

MOMS, Fortschritt in der optischen Fernerkundung

Abstract

The optical remote sensing system *Modular Opto-electronic Multispectral Stereo-Scanner* (MOMS) offers with its currently operating camera system of second generation (MOMS02) a ground resolution capability and cartographic accuracy that could not be reached so far by other civil optical Earth observation programmes. Herewith, the Federal Republic of Germany (FRG) enters the group of some few nations, which provide stereoscopic and multispectral imagery on a worldwide basis: France (SPOT), India (IRS-1C), Japan (OPS), Russia (KFA, KWR) and USA (LANDSAT).

MOMS02 was launched in May 1996 to the Russian space station Mir to be mounted on board the Earth observation module PRI-RODA. It will deliver optical remote sensing imagery from October 1996 within a quasi-operational mission for at least eighteen months. More than 60 % of the land masses of the Earth will be imaged. In particular, the along-track stereo capability allows for high accuracies in cartographic mapping. Investigations have shown, that mapping can be carried out with accuracy figures of 3–4 m in planimetry and 4–5 m in height. For this reason, map data for a scale up to 1 : 25 000 can be derived. This allows also for data acquisition and data revision processes of countrywide Geo-Information systems (GIS) at medium scales (for instance the FRG ATKIS).

1 Einleitung

Die zunehmende Nachfrage der Datenerfassung für Geo-Informationssysteme (GIS) mit Anwendungen innerhalb der Regional- und Landesplanung, des Umweltschutzes, des Ressourcenmanagements und der Stadtplanung bedingt die Bereitstellung von neuen Sensoren mit einem hohen Automationspotential. Bisweilen konnte die Luftbildphotogrammetrie viele Belange der topographischen Datenerfassung für die Maßstäbe 1 : 5 000, 1 : 25 000 sowie 1 : 50 000 abdecken. Satellitengetragene bildgebende Senso-

ren ergänzten diese Maßstabserie um Satellitenbildkarten in noch kleineren Maßstäben.

Jedoch ergeben sich gerade in der jüngsten Zeit Engpässe bei der Datenerfassung für die mittleren Maßstäbe (1 : 25 000, 1 : 50 000), sei es aus mangelnder personeller Kapazität oder aus finanziellen Erwägungen heraus. Die Industrieländer sind aufgrund von Einsparungsmaßnahmen angehalten, Personal abzubauen und verstärkt automatisierte Verfahren für die raumbegrenzte Datenerfassung einzusetzen. In Ländern der dritten Welt fehlt es nicht nur an genügend ausgebildetem Fachpersonal, sondern auch an finanziellen Mitteln, um den Aufbau und die Fortführung von landesweiten Geo-Informationssystemen voranzutreiben.

G. Konecny [13] verweist auf den globalen Status der weltweiten Kartenherstellung im Jahr 1993. Demzufolge gibt es in Afrika lediglich 2,9 % kartographierte Gebiete im Maßstab 1 : 25 000, für 1 : 50 000 beträgt die Erstellungsquote 41,1 %. Ähnliche Aussagen liegen für Südamerika vor, für das 7 % im Maßstab 1 : 25 000 und 33 % in 1 : 50 000 topographisch kartiert sind. Diese Karteninformation ist jedoch teilweise stark überaltert, die Fortführungsrate liegt weltweit gesehen bei 4,9 % für 1 : 25 000 und 2,3 % für 1 : 50 000 (Bezugsjahr 1987).

Die zuvor genannten Herstellungs- und Fortführungszahlen von topographischer Karteninformation haben bereits seit den siebziger Jahren die Entwicklung von optischen Fernerkundungssystemen stark beeinflusst. Mittlerweile ist die Bereitstellung von hochauflösenden Bildsensoren nicht nur eine nationale politische Aufgabe (zumindest aus der Sicht einiger führender Industrieländer), sondern offensichtlich auch ein Markt, wenn man die jüngsten Bemühungen von Firmen in den USA verfolgt (siehe L. F. Fritz [10]).

Jedoch stößt man mit den derzeit operationell eingesetzten optischen Fernerkundungssystemen hinsichtlich der topographischen Datenerfassung schnell an die Grenze der Detailauflösung, auch insbesondere was die Genauigkeitsanforderungen betrifft. Lediglich das französische System SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) konnte bisher umfassende topographische Karteninformationen (Lage und Höhe) für den Maßstab 1 : 50 000 zur Verfügung stellen – alle weiteren Fernerkundungssysteme wie das amerikanische Erdbeobachtungsprogramm Landsat 4 und Landsat 5 sowie die russischen Analogaufnahmen mittels KFA 1000 (3000) und KWR 1000 sind wegen der fehlenden Stereofähigkeit nur für Landnutzungskartierungen sowie evtl. zur Herstellung von Orthobildern geeignet. Die SPOT-Familie (SPOT 1-SPOT 3) ist mittlerweile um den japanischen Sensor OPS (Plattform JERS-1) sowie den indischen Fernerkundungssatelliten IRS-1C ergänzt worden, so daß nun auf mindestens 3 optische Systeme mit Stereobildzeugung zurückgegriffen werden kann.

Seit Ende der siebziger Jahre wurde durch die Förderung des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) die Entwicklung eines neuen, hochauflösenden Fernerkundungssystems MOMS (*Modularer Opto-elektronischer Multispektraler Stereoscanner*) möglich, dessen primäre Aufgabe speziell auf die topographische Datenerfassung ausgerichtet ist. Im Zuge der 2. Deutschen Spacelab Mission (26. April bis 06. Mai 1993) konnte dieser Sensor seine *along-track* Stereobilddatenaufnahme bei gleichzeitiger Aufzeichnung von multispektraler Bildinformation unter Beweis stellen. Mittlerweile gibt es eine Reihe von Beiträgen zur Auswertung der Bilddaten dieser experimentellen Mission (siehe [3],

[4], [5], [6], [8], [9], [11], [12], [14] und [15]).

Jüngste Genauigkeitsuntersuchungen (D. Fritsch et al. [9]) haben gezeigt, daß MOMS02 das derzeit hochauflösendste optische Fernerkundungssystem darstellt, mit dessen Bilddaten topographische Informationen wie zum Beispiel digitale Geländemodelle (DGM), panchromatische und multispektrale Orthobilder sowie Vektordaten mit relativen Genauigkeiten von 1 : 100 000 für die Lagegeometrie (± 3 m) und 1 : 70 000 für die Höhe ($\pm 4,3$ m) abgeleitet werden können.

Solche Genauigkeiten konnten bisher nur bei besonderen Anwendungen im photogrammetrischen Nahbereich sowie in der analytischen Katasterphotogrammetrie erzielt werden. Diese Verifikation nicht nur der experimentellen MOMS02/D2-Mission, sondern des gesamten Kamera- und Auswertesystems konnte anhand eines sehr gut vermessenen Testgebiets im Nordwesten Australiens durchgeführt werden, über das im folgenden berichtet wird.

Mit diesem Sensorsystem reiht sich die Bundesrepublik Deutschland nun in die Reihe einiger Industrienationen ein, die weltweit optische Fernerkundungsdaten zur Verfügung stellen können. Derzeit befindet sich das MOMS02-Kamerasystem auf dem Modul PRIRODA der russischen Raumstation Mir. Im Rahmen einer deutsch-russischen Kooperation soll MOMS02 ab Oktober 1996 Stereo- und Multispektraldaten quasi-operationell für mindestens 18 Monate aufzeichnen und per Telemetrie an 3 Bodenstationen (Neustrelitz/BRD, Moskau und

Novosibirsk/Russland) weiterleiten. Damit sollten die Voraussetzungen gegeben sein, den Technologietransfer von der staatlichen Förderung eines wissenschaftlich angelegten, vorwiegend experimentellen Erdbeobachtungsprogramms hin zu einem operationellen, von der Industrie entwickelten und betriebenen optischen Fernerkundungsdatenservice zu vollziehen, um das beträchtliche Know how speziell auf diesem Sektor zu erhalten und ggf. weiter auszubauen. Somit könnten durchaus weitere Erdbeobachtungsprogramme von deutscher Seite aus initiiert, entwickelt und betrieben und auf diese Weise neue Arbeitsplätze geschaffen werden.

2 MOMS-Architektur

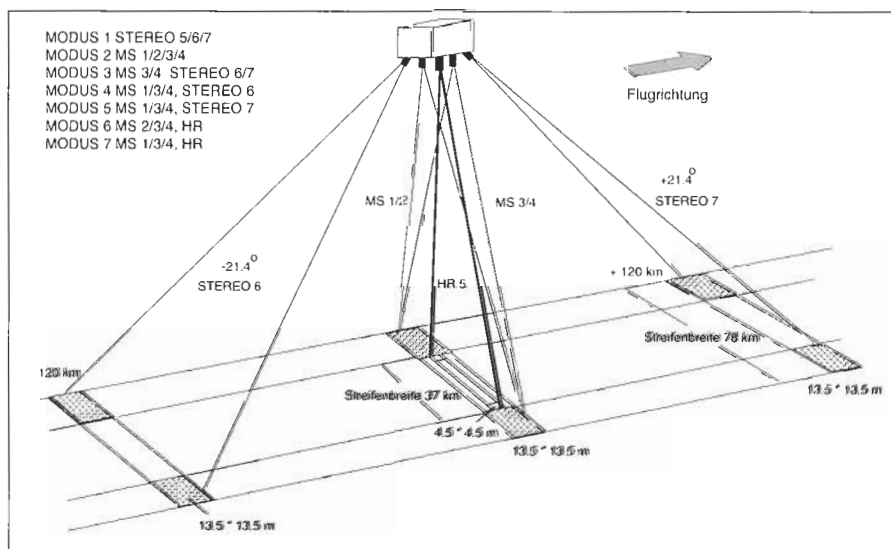
Das optische Kamerasystem MOMS ist als Ergebnis der Entwicklungen zur digitalen Bildaufzeichnung Ende der siebziger Jahre in den Labors der Fa. Messerschmidt-Bölkow-Blohm (MBB, die heutige Daimler-Benz-Aerospace-DASA) ins Leben gerufen worden. Eine erste flugtaugliche Entwicklung unter der Bezeichnung MOMS01 konnte 1983 und 1984 auf zwei Space Shuttle-Missionen im Rahmen des deutschen Experiments „Shuttle Pallet Satellite (SPAS)“ als Kamerasystem mit zwei Multispektralkanälen getestet werden. Mehr als 1000 Szenen bei einer Bodenpixelauflösung von 20 m sorgten zu dieser Zeit bereits für internationale Anerkennung. Erste thematische Kartierungen im Maßstab 1 : 50 000 wurden aus diesen Aufnahmen angefertigt.

Als folgerichtiger Schritt wurde der

zweikanalige MOMS-Multispektralmodul durch einen neuen, speziell auf bestimmte spektrale Fenster abgestimmten, jedoch nun vierkanaligen Modul ersetzt. Parallel zu dieser Neuentwicklung wurde das Dreizeilenprinzip zur Stereobildaufzeichnung integriert, indem zum Multispektralmodul noch ein Stereomodul hinzugefügt wurde. Dieser nun als MOMS02 bezeichnete Sensor hat mit MOMS01 keine Gemeinsamkeiten mehr (abgesehen von den beiden Multispektralobjektiven, die noch identisch sind). Diese Architektur ergab sich aus der Notwendigkeit heraus, daß das Kamerasystem simultanes topographisches und thematisches Kartieren erlauben sollte. Dabei stand in erster Linie die automatische Ableitung von digitalen Geländemodellen (DGM) sowie die Erzeugung von geometrisch entzerrten Bildkarten – auch als Orthobilder bezeichnet – im Vordergrund der Überlegungen (F. Ackermann et. al. [1]), F. Ackermann [2]).

Das Dreizeilen-Stereoprinzip ist in der Abbildung 1 wiedergegeben. Der große Vorteil liegt in der nahezu gleichzeitigen Aufnahme von drei Bildszenen (Zeitversatz lediglich 20 s) von dem Gebiet der Erdoberfläche, welches topographisch kartiert werden sollte. Dieses auch als „single pass stereo“ bezeichnete Verfahren ist in der optischen Fernerkundung neu und daher auch von weiteren Systemen kopiert worden (z. B. OPS). Die beiden vorwärts- und rückwärtsblickenden Stereokanäle liefern eine Bodenauflösung von 13,5 m, der Nadirkanal 4,5 m (Nominalentfernung 300 km). Darüber hinaus sind die Stereobilder mit den Multispektraldaten zu kombinieren, die ebenso mit einer Bodenauflösung von 13,5 m gewonnen werden. Wie aus der Abbildung 1 ersichtlich ist, werden Stereobilddaten mit einer Streifenbreite (Schwadenbreite) von 37 km aufgezeichnet, bei den Multispektraldaten beträgt diese Kennzahl 43 bzw. 78 km. Das für die photogrammetrische Rekonstruktion so wichtige Basis-Höhenverhältnis liegt aufgrund der vorwärts- und rückwärtsblickenden Stereobjektive bei 240 km : 300 km = 0,8. Diese Angaben gelten für die D2-Mission, bei der die Aufnahmeentfernung des Space Shuttle i. d. R. 300 km betrug.

Insgesamt standen im Rahmen der D2-Mission 7 Kanäle zur Stereo- und Multispektralbilddatenaufzeichnung zur Verfügung. Diese sind mit der Ta-



400 Abb. 1. MOMS02/D2 – Aufnahmegeometrie.

belle 1 nachgewiesen. Der Stereomodul zeichnet im panchromatischen Bereich auf (512–765 nm), wohingegen die Multispektralkanäle spezielle Bandpässe im Spektrum des sichtbaren Lichts (VIS) und nahen Infrarot (NIR) repräsentieren.

Aufgrund der Restriktion des Datenflusses innerhalb der Bilddatenaufzeichnung auf ein digitales Bandgerät konnten während der D2-Mission nicht alle 7 Kanäle gleichzeitig betrieben werden, sondern es wurden sogenannte *Betriebsmodi* eingeführt. Diese sind mit der Tabelle 2 nachgewiesen, aus der ebenso die Anzahl der verfügbaren CCD-Elemente hervorgeht (IFOV Instantaneous Field of View).

Es ist somit direkt ersichtlich, daß der Modus 1 zum topographischen Kartieren und der Modus 6 bzw. 7 zum thematischen Kartieren bereitgestellt wurde. Der Modus 3 erlaubte die gleichzeitige Stereo- und Multispektralbilddatenaufzeichnung. Zu den folgenden Genauigkeitsabschätzungen insbesondere bei der DGM-Ableitung ist daher Modus 1 mit den bildgegebenen Kanälen 5, 6 und 7 von besonderem Interesse. Das hochauflösende Nadirobjektiv mit einer Brennweite von 660,3 mm liefert Abbildungen in einem Bildmaßstab von 1 : 450 000, wohingegen die beiden Stereoobjektive mit 270,3 mm Brennweite Bildmaßstäbe von circa 1 : 1 350 000 erzeugen.

Ergebnisse hinsichtlich des thematischen Kartierens und insbesondere auch der Fusion des hochauflösenden Nadirkanals mit den Multispektralkanälen finden sich in M. Berger/H. Kaufmann [3] und B. Koch et.al. [12].

Die geometrischen Bedingungen zur Auswertung von MOMS02-Stereobilddaten sind ähnlich mit denen von anderen optischen digitalen Bildaufzeichnungssystemen (z. B. SPOT). Die Perspektivgeometrie ist dabei nur für ein *Dreizeilenbild* gültig, jedoch kann entlang der Satellitenbahn annähernd eine Parallelprojektion vorausgesetzt werden. Aus diesem Grund kann in diesem speziellen Fall von einer *Zeilen-Zentralprojektion* gesprochen werden. Die Parameter der inneren Orientierung des MOMS02-Kamerasytems (Versatz der beiden schrägen Stereokanäle, Objektivbrennweiten, Verzeichnung) sind im DASA-Labor Ottobrunn bei München ermittelt worden.

Die Rekonstruktion der Parameter der äußeren Orientierung der

Tabelle 1. Parameter von MOMS02/D2 (Nominalhöhe 300 km).

Kanal	Modus	Blickrichtung	Bandbreite (nm)	Bodenpixel (m × m)	Streifenbreite (km)
1	M/S	Nadir	449–511	13,5 × 13,5	78/43
2	M/S	Nadir	532–576	13,5 × 13,5	78/43
3	M/S	Nadir	645–677	13,5 × 13,5	78/43
4	M/S	Nadir	772–815	13,5 × 13,5	78/43
5	HR Stereo	Nadir	512–765	4,5 × 4,5	37/37
6	Stereo	+ 21,4°	524–763	13,5 × 13,5	78/43
7	Stereo	– 21,4°	524–763	13,5 × 13,5	78/43

MOMS02/D2-Mission, d. h. die Ermittlung von Lage und Position der Kamera im dreidimensionalen Raum, ist Gegenstand der Untersuchungen des Lehrstuhls für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München (siehe H. Ebner et.al. [11], W. Kornus et.al. [14]) – diese soll hier nicht weiter vertieft werden. Im folgenden ist daher nur das Prinzip der Wiederherstellung der Aufnahmegeometrie angedeutet.

Wenn auch die innere Orientierung zwischen den linearen CCD-Zeilensarrays gewissermaßen *fixiert* ist und daher die Abbildungsgleichungen der Photogrammetrie (Kollinearitätsgleichungen) für alle drei Stereoobjektive mit Nullpunkt Nadirobjektiv formuliert werden können, so variiert doch die äußere Orientierung von *Dreizeilenbild zu Dreizeilenbild*. Zum besseren Verständnis sei an dieser Stelle nochmals das Dreizeilenbild definiert – dieses besteht lediglich aus drei Zeilen, nämlich aus der Nadirbildzeile und der vorwärts- und rückwärtsblickenden Stereobildzeile. Dies schließt erst einmal die Anwendung von Standardverfahren der photogrammetrischen Aerotriangulation aus. Eine modifizierte Bündelblockausgleichung ist jedoch dann möglich, wenn die Parameter der äußeren Orientierung für die hochkorrelierten benachbarten Dreizeilenbilder reparametrisiert werden.

Aufgrund der sehr glatten Bahn des Space Shuttle können sogenannte *In-*

terpolationspolynome zu dieser Reparametrisierung herangezogen werden, deren Grad (linear, quadratisch, kubisch) variiert werden kann. Mit diesem Rechenhilfsmittel läßt sich die Anzahl der zu bestimmenden Parameter der äußeren Orientierung beträchtlich reduzieren – diese brauchen nun nur noch für die sogenannten *Orientierungs-Dreizeilenbilder* gerechnet werden. Für alle weiteren Dreizeilenbilder lassen sich diese Parameter dann interpolieren. Zur Bestimmung der 6 äußeren Parameter eines Kamerastandortes im Raum und damit der Festlegung der Orientierungsbilder ist eine bestimmte Anzahl von Paßpunkten notwendig. Die Anzahl dieser Paßpunkte läßt sich reduzieren, wenn Vorinformationen über die Bahnbewegung zum Beispiel Navigationsdaten zur Verfügung stehen. Unter idealen Bedingungen, d. h. die Messung von Bildkoordinaten mit Genauigkeiten von bis zu 0,2 Pixel, die Hinzunahme von Navigationsdaten mit einer Genauigkeit von wenigen Metern und von wenigstens 4 DGPS-gemessenen Paßpunkten in den Ecken des topographisch zu rekonstruierenden Gebiets, sollten Objektpointgenauigkeiten von besser als 5 m in der Lage und bis 5 m in der Höhe erreicht werden können. Dieses *5-m-Niveau* stand von vornherein als Ziel für die MOMS02/D2-Mission fest, zumindestens aus Sicht der photogrammetrischen Experimentatoren (F. Ackermann [2], H. Ebner [4] und D. Fritsch

Tabelle 2. Operationsmodi MOMS02/D2.

Modus/Kanal	1	2	3	4	5	6	7
IFOV [mrad]	45,45	45,45	45,45	45,45	15,15	42,16	42,16
Modus 1/Anzahl Pixel					8304	2976	2976
Modus 2/Anzahl Pixel	5800	5800	5800	5800			
Modus 3/Anzahl Pixel			5800	5800		5800	5800
Modus 4/Anzahl Pixel	5800		5800	5800		5800	
Modus 5/Anzahl Pixel	5800		5800	5800			5800
Modus 6/Anzahl Pixel		3220	3220	3220	6000		
Modus 7/Anzahl Pixel	3220		3220	3220	6000		

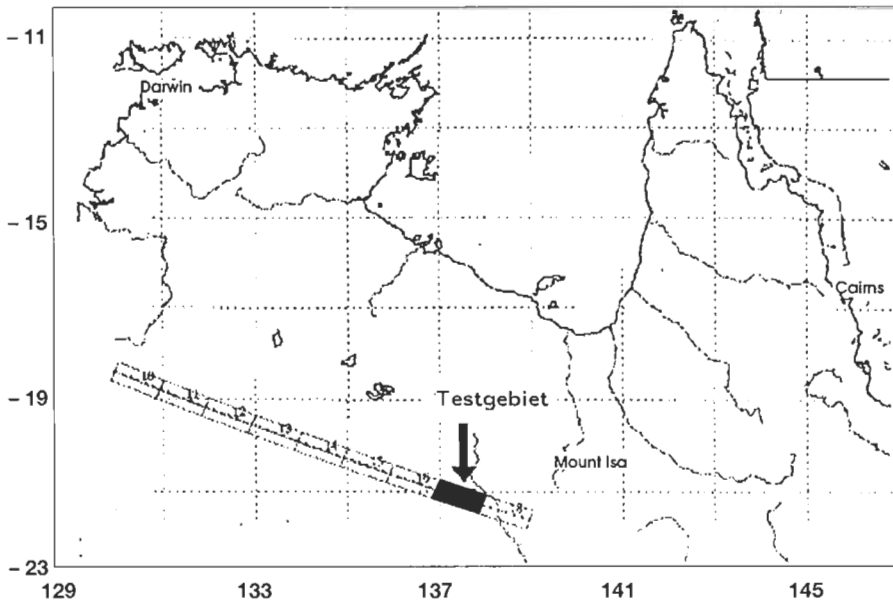


Abb. 2. Lage des Testgebietes „Australien“ (D2-Orbit 75b, Bildszene 17).

[7], [8]). Um dieses Ziel zu verifizieren, war die Festlegung eines Testgebietes mit vielen vor Ort zu messenden Kontrollpunkten unumgänglich.

3 Testgebiet Australien

Nachdem die MOMS02-Bilddaten der D2-Mission gesichtet werden konnten, begannen die ersten photogrammetrischen Auswertungen. Alles in allem konnten Bilddaten von mehr als 7 Mio. km² der Erdoberfläche aufgezeichnet werden, darunter anspruchsvoll topographisch zu kartierende Gebiete wie zum Beispiel die Anden und das Himalaya-Massiv. Die Auswahl eines Testgebietes war daher nicht ganz leicht und

wurde von verschiedenen Faktoren geleitet. Auswertungen mittels bekannter Karteninformationen konnten allerdings dem Genauigkeitsanspruch an die MOMS02/ D2-Mission nicht nachkommen.

Im Zuge einer Kooperation mit der Universität in Melbourne/Australien wurde als Testgebiet zur Verifikation der MOMS02/D2-Mission das Gebiet Szene 17 aus dem Orbit 75B ausgewählt, welches sich im Südosten der *Northern Territories* befindet. Der 110 km × 40 km große Bildstreifen bedeckt ziemlich flaches Gelände, der maximale Höhenunterschied liegt bei nur 70 m. Eines der Hauptaugenmerke bei der Auswahl des Testgebietes war die

Verfügbarkeit von bildidentifizierbaren Paßpunkten, welche durch differentielles GPS vor Ort beobachtet werden konnten, und natürlich die Gebietszugänglichkeit. Aus diesem Grund wurden bildidentifizierbare Punkte für die GPS-Vermessung auf Erddämme sowie entlang von Weidezäunen gelegt, die sich durch mehr oder weniger befestigte Wege in den MOMS02/D2-Bildern aufsuchen ließen. Ebenso Wegkreuzungen waren als Paßpunktstandort sehr gut geeignet. In der Abbildung 2 ist die Lage des Testgebietes „Australien“ nachgewiesen. Abbildung 3 gibt die Anordnung der Paßpunkte einschließlich eines DGM-Profiles wieder (siehe Fraser et al. [6]).

Die größte Schwierigkeit der Festlegung von Paßpunkten in der Örtlichkeit bestand in der eindeutigen Zuordnung zum vorhandenen Bildmaterial. Aus diesem Grund waren eigentlich nur wenige Stellen im Testgebiet geeignet, um in das 5-m-Niveau der zu verifizierenden Genauigkeit zu gelangen. Um bei der Auswertung die Paßpunkte hinsichtlich ihrer Bildidentifizierbarkeit zu klassifizieren, war eine Einteilung in verschiedene Kategorien notwendig. Hinzu kam noch die zeitliche Veränderung des Testgebietes, da die D2-Mission bereits 1993 stattfand und die örtlichen Arbeiten erst 1994 und 1995 durchgeführt werden konnten.

Entgegen allen vorher kurz erläuterten Schwierigkeiten konnten circa 80 im Testgebiet gut verteilte bildidentifizierbare Paßpunkte mittels differentiellem GPS gemessen werden. Die Bildkoordinaten dieser Paßpunkte wurden an stereoskopischen Workstations am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart und dem Department of Geomatics, University of Melbourne/Australien mit einer Genauigkeit von 0,5-1 Pixel ermittelt.

3.1 GPS-Kampagne 1994

Die erste Beobachtungskampagne im Testgebiet fand im August 1994 statt. Als GPS-Instrumentarium standen 5 Ashtech-Empfänger zur Verfügung, so daß innerhalb von drei Tagen insgesamt 98 Basislinien und damit 79 Paßpunkte koordiniert werden konnten. Zwei der verwendeten Empfänger konnten L1 und L2 aufzeichnen, die restlichen 3 waren lediglich Einfrequenzempfänger. Zur Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten wurde eine Beobachtungszeit von circa 30 min pro Standpunkt vorgegeben. Als übergeordnetes Ziel wur-

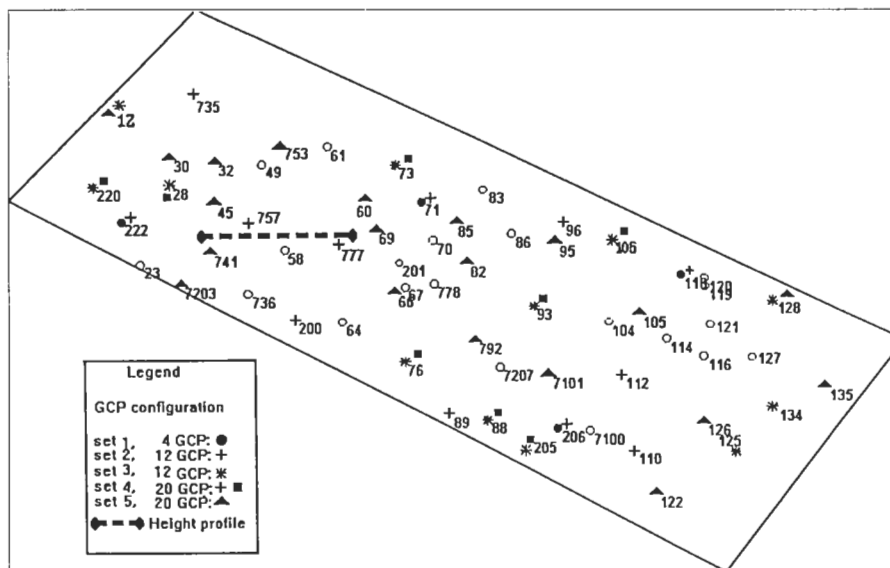


Abb. 3. Anordnung der Paßpunkte und des DGM-Profiles im Testgebiet Australien (entnommen aus [6]).

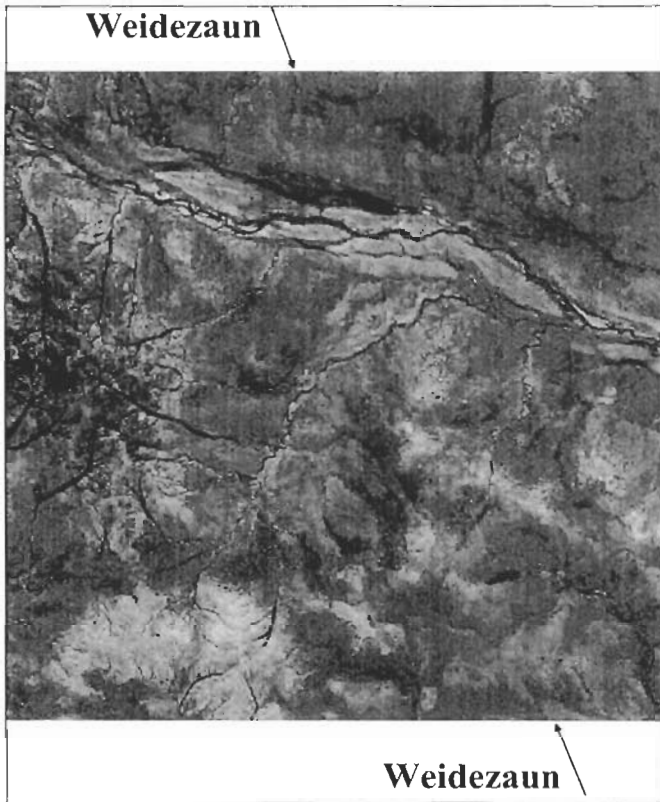


Abb. 4. MOMS02/D2 – Orthobildausschnitt des Testgebietes „Australien“ (Gebietsausdehnung $14,5 \times 14,5 \text{ km}^2$).



Abb. 5. Ausschnittsvergrößerung des Testgebiets: Visualisierung des Weges entlang des Weidezauns.

de eine Positionierungsgenauigkeit von 0,5 m angestrebt, die RMS für alle beobachteten Basislinien lagen im Bereich von weniger als 0,05 m.

3.2 GPS-Kampagne 1995

Das Testgebiet wurde nochmals im Juli 1995 aufgesucht, um Diskrepanzen der Paßpunktbestimmung 1994 aufzuklären und darüber hinaus ein zusammenhängendes Geländeprofil von 16 km Länge zur DGM-Genauigkeitsverifikation festzulegen und zu beobachten. Erste photogrammetrische Bündeltriangulationen mit den GPS-Paßpunkten 1994 belegten das Problem der Punktidentifizierbarkeit, indem die erwarteten Ergebnisse nicht bestätigt werden konnten. Aus diesem Grund war diese Kampagne darauf ausgelegt, einige schwer identifizierbare Punkte zu kontrollieren und diese ggf. neu zu koordinieren, ebenso sollten noch weitere Punkte gemessen werden. Die Kampagne 1995 bestätigte jedoch die Ergebnisse von 1994, so daß das eigentliche Problem in der Bildidentifizierbarkeit zu suchen ist. Dennoch konnten nochmals 10 neue Paßpunkte zu dem vorhandenen Punkthaufen hinzugefügt werden.

Das Hauptaugenmerk dieser Kampagne lag jedoch auf der Koordinie-

rung des Geländeprofiles. Das übergeordnete Ziel war der Vergleich dieses Profils mit dem Profil, welches aus dem durch MOMS02/D2-Bilddaten abgeleiteten DGM entstehen konnte. Zur exakten Definition des Profils wurden Profilmessungen im kinematischen GPS-Modus gemessen. Das Profil befindet sich entlang eines Weidezauns, der mit der Abbildung 4 angedeutet ist. Entlang dieses Weidezauns führt ein mehr oder weniger befestigter Weg, der in der Ausschnittsvergrößerung Abbildung 5 als markante Bildinformation lokalisiert werden kann.

Alles in allem konnten mehr als 16 km in ungefähr 3 Stunden abgefahren werden, welches insgesamt zu 3228 koordinierten Kontrollpunkten führte. Die im unregelmäßigen Abstand von 2–3 m erfaßten Profilmessungen wurden dann anschließend auf ein regelmäßiges Profil mit 5 m Profilweite interpoliert; die Genauigkeitsabschätzung führte zu Punktsicherheiten von etwa 10–20 cm.

4 Verifikation der MOMS02/D2-Mission

Die ersten Ergebnisse zur Verifikation der MOMS02/D2-Mission aus der Sicht der Photogrammetrie wurden auf dem MOMS-Symposium im Juli 1995

in Köln umfassend vorgestellt. Dabei konnte noch nicht auf die Ergebnisse der GPS-Kampagne 1995 zurückgegriffen werden. Somit wurde seinerzeit auf die folgenden Probleme hingewiesen:

- (1) Das Auffinden von homologen Bildpunkten in den drei Bildszenen zur Stereokonstruktion konnte vollkommen automatisch durchgeführt werden. Dabei war jedoch der hochaufgelöste Kanal auf die Bildauflösung der beiden vorwärts- und rückwärtsblickenden Stereokanäle zu reduzieren. Die Zuordnungsgenauigkeit lag bei 0,7 Pixel für den merkmalsbasierten und 0,3 Pixel für den flächenbasierten Bildzuordnungsansatz.
- (2) Die Rekonstruktion der Parameter der äußeren Orientierung mittels des flächenbasierten Bildzuordnungsansatzes führte zu 6 bis 10 m Unsicherheit in der Lage und 7 bis 15 m in der Höhe, jeweils abhängig von dem gewählten Bündelblockmodell.
- (3) Die Genauigkeit des rekonstruierten digitalen Geländemodells ergab RMS-Fehler von 10 bis 20 m.

Diese Aussagen führten nochmals zu einer umfassenden Datenauswertung, bei der nun neue Methoden und Auswertestrategien eingesetzt werden

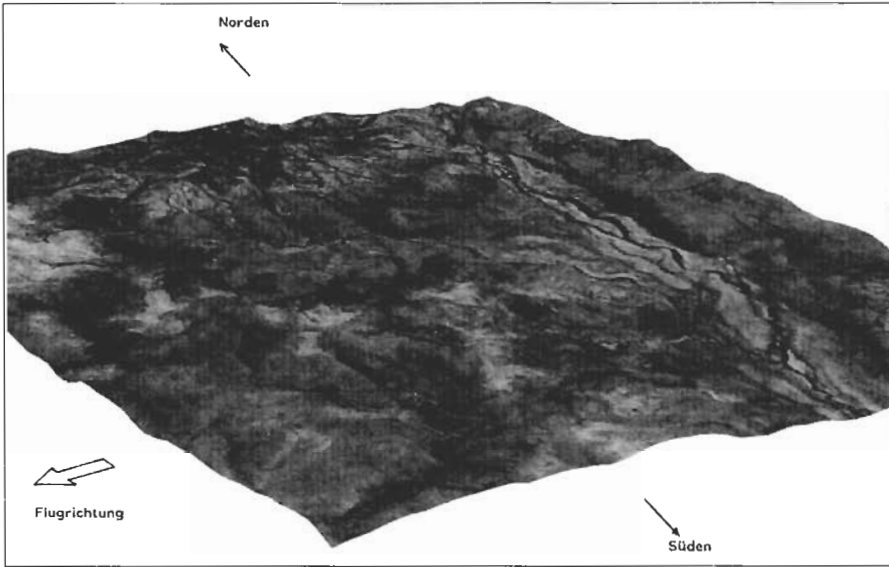


Abb. 6. Perspektivansicht des digitalen Geländemodells aus dem Testgebiet „Australien“ mit Überlagerung der Radiometrie des MOMS02-HR Kanals.

konnten. Insbesondere die Beseitigung von Fehlinterpretationen von Paßpunktpositionen konnte das Genauigkeitsniveau anheben wie auch neue Auswertestrategien bei der digitalen photogrammetrischen Bildzuordnung.

Bisweilen wurde aus Gründen der Robustheit und schnellen Verfahrensabwicklung der merkmalsbasierte Zuordnungsansatz dem flächenbasierten vorgezogen. Das am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart entwickelte DGM-Softwarepaket ist in der Lage, große zusammenhängende DGM-Gebiete in einem Rechenprozeß zu ermitteln. Die folgenden Schritte werden dabei verfolgt: 1. Erzeugung von Bildpyramiden für die Stereokanäle 5, 6 und 7 bei gleicher Bodenpixelauflösung (d. h. 13,5 m bei der D2-Mission), 2. Extraktion von Punktmerkmalen und Kanteninformationen,

3. Simultane Zuordnung der Punktmerkmale in allen drei Kanälen mittels gegebener äußerer Orientierung, 4. Festlegung der x,y,z -Objektkoordinaten der Punkte und 5. DGM-Rekonstruktion durch Approximation mittels finiter, bilinearer Elemente.

Für das Testgebiet „Australien“ konnte somit ein digitales Geländemodell erstellt werden, aus dem das entsprechende Geländeprofil für den GPS-Feldvergleich abzuleiten war. Abbildung 6 gibt das DGM mit überlagerter Radiometrie (vgl. Abbildung 4) des Nadirkkanals wieder. Zur DGM-Berechnung wurde eine Rasterweite von 240 m eingeführt. Diese auch als *perspective shaded relief* bezeichnete Darstellung vermittelt einen realistischen Eindruck von dem Testgebiet, welches keine markanten geomorphologischen Merkmale enthält. Die gerin-

gen Höhenänderungen des Testgebiets sind noch besser mit der Abbildung 7 auszumachen. Insgesamt beträgt die maximale Höhenänderung auf die gesamte Profildistanz lediglich nur circa 23 m. In Konsequenz der zuvor gemachten Aussagen scheint dieses sehr flache Gelände bei einer Bodenpixelauflösung von nur 13,5 m für die homogenisierten Stereobildaten der Kanäle 5, 6 und 7 somit eine echte Herausforderung darzustellen.

Der Vergleich zwischen der GPS-Profilmessung und der MOMS02/D2-DGM-Profilmessung ist mit der Abbildung 8 gegeben. Für jeden Profilmessungspunkt wurde mittels des in Abbildung 6 wiedergegebenen DGM die Höhe interpoliert und die Differenz zwischen der GPS-Messung gerechnet. Eine mittlere Differenz von 60 m deutet auf systematische Effekte bei der Festlegung der Parameter der äußeren Orientierung hin, die von vornherein als systematischer Fehler korrigiert werden kann. Die verbleibenden Restfehler sind in einem Intervall von ± 10 m wiederzufinden, die mittlere quadratische Restabweichung (RMS) liegt bei $\pm 7,6$ m.

Diese beträchtliche Genauigkeitszunahme im Vergleich mit den Ergebnissen des MOMS-Symposiums konnte durch die Erweiterung der Bildzuordnungsstrategie nochmals wesentlich verbessert werden. Hierzu ist mittlerweile der merkmalsbasierte Ansatz um einen flächenbasierten Ansatz zur DGM-Erzeugung erweitert worden. Dieses neue Verfahren zur automatischen DGM-Generierung von Dreizeilenbild-Sensoren ist enorm leistungsfähig, robust und präzise. Es liefert Pixelgenauigkeiten in der Größenordnung von weniger als 0,2 Pixel und

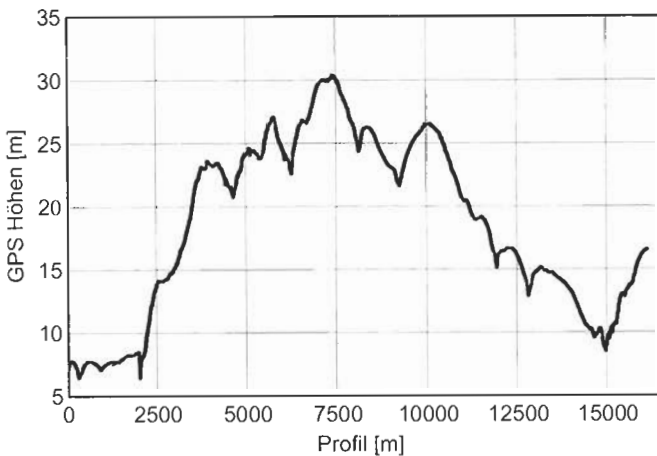


Abb. 7. GPS-Profil mit insgesamt 3228 DGM-Kontrollpunkten.

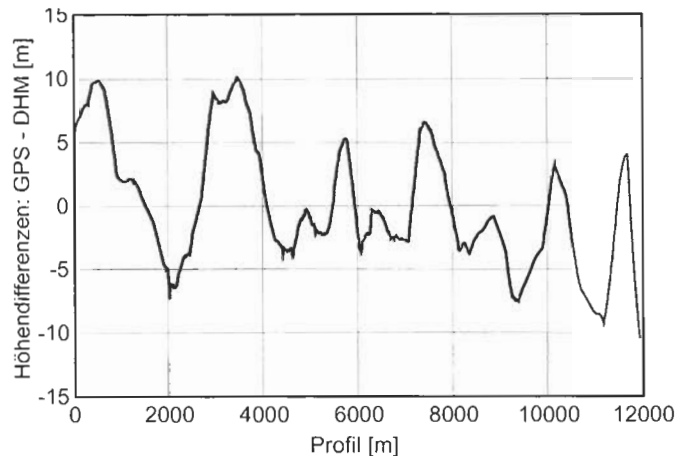


Abb. 8. Darstellung der Höhendifferenzen GPS-Profil minus DGM-Profil (merkmalsbasierter Ansatz).

kommt somit an die Ergebnisse der klassischen Luftbild-aerotriangulation heran.

Die Genauigkeitszunahme kann insbesondere mit der Abbildung 9 deutlich gemacht werden. Hier sind die Ergebnisse des interpolierten DGM-Profiles (dünne Linie) in das GPS-Profil (dicke Linie) eingetragen. Die mittlere quadratische Abweichung beträgt für die Höhe lediglich noch 4,3 m. Es ist auffallend, daß an einigen Stellen die Ergebnisse sehr gut übereinstimmen, an anderen weniger gut. Eine Daten-sichtung ergibt gerade an diesen kritischen Stellen deutliche Bildfehler bzw. eine Abnahme im Grauwertumfang der Bilder. Alles in allem ist dies jedoch als sehr gutes Ergebnis zu werten, da zu dieser Höhenunsicherheit Lagefehler in der Größenordnung von nur ± 3 m hinzukommen (das sind 0,3 m in x-Richtung entlang des Höhenprofils und 3,6 m in y-Richtung senkrecht zum Höhenprofil).

Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der automatischen DGM-Generierung mittels MOMS02/D2-Bild-daten kann auch noch die Abbildung 10 herangezogen werden. Diese vermittelt einen guten Überblick über das gesamte Testgebiet „Australien“, da hier ein Gebietsausschnitt von circa 80 km \times 30 km wiedergegeben ist. Das DGM wurde aus 600 000 Objektpunkten abgeleitet, die durch den neuen flächen-basierten Zuordnungsansatz bestimmt wurden, bei einer Rasterweite von lediglich 5 Pixel (d. h. 67,5 m).

Abschließend soll mit den Abbildungen 11 und 12 ein topographisch anspruchsvolleres Gebiet als DGM-Darstellung wiedergegeben werden. Abbildung 11 zeigt ein Bildkomposit aus dem Andenorbit der D2-Mission (Orbit 115, Bolivien). Die oberen drei Bildausschnitte zeigen ein Auswertebereich der Größe 2000 \times 2000 Pixel jeweils für die Kanäle 5, 6 und 7 bei derselben Bodenauflösung von 13,5 m. Der linke untere Ausschnitt gibt einen Einblick in die Original-Bodenauf-lösung des Nadirkanals (Bodenpixel-größe 4,5 m). Direkt daneben befinden sich zum Vergleich die Bildausschnitte der beiden schrägblickenden Stereo-kanäle.

Die Ableitung des digitalen Geländemodells mittels der drei oberen Bild-ausschnitte der Abbildung 11 führt zu dem *bereinigten* DGM der Abbildung 12. Dabei werden lediglich Randef-fekte der FE-Modellierung eliminiert.

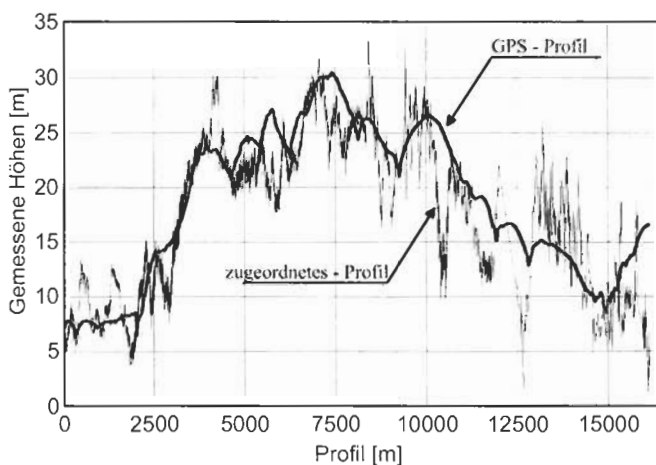


Abb. 9. Darstellung der Höhenprofile GPS und flächen-basierter DGM-Ansatz.

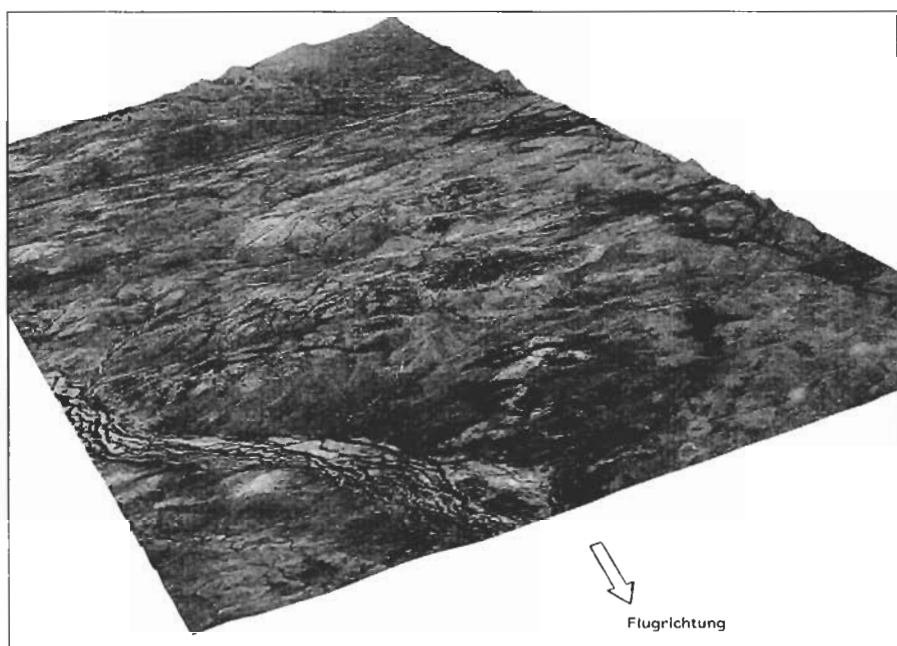


Abb. 10. Perspektivansicht des digitalen Geländemodells Testgebiet „Australien“ (Gesamt-szene) mit überlagerter HR-Radiometrie.

Die Eingangsgrößen zur DGM-Generierung waren somit die folgenden: Auswertebereich 2000 \times 2000 Pixel, Gebietsausdehnung 27 km \times 27 km, Bodenpixelgröße 77 m bei einer Bodenauflösung von 13,5 m für alle 3 Stereokanäle. Das Ergebnis ist ein DGM mit einer Gebietsgröße von 25,0 km \times 24,2 km. Im Gegensatz zum Testgebiet „Australien“ beindrucken hier die enormen Höhenunterschiede und liefern eine eindrucksvolle Gesamtvisualisierung. Auch hier ist der DGM-Darstellung die Originalradiometrie des Kanals 5 überlagert, um einen realistischen Eindruck zu erzeugen.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, daß insgesamt die Erwartungen an das topographische Kartieren mittels des optischen Fernerkundungssystems MOMS02 mit den zuvor gezeigten Beispielen voll erfüllt werden konnten. Das

eingangs erwähnte Genauigkeitsniveau von 5 m ist voll bestätigt worden. Die an den Hochschulen Hannover, München und Stuttgart entwickelte Auswertesoftware ist operationell einsetzbar und liefert sehr gute Ergebnisse.

5 MOMS02/PRIRODA

Im Rahmen einer deutsch-russischen Kooperation konnte das MOMS02-Kamerasystem leicht modifiziert und als Nutzlast auf dem Fernerkundungsmodul PRIRODA der sich nun schon seit 10 Jahren im All befindlichen Raumstation Mir positioniert werden. Dieses Modul enthält neben der digitalen optischen Bildaufzeichnung durch MOMS02 weitere analoge und digitale optische Aufnahmesysteme, so daß nun auch ein Technologievergleich durchgeführt werden kann. Das PRI-

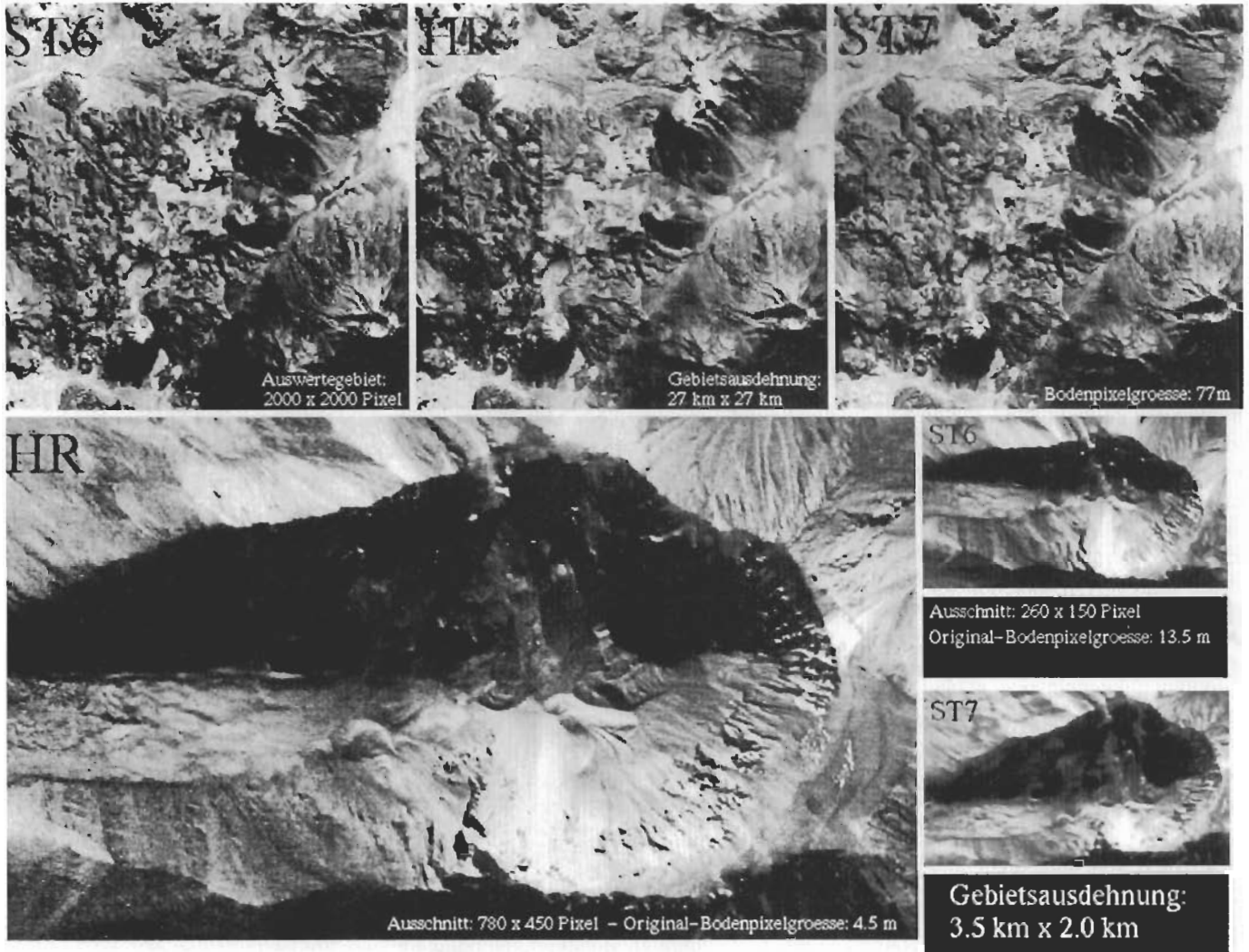


Abb. 11. MOMS02/D2-Originalbildmosaik des Andenorbits (Orbit 115).

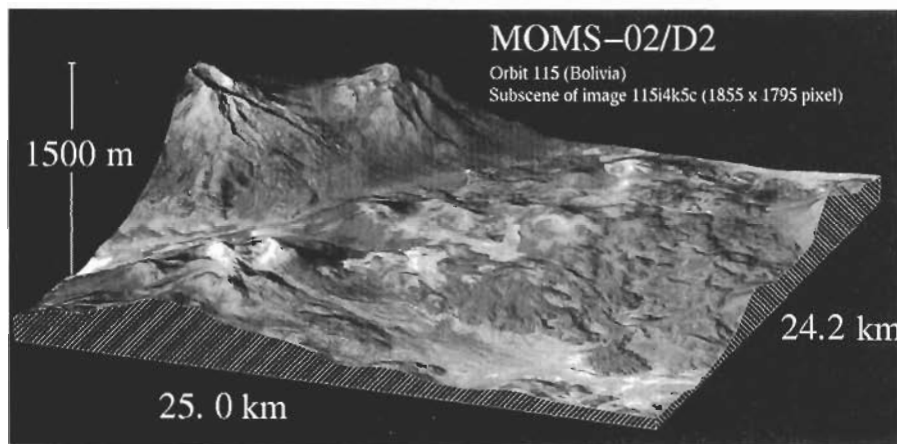
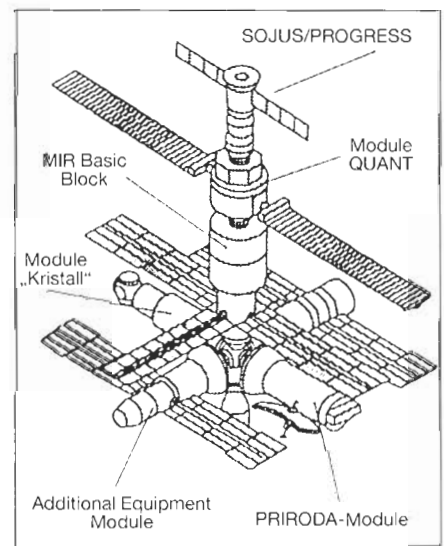


Abb. 12. Perspektivansicht des Anden-DGMs mit überlagerter Radiometrie.

Abb. 13. PRIRODA-Modul als Teilkomponente der russischen Raumstation Mir. ▶



RODA-Modul wurde am 24. April 1996 von Baikonur/Rußland aus gestartet und konnte bereits 2 Tage später an Mir andocken (vgl. Abbildung 13). Die Anordnung des MOMS02-Sensorsystems an Bord von PRIRODA ist in der Abbildung 14 ersichtlich.

Falls keine technischen Schwierigkeiten auftreten, wird MOMS02 von Oktober 1996 an Stereo- und Multi-spektralbilddaten von mehr als 60 % der Landmassen der Erde aufzeichnen (vgl. Abbildung 15). Diese Daten werden erst auf ein digitales Bandgerät ge-

speichert und bei dem Überfliegen der 3 Bodenstationen zur Erde telemetriert. Mit an Bord befindet sich ein Navigationssystem bestehend aus einem GPS-Empfänger und einem Inertialen Navigationssystem, um die Parameter der äußeren Orientierung direkt mit

aufzuzeichnen. Die Bodenpixelauflösung beträgt 5–6 m für den HR-Kanal sowie 15–18 m für die schrägblickenden Stereo- und Multispektralkanäle.

Es wird erwartet, daß aufgrund der Erfahrungen des Testgebiets „Australien“ topographische Kartiergenauigkeiten von 3–4 m für die Lage und circa 5 m für die Höhe erzielt werden können. Dies entspricht gerade noch den Anforderungen für den Kartenmaßstab 1 : 25 000. Viele Pilotanwender in der BRD, nicht nur aus dem Bereich der Landesvermessung, sondern der Geologie, des Umweltschutzes, der Landwirtschaft, der Bevölkerungsstatistik etc. versprechen sich durch die MOMS02/PRIRODA-Mission aktuelle raumbezogene Daten, um vorhandene Informationen abzu prüfen, zu ergänzen und temporale Auswertungen überhaupt zu ermöglichen.

6 Schluß und Ausblick

Die Entwicklung von MOMS02 hat gezeigt, daß ein Erdbeobachtungssystem auf der Basis der passiven Bildaufzeichnung gleichzeitig Stereo- und Multispektraldaten erzeugen kann. Diese Erweiterung der derzeit operationell verfügbaren optischen Fernerkundungssysteme hat bereits weltweit große Impulse zur Sensorweiterentwicklung angeregt. Die hohe Auflösung des Nadirkanals läßt thematische Kartierungen mit einer Qualität zu, wie sie derzeit mit noch keinem anderen System erreicht werden kann. Die Ableitung von digitalen Geländemodellen mittels der *single-pass-stereo*-Geometrie ist ebenfalls ein Novum, welches nicht nur für die optische Fernerkundung bereits aufgegriffen wurde, sondern mittlerweile ebenso beim interferometrischen SAR (INSAR) verwendet wird.

Die Bilddatenauswertung von MOMS02 ist dann besonders effizient, wenn automatische Verfahren eingesetzt werden können. Am Beispiel der DGM-Generierung konnte aufgezeigt werden, zu welchen Leistungen die Verfahren der digitalen Photogrammetrie imstande sind. Das hohe Genauigkeitsniveau von 3 m für die Lage und 4,3 m für die Höhe belegt das Potential, daß optische Fernerkundung nun in die Nähe der kleinmaßstäbigen Luftbildaufnahme kommen kann. Damit sind digitale Geländemodelle für große zusammenhängende Gebiete *in einem Guß* zu erzeugen, topographische Da-

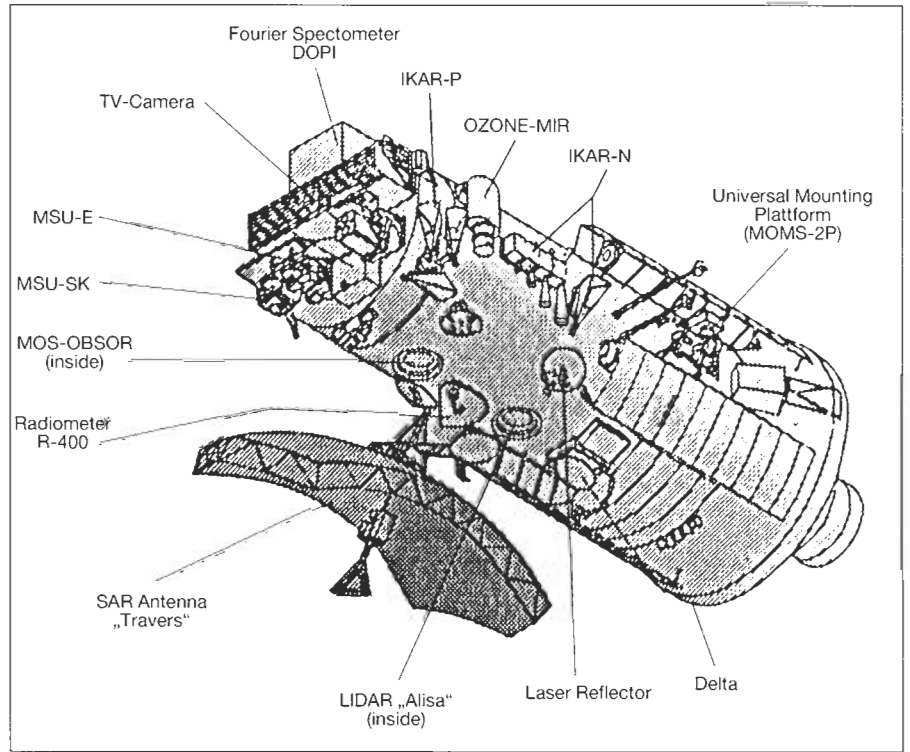


Abb. 14. Anordnung verschiedener Fernerkundungssensoren auf dem Modul PRIRODA.

tenbanken im mittleren Maßstabsbereich (bis zu 1 : 25 000) fortzuführen und thematische Attribute mit hoher räumlicher Auflösung zu gewinnen.

Die MOMS02/PRIRODA-Mission wird von vielen Pilotanwendern begleitet. Damit ist der Grundstein gelegt, die hochauflösende, optische Fernerkundung auch in der Bundesrepublik Deutschland zu einem zentralen Thema zu machen, welches politisch umgesetzt und fachlich weiterentwickelt werden muß.

Danksagung

Das deutsche Erdbeobachtungsprogramm MOMS wird seit Ende der siebziger Jahre durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) gefördert. Seit der Einrichtung der Deutschen Agentur für Weltraumangelegenheiten (DARA) wurde ihr die Forschungsförderung für MOMS übertragen. Es ist dem Autor eine angenehme Pflicht, allen Entscheidungsträgern

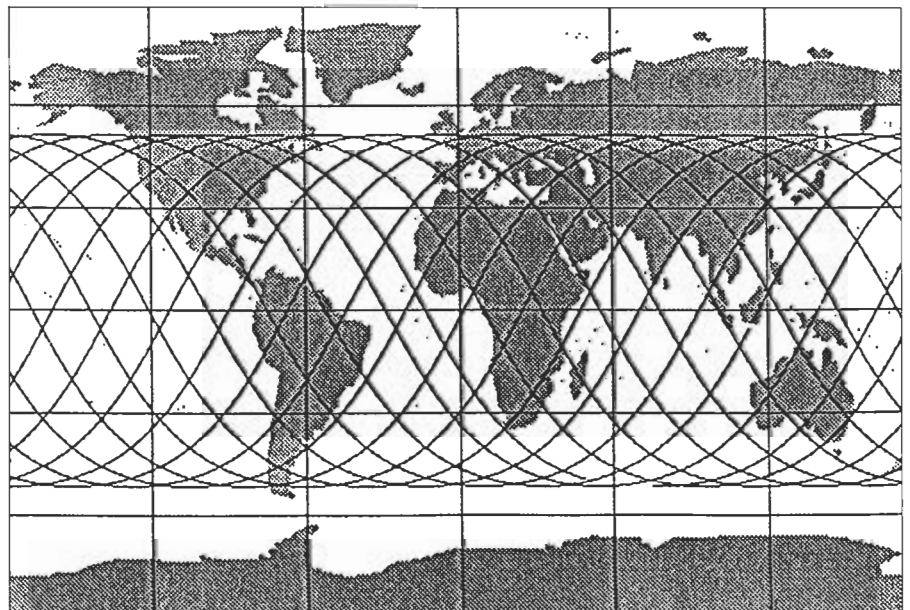


Abb. 15. Bodenspuren der russischen Raumstation Mir.

dieser beiden zentralen Einrichtungen der BRD den Dank für den reibungslosen Ablauf des Förderungsmanagements auszusprechen.

Die technische Entwicklung von MOMS war nur durch die Zusammenarbeit der DLR (hier insbesondere das Institut für Optoelektronik, Oberpfaffenhofen) mit Hochschulinstituten der BRD sowie dem industriellen Partner DASA Ottobrunn möglich. Seitens der topographischen Datenerfassung sollen besonders das Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung der Universität Hannover, der Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München sowie das Institut für Photogrammetrie und Kartographie der Universität der Bundeswehr Neubiberg erwähnt werden, die zusammen mit dem Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart die gesamte Auswertekette zum topographischen Kartieren mittels MOMS02-Aufnahmen fertiggestellt haben. Diese Zusammenarbeit wird nunmehr im Rahmen der MOMS02/PRIRODA-Mission fortgesetzt. Der Autor bedankt sich bei seinen Kollegen für die reibungslose Zusammenarbeit, die nun mit weiteren wissenschaftlichen Fragestellungen fortgesetzt werden kann.

Der Dank gilt letztlich ebenso den Kollegen der Universität Melbourne/

Australien, die mit der örtlichen Vermessung des Testgebiets „Australien“ die Verifikation der MOMS02/D2-Mission ermöglicht haben.

Literatur

- [1] F. Ackermann, J. Bodechtel, F. Lanzl, D. Meissner, P. Seige & H. Winkenbach: MOMS-02 – a multispectral stereo imager for the second German Space Mission D2; *Int. Arch. Photogrammetry & Remote Sensing (IAPRS)* 28-1(1990) 110–116.
- [2] F. Ackermann: Das MOMS02-Stereo-segment – ein hochgenaues System der digitalen Photogrammetrie; *Geo-Informationssysteme (GIS)* 6 (1993) 16–22.
- [3] M. Berger & H. Kaufmann: MOMS02-D2/STS-55 mission validation of spectral and panchromatic modules; *Geo-Informationssysteme (GIS)* 8 (1995) 21–30.
- [4] H. Ebner, W. Kornus & T. Ohlhof: A simulation study on point determination for the MOMS02/D2 space project using an extended functional model; *Geo-Informationssysteme (GIS)* 7(1994) 11–16.
- [5] C. S. Fraser & J. Shao: Exterior orientation of MOMS-02 three-line imagery: experiences with the Australian testfield data; *Int. Arch. Photogrammetry & Remote Sensing (IAPRS)* 31-3 (1996) 207–214
- [6] C. S. Fraser, D. Fritsch, P.A. Collier & J. Shao: Ground point determination using MOMS-02 observation imagery. *Proceed. 37th Australian Surveyors Congress, Perth, 13-19. April 1996*, 19p.
- [7] D. Fritsch: Synergy of photogrammetry, remote sensing and GIS – the MOMS example; *Int. Arch. Photogrammetry & Remote Sensing (IAPRS)* 30-2(1994), Ottawa, 2–9.

- [8] D. Fritsch: Ableitung digitaler Gelände-modelle aus MOMS-02/D2-Bilddaten – erste Ergebnisse; *Geo-Informationssysteme (GIS)* 8 (1995) 13–20.
- [9] D. Fritsch, M. Hahn, F. Schneider, D. Stallmann & M. Kiefner: Experiences in processing MOMS-02/D2 stereo image data; *Int. Arch. Photogrammetry & Remote Sensing (IAPRS)* 31-4(1996) 267–272.
- [10] L. F. Fritz: Recent developments for optical Earth observation in the United States. In: *Photogrammetric Week '95*, Eds. D. Fritsch/D. Hobbie, Wichmann Heidelberg (1995) 75–83.
- [11] E. Gill, T. Montenbruck, T. Ohlhof & M. Schmidhuber: First results on shuttle orbit adjustment using MOMS-02/D2 imagery. *Proceed. Int. Symp. On Space Dynamics, Toulouse/France, June 19–23 (1995)*.
- [12] B. Koch, T. Kremmers & C. Lingnau: Preliminary results of MOMS-02/D2 data evaluation for forest inventory tasks; *Geo-Informationssysteme (GIS)* 8 (1995) 31–37.
- [13] G. Konecny: Satelliten-Fernerkundung und Kartographie; *Geo-Informationssysteme (GIS)* 8 (1995) 3–12.
- [14] W. Kornus, H. Ebner & C. Heipke: Photogrammetric point determination using MOMS-02/D2 imagery. *Proceed. MOMS Symposium Cologne/Germany, July 5–7 (1995)*.
- [15] J. Schiewe: Cartographic potential of MOMS-02/D2 image data. In: *Photogrammetric Week '95*, Eds. D. Fritsch/D. Hobbie, Wichmann Heidelberg (1995) 95–106.

Anschrift

Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Fritsch, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, D-70174 Stuttgart.