammetric Week '99*, Wichmann, Heidelberg, S. 109-115.

Hofmann, O., 1986. *Dynamische Photogrammetrie*. *Bildmessung und Luftbildwesen (BuL)* 54(3), S. 3-19.

Kaiser, B., Schmolla, M. und Wrobel, B. P., 1992. *Application of image pyramid for surface reconstruction with FAST Vision (=Facets Stereo Vision)*. In: ISPRS 17th Congress, Vol. IAPRS 29(B3) Comm. III, Washington, D.C., S. 341-345.

Meer, P., Baugher, E. S. und Rosenfeld, A., 1987. *Frequency domain analysis and synthesis of image generating kernels*. *IEEE PAMI* 9(4), S. 512-522.

Sandau, R., Fricker, P. und Walker, A. S., 1999. *Digital photogrammetric cameras: possibilities and problems*. In: D. Fritsch und R. H. Spiller (Hrsg.), *Photogrammetric Week '99*, Wichmann, Heidelberg, S. 71-82.

Schlüter, M., 1998. *Multi-image matching in object space on the basis of a general 3-d surface model instead of common 2.5-d surface models and its application for urban scenes*. In: ISPRS Comm. IV Symposium *GIS - between Visions and Applications*, Vol. IAPRS 32(4), Stuttgart, S. 545-552.

Schlüter, M., 1999. *Von der 2^{1/2}D- zur 3D-Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum*. Dissertation, TU Darmstadt, DGK C 506, München.

Schlüter, M., 2000. *Fortführung von Geoinformationssystemen anhand direkt aufgezeichneter, digitaler Bilddaten*. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie Bd. 14, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

Schlüter, M. und Kempa, M., 1993. *DEM evaluation by an operator and Facets Stereo Vision: A comparison based on close-range imagery*. In: A. Grün und H. Kahmen (Hrsg.), *Optical 3-D Measurement Techniques II*, Wichmann, Karlsruhe, S. 502-509.

Schlüter, M. und Wrobel, B. P., 1996. *High resolution surface reconstruction of a landscape from large scale aerial imagery by Facets Stereo Vision - an extended test*. In: ISPRS 18th Congress, Vol. IAPRS 31(B3) Comm. III, Wien, S. 758-763.

Tsay, J.-R., 1996. *Wavelets für das Facetten-Stereosehen*. Dissertation, TH Darmstadt, DGK C 454, München.

Weisensee, M., 1992. *Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen*. Dissertation, TH Darmstadt, DGK C 374, München.

Wrobel, B. P., 1987. *Digital image matching by facets using object space models*. In: Fourth International Symposium on Optical and Optoelectronic Applications in Science and Engineering *Advances in Image Processing*, SPIE, Vol. 804, Den Haag, Niederlande, S. 325-333.

Wrobel, B. P., 1989. *Geometrisch-Physikalische Grundlagen der digitalen Bildmessung*. SIPUS - Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart 13, S. 223-242.

Wrobel, B. P., Kaiser, B. und Hausladen, J., 1992. *Adaptive regularization of surface reconstruction by image inversion*. In: W. Förstner und S. Ruwiedel (Hrsg.), *Robust Computer Vision*, Wichmann, Karlsruhe, S. 351-371.