Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie Band 14

Fortführung von Geoinformationssystemen anhand direkt aufgezeichneter digitaler Bilddaten

von Martin Schlüter



Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie Frankfurt am Main 2000

ISBN 3-88648-102-6



Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie Band 14 ISSN 1436-3445

Fortführung von Geoinformationssystemen anhand direkt aufgezeichneter digitaler Bilddaten

von Martin Schlüter



Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie Frankfurt am Main 2000

Druck: Druckerei Imbescheidt KG Frankfurt am Main

Fortführung von Geoinformationssystemen anhand direkt aufgezeichneter, digitaler Bilddaten

Abschlußbericht für das Forschungsvorhaben

"Anwendung und Entwicklung von Verfahren zur Nutzung von MOMS-2P–Daten für topographische und thematisch kartographische Aufgabenstellungen"*

(mit 57 Bildern und 8 Tabellen)

Martin Schlüter Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main

ABSTRACT:

With regard to automatic updating of geoinformation systems (GIS) various strategies and methods of image analysis, remote sensing, and digital photogrammetry are applied and further developed. The thorough use of existing geodata for selected tasks of recognition, the verifaction of this geodata, and last not least its automatic updating constitute the central objectives of this contribution, integration of the Digital Landscape Models of the 'Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS)' (Authoritative Topographic Cartographic Information System) being a key subject. The scale ranges considered are limited on the one side by the 'ATKIS Basis-DLM' (ATKIS Base Digital Landscape Model) and by the 'ATKIS DLM 250' on the other side.

In the light of the pending commercial availability of high-resolution satellite images, the digital aerial camera systems announced for the year 2000 and given the technical possibilities provided by the space camera MOMS-02, different image data sets were used of for the purposes of the present contribution: a high resolution panchromatic scene of IRS-1C as well as a multispectral and multitemporal image sequence (5 scenes from 1997) of IRS-1C and LANDSAT TM have been recorded via satellite. The possibilities and geometric particularities of airborne digital image recording (in combination with INS and GPS data) are examined on the example of two image strips obtained by the digital three-line scanning camera DPA. All scenes cover the common test field *Frankfurt am Main West*, at least in parts.

Some pre-processing steps can be considered as typical of the sensors mentioned above and will in future no doubt gain in importance. Techniques serving the fusion of image data of different geometric resolution as well as atmospheric and topographic corrections of grey values are discussed and employed in this sense, for instance. The geometric evaluations concentrate on the data of the digital three-line camera, resulting in the final products digital orthoimage and digital surface model. An approach aiming at the use of existing commercial digital stereo workstations for the purpose of evaluating the three-line scanner data is designed and applied in practise. Extraction and classification of linear features and regions obtained from remote sensing data are performed on the basis of spectral, textural and time-dependent image information. The aim consists in the recognition of transport routes as well as in the delimitation of areas of settlement from various vegetation areas. The synergetic use of ATKIS input knowledge and remote sensing procedures for the updating of ATKIS and model generation within ATKIS constitutes the frame of the contents of subject.

The project described in this publication was promoted by funds of the Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (Federal Ministry for Education, Cultural Affairs, Research and Technology) under the registration number 50 EE 9604. The author assumes responsibility for the contents of the present publication.

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

ZUSAMMENFASSUNG:

Strategien und Methoden der Bildanalyse, der Fernerkundung und der Digitalen Photogrammetrie werden im Hinblick auf die automatisierte Fortführung von Geoinformationssystemen (GIS) erprobt und weiterentwickelt. Zentrale inhaltliche Zielsetzungen sind die gründliche Nutzung vorhandener Geo-Daten für ausgewählte Erkennungsaufgaben, die Verifikation dieser Daten und nicht zuletzt ihre automatisierte Fortführung. Einen Schwerpunkt bildet die Einbeziehung der Digitalen Landschaftsmodelle des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS). Die betrachteten Maßstabsbereiche werden durch das Basis-DLM auf der einen sowie das DLM 250 auf der anderen Seite abgesteckt.

Vor dem Hintergrund der anstehenden kommerziellen Verfügbarkeit von hochauflösenden Satellitenbildern, der für das Jahr 2000 angekündigten digitalen Luftbildkamerasysteme und der Inspiration durch die technischen Möglichkeiten der Weltraumkamera MOMS-02 kommen in dieser Arbeit unterschiedliche Bilddatensätze zum Einsatz: Via Satellit aufgezeichnet sind eine hochauflösende panchromatische Szene von IRS-1C sowie eine multispektrale und -temporale Bildfolge (5 Szenen aus 1997) von IRS-1C und LANDSAT TM. Die Möglichkeiten und geometrischen Besonderheiten der flugzeuggestützten digitalen Bildaufzeichnung (in Kombination mit INS- und GPS-Daten) werden am Beispiel zweier Bildstreifen der digitalen Dreizeilenkamera DPA untersucht. Alle Szenen decken das gemeinsame Testgebiet *Frankfurt am Main West* zumindest teilweise ab.

Einige Vorverarbeitungsschritte sind für die genannten Sensoren typisch und werden in Zukunft wohl noch an Bedeutung gewinnen. In diesem Sinne werden hier u.a. Techniken zur Fusion von Bilddaten unterschiedlicher geometrischer Auflösung sowie zur atmosphären- und terrainbedingten Grauwertkorrektur diskutiert und eingesetzt. Die geometrische Auswertung konzentriert sich auf die Dreizeilenkameradaten und resultiert in den Endprodukten Digitales Orthobild und Digitales Oberflächenmodell. Ein Weg zur Nutzung bestehender kommerzieller digitaler Stereo-Arbeitsstationen für die Auswertung der Dreizeilenscannerdaten wird entworfen und erprobt. Die Extraktion und Klassifizierung von linienhaften und flächenhaften Objekten aus den Fernerkundungsdaten erfolgt auf der Basis spektraler, textureller und zeitabhängiger Bildinformationen. Ziel ist die Erkennung von Verkehrswegen sowie die Abgrenzung von Siedlungs- gegenüber diversen Vegetationsflächen. Dabei bildet die synergetische Nutzung von ATKIS-Vorwissen und Fernerkundungsmethoden für die ATKIS-Fortführung und -Modellgeneralisierung den inhaltlichen Rahmen.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	
Vorwort	

1	Einl	eitung	13
	1.1	Das Projekt UTOMA vor dem Hintergrund aktuell verfügbarer Fernerkundungsdaten	13
	1.2	Aufgabenschwerpunkte	14
2	Vorv	verarbeitung im Hinblick auf die multisensorale Bilddatenauswertung	17
	2.1	Pixel- und subpixelgenaue Georeferenzierung	17
	2.2	Atmosphären- und topographiebedingte Grauwertkorrekturen	22
	2.3	Fusion von Bilddaten unterschiedlicher geometrischer Auflösung	24
3	Geo	metrische Auswertung von Bildern flugzeuggetragener Sensorzeilenkameras	29
	3.1	Sensordesign der DPA (= Digital Photogrammetric Assembly)	30
	3.2	Geometrische Entzerrung von Zeilenscannerbildern	31
	3.3	Stereobetrachtung und Epipolarbildberechnung	36
	3.4	Ursachen für Restfehler der Aerotriangulation	39
	3.5	Zusammenfassung und Wertung	44
4	GIS	–Vorwissen als Basis für die Lösung von Erkennungs- und Fortführungsaufgaben	45
	4.1	Trainingsgebiete für die Siedlungserkennung aus kleinmaßstäbigen GIS-Daten	45
	4.2	Synergetische Nutzung von ATKIS-Vorwissen und Fernerkundungsmethoden für die ATKIS-Fortführung und -Modellgeneralisierung	49
	4.3	Flächenhafte Fortführung von ATKIS am Beispiel von Waldgebieten	54
5	Extr	raktion und Klassifizierung linienhafter Objekte	61
	5.1	Erkennung von Fließgewässern	62
	5.2	Erkennung von Siedlungsgebieten anhand von Texturmerkmalen	62
	5.3	Linienextraktion und Klassifizierung im Hinblick auf außerörtliche Verkehrswege	67
6	Extr	aktion flächenhafter Objekte durch multitemporale Klassifizierung	81
	6.1	Erkennung von Grünland- und Ackerflächen in multisaisonalen Bilddaten	81
	6.2	Erkennung von Siedlungsflächen durch texturelle und spektrale Informationen	86
7	Zusa	ammenfassende Diskussion	89
	Dan	k	93
	Lite	ratur	95

11

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1	Digitale Mehrzeilenkamera MOMS-2P	13
2	Space Imaging's Satellit IKONOS	14
3	Aufgabenschwerpunkte des Projektes UTOMA	15
4	Testgebiet <i>Frankfurt am Main West</i> . Orthobild aus IRS-1C NIR überlagert von der Folie "Straßenfüllung" der TK50	18
5	Geometrischer Versatz zwischen den Aufzeichnungen des roten und grünen Spektralbe- reichs von IRS-1C LISS	19
6	Orthobild aus IRS-1C NIR überlagert von der Grundrißfolie der TK50 (Ausschnitt)	20
7	Halbautomatische Paß- und Verknüpfungspunktmessung mit OrthoEngine SE der Firma PCI (Screenshot)	21
8	Radiometrische Terrainkorrektur: Reliefdarstellung und Korrekturfunktion	24
9	Fusion von multispektralen und panchromatischen IRS-1C-Bildern, Orthobildausschnitt <i>Raunheim</i>	25
10	Fusion von multispektralen und panchromatischen IRS-1C-Bildern, Orthobildausschnitt Nordwestkreuz Frankfurt	26
11	Orthobild als simulierte Echtfarbenkomposite	28
12	Bildflugübersicht der DPA-Flugstreifen über dem Testgebiet Frankfurt-West	29
13	Die digitale Dreizeilenkamera DPA: Anordnung der Objektive und Sensorzeilen	31
14	Geometrische Rekonstruktion mit dem optischen Dreizeilenscanner	32
15	Beispiel für die geometrische Entzerrung bei mittleren Drehwinkeländerungen	33
16	Beispiel für die geometrische Entzerrung bei starken Drehwinkeländerungen	33
17	Plausibilitätskontrolle der Bild-, DGPS-, IME- und Zeitaufzeichnungen durch geometri- sche Vorentzerrung, hier bei starken lokalen Drehwinkeländerungen	34
18	Die geometrische Entzerrung am Beispiel eines gesamten Flugstreifens	35
19	Digitales Oberflächenmodell und überlagertes Orthobild der aus den DPA-Daten gerechneten Oberflächenrekonstruktion	36
20	Restparallaxen bei der Vorentzerrung in Abhängigkeit von der Flugbahn und dem vorge- gebenen Digitalen Oberflächenmodell	37
21	Überlagerung von Vor- und Rückblick der vorentzerrten DPA-Daten als Anaglyphenbild	38
22	Laborkalibrierungsergebnisse (DASA) für die panchromatischen Sensorbausteine	39
23	Plausibilitätskontrolle der geometrischen Kalibrierung im Übergangsbereich 'zwischen' zwei Sensorbausteinen	40
24	Plausibilitätskontrolle der geometrischen Kalibrierung im Übergangsbereich 'zwischen' zwei Sensorbausteinen (Ausschnitt)	40
25	Laborkalibrierung versus Selbstkalibrierung	41
26	Geometrische Entzerrung bei starken Drehwinkeländerungen	42
27	IME-Beobachtungen für den gesamten Flugstreifen 8 der Befliegung Frankfurt-West	43

28	Unterschiede aufgrund von Generalisierung und Fortführungsbedarf zwischen automa- tisch extrahierten Siedlungsbereichen und im GIS dargestellten Siedlungsbereichen	46
29	Vorarbeiten zur Festlegung von Trainingsgebieten für die Objektklasse 'Siedlung'	47
30	Automatisiert abgeleitete Trainingsgebiete für die Objektklassen 'Siedlung' und 'Außen- bereich'	48
31	Konzeption und Praxis der Produktion von ATKIS	49
32	ATKIS Basis-DLM – ausgewählte Inhalte im Hinblick auf die automatisierte Erkennung in Fernerkundungsbildern	51
33	Spektrale Abgrenzung von Waldgebieten mit GIS-Vorwissen	55
34	Erkennung von Waldgebieten (Überblick)	56
35	Erkennung von Waldgebieten (Ausschnitte)	57
36	Unterscheidung von Laub- und Nadelholz	59
37	Verifizierung der Vegetationsmerkmale 'Laubholz' und 'Nadelholz' in Waldgebieten	60
38	Verifizierung des Vegetationsmerkmals 'Laub- und Nadelholz' in Waldgebieten	60
39	Automatische Extraktion der Objektklasse 'Siedlung'	63
40	Automatische Bereinigung der erkannten Siedlungsbereiche	64
41	Ergebnis der automatischen Siedlungserkennung (Überblick)	65
42	Ergebnisbeispiele zur automatischen Siedlungserkennung (Ausschnitte)	66
43	Zusammenfassung der Vektordaten und Auswirkung des Versatzes des Rotkanals von IRS-1C LISS gegenüber Infrarot- und Grünkanal bei der Linienextraktion	68
44	Extraktion heller Linien	69
45	Extraktion dunkler Linien	70
46	Extrahierte und anschließend vereinigte Linienzüge aus den Kanälen von IRS-1C LISS .	72
47	Zwischenergebnis nach der thematischen Verschmelzung der automatisch klassifizierten spektralen Cluster	73
48	Linienerkennung unter Beschränkung auf die Klassifikation von Linienpixeln	74
49	Endergebnis der flächenhaften Klassifizierung auf Basis der Linienpixel	76
50	Endergebnis der Klassifizierung der Linienpixel	77
51	Endergebnis der flächenhaften Klassifizierung auf Basis der Linienpixel (Ausschnitt)	78
52	Endergebnis der Klassifizierung der Linienpixel (Ausschnitt)	79
53	Erkennung der Objektarten 'Ackerland' und 'Grünland': Ausgangsdaten für die multi- temporale Klassifizierung und Ergebnis	84
54	Erkennung der Objektarten 'Ackerland' und 'Grünland': Automatisch nachbereinigte Klassifizierungsergebnisse im Vergleich zu den Vorgaben des ATKIS Basis-DLMs	85
55	Ausgangsdaten für die Erkennung von Siedlungsgebieten	86
56	Erkennung des Objektbereichs 'Siedlung' im Vergleich zu den Vorgaben aus dem ATKIS Basis-DLM	87
57	Zusammenstellung der flächenhaften Klassifizierungsergebnisse	90

TABELLENVERZEICHNIS

1	Gegenüberstellung ausgewählter Charakteristika von MOMS-2P und IRS-1C	16
2	Sonnenstände für die Terrainkorrektur der Bilddaten	23
3	Designparameter des DPA-Stereomoduls	31
4	Designparameter des DPA-Multispektralmoduls	31
5	Ausgewählte Angaben zu den Objektarten 'Wald, Forst' und 'Gehölz' nach $[AdV 1999]$.	53
6	Steuerparameter für die automatische Klassifizierung (zu Bild 47)	71
7	Automatische Klassifizierung mit unterschiedlichen Vorgaben (Linienlänge) für die Wahl spektral homogener Trainingsgebiete	71
8	Übersicht zu den potentiellen Ausgangsdaten für die multitemporale Klassifizierung	82

Vorwort

Der das Projekt "Anwendung und Entwicklung von Verfahren zur Nutzung von MOMS-2P-Daten für topographisch kartographische und thematisch kartographische Aufgabenstellungen (UTOMA)" initiierende und tragende Grundgedanke war – in Erwartung von Synergieeffekten – die Bündelung von satellitengetragenen Aufnahmetechniken und Auswertemethoden der digitalen Bildverarbeitung für kartographische Aufgabenstellungen. Damit hat sich das damalige Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG) die Aufgabe gestellt, im Rahmen einer Pilotstudie die kartographische Nutzbarkeit der satellitengetragenen Fernerkundung für hausinterne kleinmaßstäbige Anwendungen unter der Maßgabe damals – voraussichtlich – verfügbarer Aufnahmetechniken auf den Prüfstand zu stellen. Von Interesse waren hierbei die simultane Auswertung multitemporaler Multispektralaufnahmen unter Berücksichtigung von Texturen zur Segmentierung kartographisch nutzbarer Flächen, die automatische Erkennung von Linien und ihre Vektorisierung zur Beschreibung der Infrastruktur sowie die Berechnung eines Reliefs aus Stereoaufzeichnungen.

Leider ist es nicht zu einer rechtzeitigen Auslieferung von MOMS-2P-Daten gekommen. Insofern hat sich der verspätete Projektbeginn des inzwischen in Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) umbenannten IfAG als zweckmäßig erwiesen. Ersatzweise wurden dank des unermüdlichen Einsatzes von Herrn *Dr. Steinborn* (DLR) Daten des Satelliten IRS-1C, aufgezeichnet im multispektralen (LISS) und panchromatischen (PAN) Spektralbereich, sowie die im vorgegebenen Untersuchungsgebiet mit der Digitalen Photogrammetrie-Ausstattung (DPA) des Amtes für miltärisches Geowesen digital erfaßten Bildflugstreifen kostenlos zur Verfügung gestellt. Darüberhinaus hat das BKG aus eigenen Mitteln IRS-1C und LANDSAT TM-Daten des Jahres 1997 beschafft.

Die Laufzeit des mit Mitteln (Gesamtsumme ca. 246 TDM) des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter dem Kennzeichen 50 EE 9604 geförderten Projektes UTOMA war von Anfang an auf zwei Jahre beschränkt. Sie endete am 11.11.1999. Der Zuwendungsempfänger bedankt sich an dieser Stelle für die Förderung des vorgeschlagenen Pilotprojektes.

Projektbeteiligte i.S. der Antragstellung waren *Prof. Dr. Schulz* (Projektleitung), *Dr. Busch, Prof. Dr. Proβ, Dipl.-Inform. Wende* vom IfAG/BKG, *Dr. Schlüter* (drittmittelfinanzierter wiss. Mitarbeiter) und *Prof. Dr. Boochs* von der FHS Mainz. Allen gebührt mein Dank für das Gelingen des Vorhabens.

Der Fa. EFTAS wurde die mit BMBF-Mitteln finanzierte Programmentwicklung zur automatischen geometrischen Zuordnung multisensoraler und multitemporaler digitaler Satellitenbilder übertragen.

Schuz

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Siegfried Schulz

1 Einleitung

1.1 Das Projekt UTOMA vor dem Hintergrund aktuell verfügbarer Fernerkundungsdaten

UTOMA (= <u>U</u>PDATING OF SMALL-SCALE <u>TO</u>POGRAPHIC <u>MA</u>PS (1:200000) USING MOMS-2P DATA) wurde als MOMS-Pilotprojekt von *Prof. Dr. Schulz* und *Dr. Busch* in den Jahren 1995/96 am Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG) in Frankfurt am Main, heute Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), ins Leben gerufen. Das Vorhaben war ein gemeinsam formuliertes Pilotprojekt zwischen IfAG (Frankfurt a.M.), IfAG (Außenstelle Leipzig) und *Prof. Dr. Boochs*, FH Mainz. Von 1997 bis 1999 erfolgte die Förderung mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie.

Der *MOMS* (= *Modulare Optoelektronische Multispektrale Scanner*) ist eine experimentelle Entwicklung zur digitalen optischen Aufnahme der Erdoberfläche aus dem Weltraum und zur Erprobung zukunftsorientierter Technologien der Erderkundung. Nach dem erfolgreichen Einsatz der Kamera MOMS-01 auf zwei Flügen des amerikanischen Space Shuttle in den Jahren 1983/84 wurde die erheblich erweiterte Kamera MOMS-02 im Rahmen der zweiten deutschen Spacelab-Mission 1993 erfolgreich erprobt, vgl. [*Konecny* und *Schiewe* 1997]. Wesentliche Charakteristika der Kamera MOMS-02 sind die Aufzeichnung von hochauflösenden Bilddaten mit bis zu $4.5 \times 4.5m^2$ Bodenpixelgröße (bei einer Flughöhe von dreihundert Kilometern), von dreifach stereoskopischen panchromatischen Bilddaten während eines Überfluges und von Multispektraldaten in vier Kanälen mit enger spektraler Bandbreite. Die Kamera MOMS-02 wurde entsprechend den Anforderungen des PRIRODA-Moduls auf der russischen Weltraumstation MIR modifiziert und seither mit MOMS-2P bezeichnet.



Bild 1 – Digitale Mehrzeilenkamera MOMS-2P, angedockt an der MIR-PRIRODA Plattform. (Die Abbildung wurde freundlicherweise von *P. Seige*, DLR-OP / NE-OE zur Verfügung gestellt.)

Der Betrieb der optoelektronischen Zeilenkamera MOMS-2P an Bord des PRIRODA-Moduls, siehe Bild 1, war nach dem Einbau im April 1996 aufgrund technischer Schwierigkeiten in den Jahren 1996/97 nur sehr eingeschränkt möglich, vgl. [*Seige et al.* 1999]. Erst ab April 1998 konnten regelmäßig Bilddaten auf Band aufgezeichnet werden, welche per Space Shuttle oder Sojus-Flug zur Erde transportiert wurden und Ende 1998 in Deutschland verfügbar waren. Dieser Aufnahmebetrieb wurde bis zum August 1999 aufrecht erhalten. Neben einem Überblick über die bisherigen MOMS-Missionen gibt [*Kornus* 1999] die grundsätzlichen Vorzüge des MOMS-2P/PRIRODA Missionsszenariums gegenüber den vorherigen Shuttle-Missionen an, stellt aber auch die erheblichen Einschränkungen im praktischen Aufnahmebetrieb dar, so z.B. die nach dem Ausfall der telemetrischen Datenübertragung begrenzten Speicherresourcen und die lange Vorlaufzeit für die Aufnahmeplanung, welche eine Einbeziehung der aktuellen Wetter-

situation unmöglich machte. Konsequenz dieser und weiterer Schwierigkeiten ist, daß von deutschem Staatsgebiet nur vereinzelt wolkenfreie oder -arme Bildstreifen aufgezeichnet werden konnten. Für das im Rahmen von *UTOMA* avisierte Testgebiet *Frankfurt am Main West* (mit den Grenzen der gleichnamigen Topographischen Karte 1:50 000 L5916 des Hessischen Landesvermessungsamtes) liegen keine Bilddaten von MOMS-2P vor.

Die berechtigte Kritik der *de facto* bestehenden Aufnahmemöglichkeiten während der Mission MOMS-2P wurde durch die Mißerfolge von alternativen, ebenfalls ehrgeizigen Vorhaben im Bereich hochauflösender Fernerkundungssatelliten in den letzten Jahren etwas relativiert. Als Beispiel sei zunächst der Ausfall von SPOT 3 im Jahr 1996 genannt, aufgefangen durch die Reaktivierung von SPOT 1 und den erfolgreichen Start von SPOT 4 in 1998. Noch schwerer wiegen die Fehlschläge der Missionen EARLYBIRD und IKONOS-1, denn damit stehen die für den Zeitraum 1995 – 1998 von den Firmen Earthwatch, Space Imgaging und Orbimage angekündigten Aufnahmen aus dem Weltraum mit einer Bodenpixelgröße von ca. $1 \times 1m^2$ noch immer nicht zur Verfügung, vgl. [*Konecny* 1996]. Mit dem erfolgreichen Start von LANDSAT 7 in 1999 wird die Bodenauflösung dieses multispektralen "Klassikers" auf immerhin $15 \times 15m^2$ für einen panchromatischen Kanal erhöht. Weiterhin bringen es die seit Ende 1995 bzw. 1997 operierenden indischen Fernerkundungssatelliten IRS-1C und IRS-1D auf immerhin $6 \times 6m^2$ Bodenpixelgröße, allerdings mit geringerer radiometrischer Qualität als beispielsweise SPOT. Erst der erfolgreiche Start von IKONOS-2 (jetzt IKONOS) im September 1999, Bild 2, läßt für das Jahr 2000 wieder Hoffnung hinsichtlich der so lange angestrebten Auflösung im Ein-Meter-Bereich aufkommen – die ersten freigegebenen Bilder sind vielversprechend [*SpaceImaging* 1999].





Rechte an den Bildern: Russ Underwood, Lockheed Martin Missiles & Space

Bild 2 – Space Imaging's Satellit IKONOS im Reinraum (li.) und beim erfolgreichen Start am 24.9.1999 (re.).

1.2 Aufgabenschwerpunkte

Im Rahmen der Bereitstellung von MOMS-Simulationsdaten zur Unterstützung der deutschen Nutzerbereiche bei der Realisierung ihrer Pilotprojekte im Rahmen des MOMS-2P-Weltraumprogrammes wurden dem BKG Ersatzdaten angeboten. Für den Aufgabenbereich der geometrischen Oberflächenrekonstruktion nach dem Stereoprinzip, vgl. Bild 3(links), wurden flugzeuggestützt aufgezeichnete, panchromatische DPA*-Dreizeilenscannerstreifen von einem Teilgebiet des Testgebietes zur Verfügung gestellt, dieses Teilgebiet wird im folgenden mit *Frankfurt-West* referenziert. Diese Daten unterscheiden sich in puncto Bodenauflösung, Aufnahme- und Auswertetechnik erheblich von den ursprünglich vorgesehenen Bildern von MOMS-2P. Infolgedessen gewinnt das entsprechende Kapitel 3 in diesem Bericht einen gewissen Sonderstatus, da hier mit hochaufgelösten, flugzeuggestützt aufgezeichneten Bilddaten gearbeitet wird. Da die flugzeuggetragene digitale Bildaufzeichnung für photogrammetrische Zwecke aber zur Zeit an

^{*}DPA = Digital Photogrammetric Assembly = Digitale Photogrammetrie-Ausstattung

der Schwelle zur Praxisreife steht, war seitens des BKG der gezielte Aufbau von entsprechendem Know-How ausdrücklich erwünscht – die Firmen Z/I Imaging (ZEISS/Intergraph) als auch LH Systems (LEI-CA/Helava) haben auf der "Photogrammetrische Woche 1999" in Stuttgart ihre Konzepte für eine digitale Luftbildkamera offengelegt und funktionsfähige Kamerahardware für Mitte des Jahres 2000 in Aussicht gestellt, vgl. [*Hinz* 1999], [*Sandau et al.* 1999]. Die neuen digitalen Kameras (aber auch die bestehenden Prototypen wie die DPA) bieten neben der Fähigkeit zur Multispektralaufzeichung insbesondere eine um Größenordnungen gesteigerte radiometrische Qualität im Vergleich zu gescannten Luftbildern, was sich u.a. positiv auf die Automatisierbarkeit von digitalen Bildauswertemethoden auswirken wird. Um den Bogen zurück zu MOMS zu schlagen: Im Rahmen der hier vorliegenden Projektarbeiten zeichnet sich deutlich ab, daß wissenschaftliche Entwicklungen aus dem Umfeld von MOMS-2P, beispielsweise zur geometrischen Kalibrierung, äußerst wertvoll im Hinblick auf die zukünftig von kommerziellen Firmen angebotenen digitalen Luftbildkameras sind.

Die geometrische Auswertung ist aber nur ein Baustein aus der Vorhabenbeschreibung von *UTOMA*, weiterhin stand die automatisierte Ableitung von flächen- und linienartigen Informationen mit Relevanz für kleinmaßstäbige Digitale Landschaftsmodelle (DLM) bzw. Geoinformationssysteme (GIS) im Zentrum des Interesses, vgl. Bild 3. Für diese Aufgabenbereiche der flächen- und linienhaften Interpretation und Erkennung wurden im Rahmen der Förderung Mittel zum Ankauf von drei Szenen des indischen Satelliten IRS-1C bereitgestellt, diese Aufnahmen wurden durch zwei vom BKG gestellte LANDSAT TM-Szenen zu einer multitemporal aussagekräftigen Zeitreihe ergänzt. Damit lagen für das Jahr 1997 fünf Aufnahmen des Testgebietes vor, und zwar von den Monaten März, April, Juli, August und Oktober.



Bild 3 – Die drei Aufgabenschwerpunkte des Projektes *UTOMA* mit Bezug auf die zur Verfügung stehenden MOMS-Ersatzdaten von den Sensoren DPA, IRS-1C und LANDSAT TM. (*Prof. Dr. Schulz*)

Während der Wechsel von den nicht zur Verfügung stehenden MOMS-Bildern auf die flugzeuggestützt aufgezeichneten DPA-Daten für die geometrische Oberflächenrekonstruktion eine erhebliche inhaltliche Aufweitung der Projektarbeiten nach sich zog, war die Ausgangssituation für die verbleibenden Teilaufgaben im Hinblick auf die Ableitung und Fortführung kleinmaßstäbiger Digitaler Landschaftsmodelle (DLMe) günstiger, da die IRS-1C Bilder den ursprünglich vorgesehenen Bildern von MOMS-2P in ihrer radiometrischen Charakteristik und Auflösung recht nahe kommen, vgl. Tab. 1. Lediglich bei den Multispektralkanälen fällt die unterschiedliche geometrische Bodenauflösung als wesentlicher Unterschied zwischen beiden Sensorsystemen im Hinblick auf die Aufgabenstellungen ins Auge. Mögliche Auswir-

	Bodenpixel- größe [m]		Spektralber	reiche [nm]		Bits /Gw
MOMS-02/D2 pan-Nadir MOMS-2P pan-Nadir IRS-1C pan	4.5 6.0 6.0		520 - 520 - 500 -	- 760 - 760 - 750		6 (8) 6 (8) 6
MOMS-02/D2 ms1-4 MOMS-2P ms1-4 IRS-1C LISS-3	13.5 18.0 24.0	449 – 511 449 – 511	532 - 576 532 - 576 520 - 590	645 - 677 645 - 677 620 - 680	772-815 772-815 770-860	8 8 7

Tabelle 1 - Gegenüberstellung ausgewählter Charakteristika von MOMS-2P und IRS-1C

kungen der geringfügig unterschiedlichen Auslegungen der spektralen Fenster der Multispektralkanäle können hier nicht beurteilt werden. Angemerkt sei, daß durch die eingeschränkten Aufnahmemodi von MOMS der Blaukanal in der Regel nicht aufgezeichnet wird und somit auch nicht zur Verfügung steht. Überwiegend wurde mit den Modi C und A gearbeitet, vgl. [*DLR* 1999].

Während im Rahmen der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung die Lieferung von digitalen MOMS-2P-Orthobildern zugesagt worden war, mußte die Vorprozessierung der Bilddaten von IRS-1C und LAND-SAT TM in Eigenregie erfolgen. Ausgewählte Punkte dieses Themenkreises werden daher in Kap. 2 gestreift. Ein wesentlicher Punkt im Hinblick auf die automatisierte Fortführung von Geoinformationen ist die möglichst weitgehende Einbeziehung der *a priori* bereits vorliegenden Informationen. Da ein kleinmaßstäbiges DLM für die Bundesrepublik Deutschland noch nicht vorliegt, wurden alternative Rasterund Vektordaten eingesetzt, vgl. Kap. 4. Ein gewisser Durchbruch erfolgte, als das Geodatenzentrum des BKG Leipzig Anfang 1999 das ATKIS-Basis-DLM für den Bereich der TK50 L5916 *Frankfurt am Main West* im Rahmen des Projektes *UTOMA* zur Verfügung stellte. Die attributorientierte Strukturierung der flächen- und linienartigen Informationen in einer Datenbank erlaubte neue Wege für die Georeferenzierung, für den gezielten Einsatz von Vorwissen im Rahmen der multispektralen Klassifizierung und für die Verifizierung der erzielten Ergebnisse. Die abschließenden Ergebnisse zur Extraktion und Klassifizierung linienhafter Objekte werden in Kap. 5, zur multispektralen und -temporalen Klassifizierung flächenhafter Objekte in den Kap. 4.3 und 6 thematisch gegliedert dargestellt. Eine zusammenfassende Wertung erfolgt für das Kapitel 3 in Abschnitt 3.5 auf S. 44 und für die Kap. 4 bis 6 in Kap. 7 auf S. 89.

2 Vorverarbeitung im Hinblick auf die multisensorale Bilddatenauswertung

Eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg dieser Objekterkennungsstrategien, welche sich auf die Kombination von Bilddaten unterschiedlicher Spektralbereiche und geometrischer Auflösung stützen, ist die adäquate, gegenseitige geometrische Referenzierung der Daten. Um weiterhin einen direkten Bezug zu geometrischen Vergleichsdaten herstellen zu können, wurden alle beteiligten Bilddaten in Orthobilder überführt, vgl. hierzu Abschnitt 2.1.

Die atmosphärische Korrektur der Bilddaten erfolgt im Zusammenhang mit einer Terrainkorrektur, siehe Abschnitt 2.2. Erfordernisse und mögliche Vereinfachungen bei diesen Korrekturen werden im Hinblick auf die multisensorale Auswertung diskutiert. Sie hängen stark von der Zielrichtung der vorgesehen Auswerteschritte und der angestrebten Ergebnisse ab. Desweiteren wird in Abschnitt 2.3 auf ausgewählte radiometrische Vorverarbeitungsschritte eingegangen: Für die interaktive Interpretation am Bildschirm ist die Fusion hochaufgelöster panchromatischer Bilder mit geringer aufgelösten Multispektraldaten von Interesse. Die Linienextraktion (vgl. Kap. 5) wurde teilweise in den hochaufgelösten, panchromatischen IRS-1C-Szenen durchgeführt, anschließend wurden die Ergebnisse auf der Basis der multispektralen Bilder IRS-1C LISS weiterverarbeitet. Im Rahmen dieser Teilaufgabe stellten die fusionierten Bilder eine aussagekräftige Qualitätskontrolle der gegenseitigen Referenzierung dar. Für automatische Verfahren wie die multispektrale Klassifizierung waren die fusionierten Bilder dagegen weniger geeignet. Hier stehen die Verhältniszahlen der Bodenpixelauflösungen (bei IRS-1C: 1×1 gegenüber 4×4 Pixel) einerseits und der Informationszuwachs andererseits in einem ungünstigen Verhältnis. Ergänzend wird ein pragmatischer Weg zur Simulation eines Blaukanals für die IRS-1C-Bilddaten vorgeschlagen, der beim interaktiven Bewerten und Nachbearbeiten das Hinterlegen einer Naturfarbkomposite ermöglicht.

2.1 Pixel- und subpixelgenaue Georeferenzierung

Die gemeinsame Verarbeitung von Bilddaten unterschiedlicher Auflösung und Spektralbereiche erfordert eine geometrische Referenzierung, deren Qualität sich an der jeweils höchsten beteiligten Auflösung orientiert. Gerade bei kleinräumig strukturierten Gebieten wie den mitteleuropäischen Ballungszentren können sich fehlerhafte Referenzierungen dramatisch auswirken. Ein eindrucksvolles Beispiel hierfür ist in [*Bähr* und *Vögtle* 1998] angegeben. Bereits bei Verschiebungsbeträgen von einem halben bzw. einem Pixel wurden an einem Beispiel Änderungen der Klassenzuordnung für 17% bzw. 29% der Pixel einer Klasse festgestellt.

Im Rahmen von *UTOMA* wurde zunächst unitemporal mit panchromatischen und multispektralen IRS-1C-Bilddaten gearbeitet. Als Georeferenz stand neben kleinmaßstäbigen Daten wie der *Joint Operations Graphic* (JOG) 1:250 000 der NATO die digitale Version der Topographischen Karte 1:50 000 L5916 *Frankfurt am Main West* des Hessischen Landesvermessungsamtes (HLVA) zur Verfügung. Die Gebietsabdeckung der L5916 legte gleichzeitig die maximale Ausdehnung des Testgebietes *Frankfurt am Main West* fest, mangels Bildabdeckung mußten die Grenzen teilweise sogar noch etwas enger gezogen werden. Für die multitemporale Auswertung konnte später das ATKIS Basis-DLM genutzt werden, was im praktischen Arbeitsablauf erhebliche Vereinfachung für die gegenseitige und absolute Referenzierung der Bilddaten mit sich brachte. Für die multitemporale Auswertung waren dann auch bereits vorentzerrte Bilder von LANDSAT TM mit einzubeziehen. Die einheitliche Georeferenzierung im Gauß-Krüger-System mit dem Höhenbezug Bessel-Ellipsoid wurde kontinuierlich beibehalten.

Die IRS-1C-Bilddaten wurden von der Firma *Euromap* bezogen. Die Bilddaten liegen als *Level 2 data* vor, es handelt sich dabei um sog. systemkorrigierte Daten, was laut Datenbeschreibung sowohl radiometrische als auch geometrische Korrekturen mit einschließt, vgl. die Firmeninformation von [*Euromap* 1999]. Bild- und Korrekturdaten wurden im *BSQ Super Structure Format* geliefert und über ein spezielles Modul zur Umsetzung dieses Datenformats für die Orthobildberechnung mit *OrthoEngine SE 6.2*



Bild 4 – Testgebiet *Frankfurt am Main West*. Orthobild aus IRS-1C NIR, aufgenommen am 24.4.1997, überlagert von der Folie "Straßenfüllung" der TK50 L5916 in rot. Bezugssystem ist Gauß-Krüger.

der Firma *PCI* gelesen bzw. verarbeitet. Das komplette Testgebiet, welches in etwa den Inhalt der topographischen Karte 1:50 000 L5916 abdeckt, wird stets wolkenfrei abgebildet, vgl. Bild. 4. Die anzustrebende geometrische Qualität für die gegenseitige Referenzierung der Bilddaten ist an der Auflösung der panchromatischen Bilder (ca. $6 \times 6m^2$ am Boden) festzumachen. Um Farbsäume in den resultierenden Orthobildern zu vermeiden, sollten Abweichungen von einem halben Pixel, also 3m am Boden, nicht überschritten werden. Durch den erheblichen Unterschied in der Auflösung für die multispektralen Bilddaten mit ca. $24 \times 24m^2$ am Boden liegen die Genauigkeitsanforderungen für die Bilder von IRS-1C LISS damit bei einem achtel Pixel, also im Grenzbereich des Erreichbaren. Als erster Schritt war die geometrische Kalibrierung der IRS-1C-Sensoren zu überprüfen und gegebenfalls zu korrigieren. Es zeigte sich nämlich, daß das aus einer Georeferenzierung mit den Bahn- und Kalibrierungsdaten aus dem sog. *Superstructure*-Format, dem DGM des HLVA (Rasterweite $40 \times 40m^2$) sowie 12 interaktiv gemessenen Paßpunkten resultierende multispektrale Orthobild noch Farbsäume aufwies. Diese lassen sich auf eine Verschiebung des Rotkanals gegenüber dem Infrarot- sowie auch dem Grünkanal um einen Betrag von ca. 0.7 Pixel zurückführen. Wird das Resampling bei der Georeferenzierung im Hinblick auf die später vorzunehmende vollautomatische Klassifizierung mit einer Nächst-Nachbar-Interpolation durchgeführt, so muß der Verschiebungsbetrag von ca. 0.7 Pixel hingenommen werden – für die Fusion mit den vierfach höher aufgelösten panchromatischen Bilddaten ist ein entsprechender Fehler aber in keinem Fall tolerabel, da er in den fusionierten Bildern in jeweils zwei bis drei Pixel breiten Farbsäumen mündet, vgl. Bild. 5(a).



(a): $[R,G,B] = [G_{roh}, R_{roh}, G_{roh}]$



(b): $[R,G,B] = [G_{roh}, R_{korr.}, G_{roh}]$

Bild 5 – Geometrischer Versatz zwischen den Aufzeichnungen des roten und grünen Spektralbereichs von IRS-1C LISS. Die Ausschnitte von 75 × 85 Pixel zeigt einen Teil des Rollfelds des *Flughafen Frankfurt am Main*. Rotund Grünkanal sind (kontrastverstärkt) mit einer Bodenpixelgröße von $6 \times 6m^2$ dargestellt, wie sie aus der Fusion mit den panchromatischen Daten resultieren. (a): Orthobildausschnitt ohne geometrische Korrektur der einzelnen Kanäle untereinander. (b): Orthobildausschnitt nach erfolgter Korrektur.

Hier wurde der erforderliche Korrekturbetrag über eine globale Affintransformation bereitgestellt, vgl. Bild 5(b), deren Geltungsbereich sich über das gesamte Kartenblatt erstreckte. Die Anforderungen an die Bestimmung der Transformationsparameter sind relativ hoch, da im Hinblick auf die Fusion mit den panchomatischen Bilddaten deutlich genauer als ein viertel Pixel sein sollen. Sie wurde hier über die flächenhafte Minimierung der Farbsäume realisiert. Für großflächigere Auswertungen sollten die Sensorkalibrierungsdaten über den Weg der photogrammetrischen Selbstkalibrierung anhand von Verknüpfungspunkten korrigiert werden, vgl. z.B. die entsprechenden Arbeiten für die panchromatischen Bildstreifen von IRS-1C von [*Jacobsen* 1997]. Die Paßpunktmessung in den einzelnen Spektralkanälen als potentieller Lösungsweg versagte hier, da eine eindeutige Identifikation der Paßpunkte in allen Kanälen in der Regel nicht möglich war. Die Paßpunktmessung, welche sich an der geometrisch genauen Identifizierbarkeit topographischer Objekte orientieren muß, ist von der Verknüpfungspunktmessung zu Kalibrierungszwecken, welche eine klare Objektabgrenzung in möglichst allen beteiligten Spektralkanälen erfordert, zu trennen. Die Georeferenzierung über die digitalisierte TK50 lieferte ein prinzipiell pixelgenaues Ergebnis. Es ist aber zu beachten, daß wesentliche Inhalte der TK50 bereits der Generalisierung und damit auch der Verdrängung unterworfen sein können. So sind z.B. Gebäude in der nahen Umgebung von Fernverkehrsstraßen nicht für die Georeferenzierung geeignet, vgl. Bild 6.



Bild 6 – Orthobild aus IRS-1C NIR, aufgenommen am 24.4.1997, überlagert von der Grundriß- und Schriftfolie der TK50 L5916 (Ausschnitt).

Bei der Georeferenzierung auf der Grundlage des ATKIS Basis-DLM, vgl. Abschnitt 4.2, konnten Generalisierungsprobleme in diesem Ausmaß nicht mehr beobachtet werden. Für wesentliche lineare Objekte, also für die linienförmig zu modellierenden Straßen, Bahnstrecken und Gewässer, vgl. [AdV 1989], soll vom Basis-DLM grundsätzlich eine Modellgenauigkeit von $\pm 3m$ eingehalten werden. Das ATKIS Basis-DLM erfüllt allerdings z.Zt. noch nicht in allen Bundesländern diese Qualitätsansprüche bzw. liegt auch noch nicht bundesweit flächendeckend vor.

Für die Referenzierung von fünf Szenen des Testgebietes *Frankfurt am Main West*, also IRS-1C-Aufzeichnungen aus März, April und Oktober 1997 sowie LANDSAT TM-Daten von Juli und August 1997 erwies sich eine halbautomatische Strategie als erfolgreich. Nach der Beseitigung der oben beschriebenen Farbverschiebungen pro Szene wurden Paßpunkte im ATKIS Basis-DLM und Verknüpfungspunkte in einem Masterbild manuell ausgewählt, die Bildzuordnung der Punkte in allen beteiligten Bildern erfolgte in Echtzeit über einen Korrelationsansatz konnte sofort interaktiv kontrolliert werden, vgl. Bild 7. Die Georeferenzierung erfolgte als Orthoprojektion auf der Basis des DGMs des HLVA. Während für die Auswertung einzelner TM-Szenen aufgrund der TM-Sensorcharakteristik eine Nächst-Nachbar-Interpolation sinnvoll ist, gilt dies für die IRS-1C-Bilder im Hinblick auf ihre spätere Verarbeitung nicht: Die einzelnen Pixel bilden je nach Kanal nicht exakt denselben Objektpunkt ab. Für die multitemporale Auswertung sollte entsprechend die bikubische Interpolation am Boden gewählt werden, andernfalls erhöhen sich die Fehler durch die jeweiligen geometrischen Verschiebebeträge. Als Konsequenz verliert das einzelne TM-Pixel im Rahmen der multitemporalen Auswertung möglicherweise etwas von seiner Aussagekraft, die es in der Einzelbildauswertung besäße.



Bild 7 – Halbautomatische Paß- und Verknüpfungspunktmessung mit OrthoEngine SE der Firma PCI (Screenshot).

Die vorgestellte Strategie zur Georeferenzierung über Orthoprojektion läßt sich weiter automatisieren, indem die linienhaften Informationen aus dem ATKIS Basis-DLM anhand ihrer Attribute gezielt ausgewählt werden und entsprechende Korrespondenzen in den beteiligten Bildern gesucht werden, vgl. z.B. [*Liedtke et al.* 1997]. Die gezielte, manuelle Auswahl von Verknüpfungspunkten war entscheidend für den Erfolg, da die Bilddaten die Landschaft je nach Aufnahmezeitpunkt stark unterschiedlich abbilden – grundsätzlich eine wichtige Ausgangsbasis für den multitemporalen Klassifizierungsansatz. Die Kriterien der Punktauswahl sollten sich auch in einer Wissensbasis formalisieren lassen und damit einen insgesamt weitgehend vollautomatischen Ablauf der hochgenauen Georeferenzierung gewährleisten.

Bereits bei der Bestimmung der Verschiebungsbeträge pro Szene kam die mit Projektmitteln finanzierte Programmentwicklung *SIR* (= subpixel image registration) der Firma *EFTAS* zum Referenzieren von digitalen Messbildern auf ein Bezugsbild durch flächenbasierte Bildzuordnung zum Einsatz. Das Programm bestimmt ein Raster von Korrespondenzpunkten zwischen zwei digitalen Messbildern durch Verwendung eines grauwertbasierten Zuordnungsverfahrens. Das Korrespondenzraster ist als regelmäßiges, auf das Referenzbild bezogenes Punktgitter aufgebaut, das in seiner Lage, Dichte und Ausdehnung beliebig vorgegeben werden kann. Mit Hilfe der Bildzuordnung wird für jeden Gitterpunkt ein korrespondierender Partner im zu referenzierenden Bild gefunden. An die Bestimmung des Gitters schließt sich die Umbildung des zu referenzierenden Bildes mit Hilfe des Korrespondenzrasters auf die Geometrie des Referenzbildes an. Eventuell vorhandene weitere Spektralkanäle lassen sich in einem Zug mit umbilden, vgl. [*Boochs* 2000].

Mit SIR stand grundsätzlich eine alternative Strategie zur gegenseitigen Georeferenzierung offen: Vorab wird nur ein Orthobildkanal über manuell gemessene Paßpunkte generiert, alle anderen Kanäle werden allein über Bildzuordnung in die Orthobildgeometrie überführt. Auch die geometrischen Ursachen der Farbverschiebung könnten dann in diesem einem Schritt beseitigt werden. In der Praxis hat sich diese Vorgehensweise für die IRS-1C-Bilder noch nicht voll bewährt, im Gegensatz zur oben genannten Vorgehensweise über die Orthoprojektion für alle Bilder traten häufig lokale geometrische Fehlverschiebungen auf, verursacht durch die je nach Jahreszeit stark unterschiedlichen Bildinhalte. Ferner verzichtet SIR – im Gegensatz zur Orthoprojektion – auf die wertvolle Zusatzinformation des vorliegenden DGMs. Auch werden die Verknüpfungspunktpositionen nicht entsprechend der lokalen Grauwertinformationen festgelegt, sondern als regelmäßiges Raster vorgegeben. Trotzdem ist die flächenhafte Bildzuordnung in einigen Fällen unverzichtbar, wenn nämlich z.B. die Sensorgeomtrie nicht adäquat wiederhergestellt werden kann. Für die bereits vorprozessiert ausgelieferten LANDSAT TM-Bilder traf dies leider zu, auch wenn die Fehlerursachen und Korrekturmöglichkeiten seit längerem grundsätzlich bekannt sind, vgl. z.B. [Ehrhardt 1990]. Hier konnte mit SIR eine signifikante Verbesserung des Gesamtzuordnungsergebnisses erzielt werden. Insgesamt gesehen wurden für die TM-Bilder mit der zweistufigen Vorgehensweise – also zunächst die Orthoprojektion auf der Basis des vorliegenden DGMs, abschließend die Nachkorrektur mit SIR - die besten Ergebnissen erzielt.

2.2 Atmosphären- und topographiebedingte Grauwertkorrekturen

Die radiometrische Rektifizierung optischer Bilddaten hat die Approximation situationsunabhängiger, normierter Oberflächenreflektionswerte zum Ziel. Zahlreiche Effekte wie wechselnder Sonnenstand, Geländeunebenheiten, richtungsabhängige Reflektion oder Emission der Geländeoberfläche, Absorption durch atmosphärische Gase, molekulare Diffusion, Diffusion durch Aerosole und diverse Sensorcharakteristika verlangen nach geeigneten Korrekturen [*Kraus* 1990].

Mehrere Herangehensweisen sind zu unterscheiden. Die einfachste besteht in der wissentlichen Tolerierung der bestehenden radiometrischen Verzerrungen: [*Mathieu-Marni et al.* 1997] zeigen auf, daß eine mangelnde radiometrische Korrektur zwar die multispektrale Klassifizierung erschweren kann – gegenüber radiometrisch korrigierten Bilddaten wird insbesondere durch geländeformabhängige Effekte eine größere Anzahl spektral homogener Klassen erkannt. Durch geeignetes Zusammenfassen dieser Klassen läßt sich aber trotzdem je ein vergleichbares Gesamtergebnis erzielen. Dies wird auch durch die am BKG vorliegenden Erfahrungen bestätigt. Je größer aber die zu bearbeitenden Bildflächen, je unterschiedlicher die Bodenbedeckungen in den Hanglagen, desto schwieriger wird es, die spektrale Trennbarkeit der gesuchten Bodenbedeckungsarten sicherzustellen. Bei der multitemporalen Klassifizierung hat man es zusätzlich mit unterschiedlichsten Sonneneinstrahlrichtungen zu tun, vgl. Tab. 2, so daß die radiometrische Rektifizierung an Gewicht gewinnt.

Durch die Differenz- und Ratiobildung einzelner Kanäle eines Bildes kann man einige atmosphärische Verzerrungen nahezu eliminieren. Insbesondere der Quotient zweier Differenzen liefert unter bestimmten Voraussetzungen Grauwerte, welche unabhängig von Blickrichtung und Geländeformen sind [*Kraus* 1990]. Nachteilig bei dieser Vorgehensweise ist aber, daß bei den entsprechenden Rechenoperationen der ursprüngliche Informationsgehalt der vier beteiligten Kanäle bei weitem nicht beibehalten wird. Im

Sensor:	Aufnahmedatum:	Sonnenazimuth:	Sonnenhöhe:
IRS-1C	2.3.97	162.65 °	31.62 °
IRS-1C	24.4.97	161.88 °	51.96 °
TM	12.8.97	140.89 °	49.12 °
TM	20.9.97	151.80 °	37.25 °
IRS-1C	28.10.97	171.63 °	26.60 °

Tabelle 2 - Sonnenstände für die Terrainkorrektur der Bilddaten

Rahmen des Projektes *UTOMA* wurden daher atmosphären- und topographiebedingte Grauwertkorrekturen auf der Basis eines deterministischen Ansatzes vorgenommen [*Richter* 1998]. Neben der jeweiligen Sonneneinstrahlrichtung, dem Aufnahmeort, dem Digitalen Höhenmodell und den Bilddaten selbst gehen die jeweiligen Wetterbedingungen über eine Datenbank atmosphärischer Korrekturfunktionen ein. Auf diesem Weg werden absolute Reflektionswerte angestrebt.

Die Berechnung absoluter Reflektionswerte darf kritisch betrachtet werden, da die lokalen Reflektionseigenschaften kaum bekannt sind und von daher nur ungenügend einbezogen werden können. Weiterhin ist die Berechnung absoluter Reflektionswerte mit Blick auf die später eingesetzten Erkennungsmethoden auch nicht unbedingt erforderlich, da die relative globale Anpassung der Bildgrauwerte zweier Bilder auch über empirische Verfahren in guter Qualität durchgeführt werden kann [*Kraus* 1994]. Die relativ aufwendige Approximation der absoluten Reflektionswerte ist also nicht unbedingt gerechtfertigt, wesentlich ist jedoch die Elimination der geländeformabhängigen Störeinflüsse. Für zukünftige Arbeiten wurde daher als Ergänzung zu der empirischen relativen Anpassung der Bilder nach einem geeigneten Weg zur empirischen Korrektur der topographiebedingten Einflüsse gesucht. Diese sind in erster Näherung vom Raumwinkel ϕ zwischen der lokalen Oberflächennormalen und der Einstrahlrichtung des Sonnenlichts abhängig, so daß für den korrigierten Grauwert G_1 folgende Abschätzung gilt:

$$G_1 = K_1(\phi) = \frac{G_0}{\cos\phi} \tag{1}$$

Bekanntermaßen sinken die Reflektionswerte für $\phi > 90^{\circ}$ nicht auf Null ab, so daß die etwas erweiterte Form nach [*Jansa* 1998] eine entscheidende Verbesserung mit sich bringt:

$$G_2 = K_2(\phi) = \frac{G_0}{\ell + (1 - \ell)\cos^k \phi} \quad \text{für } \phi \le 90^\circ, \qquad G_2 = \tilde{K}_2(\phi) = \frac{G_0}{\ell} \quad \text{für } \phi > 90^\circ$$
(2)

Die exemplarischen Berechnungen für TM-Bilder von [*Jansa* 1998] weisen nach, daß sich k selten signifikant vom Wert Eins unterscheidet. Unter der vereinfachten Annahme von k = 1 wurden hier exemplarisch Korrekturwerte für die IRS-1C-Bilder generiert, wobei je nach Kanal Werte im Bereich $\ell = 0.7$ bis $\ell = 0.9$ resultierten, vgl. das Beispiel in Bild 8. Dabei muß sich die Festlegung von ℓ an homogenen Bodenbedeckungen bei variierender Oberflächenausrichtung orientieren. Im Testgebiet trifft diese Voraussetzung nahezu ausschließlich für Waldflächen zu. Obwohl es in diesen Bereichen zu der gewünschten Homogenisierung der betroffenen Grauwerte kommt, müssen die guten Ergebnisse nicht unbedingt auf weitere Beispiele übertragbar sein. Vielversprechend wäre, bei einer großflächigeren Untersuchung ATKIS Basis-DLM-Daten zum Auffinden der homogenen Bodenbedeckungen zu integrieren.

Zahlreiche Effekte des deterministischen Modells von [*Richter* 1998], wie beispielsweise topographieabhängiges Streulicht, werden bei der beschriebenen, vereinfachten Vorgehensweise nicht berücksichtigt. Trotzdem erscheint dieser pragmatische Weg für viele Fälle als hinreichend, denn zahlreiche Problemfälle, wie beispielsweise die kleinräumige direkte Abschattung, können auch mit der deterministischen Methode z.Zt. nicht korrigiert werden. Für großflächige Arbeiten können die hier durchgeführten Untersuchungen zur atmosphärischen Korrektur noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden.



Bild 8 – Radiometrische Terrainkorrektur. (a): Reliefdarstellung des Testgebietes (Taunus im Nordwesten, Maintal im Südosten). (b): Beispiel für die Korrekturfunktion (2) für IRS-1C, 24.4.97.

2.3 Fusion von Bilddaten unterschiedlicher geometrischer Auflösung

Die Fusion von hochaufgelösten panchromatischen und niederaufgelösten multispektralen Bildern zu einem hochaufgelösten Multispektralbild ist in erster Linie für das Auge des menschlichen Betrachters gedacht. Die resultierenden Bilder liefern den Überblick über die vorliegende Bildinformation "auf einen Blick", sie werden in erster Linie zu Zwecken der Interpretation und Verifizierung eingesetzt. Im Rahmen des Projektes *UTOMA* war die Zusammenführung der panchromatischen mit den multispektralen IRS-1C-Bildern erforderlich; die Bodenpixelgrößen von $6 \times 6m^2$ gegenüber $24 \times 24m^2$ unterscheiden sich hinsichtlich der Bildinhalte erheblich.

Die Fusion wurde über den IHS-Farbraum (I=Intensity, H=Hue, S=Saturation) vollzogen. Dieser Weg zur Fusion von niedrig aufgelösten Multispektralbildern mit hochaufgelösten panchromatischen Bildern wird in ähnlicher Form beispielsweise von [*Pfeiffer* 1990] beschritten. Dort werden LANDSAT TMund SPOT-Bilder miteinander kombiniert. Einen Überblick zu weiteren Sensorkombinationen und Verfahren hat [*Pohl* 1996] zusammengestellt; ihre Diskussion stellt die Vorzüge des hier gewählten Verfahrens heraus. Grundsätzlich werden die multispektralen Bilddaten zunächst in die höhere Auflösung der panchromatischen Bilddaten überführt und dann in den IHS-Farbraum transformiert. Dort wird der I=Intensitätskanal durch das panchromatische Bild ersetzt, anschließend erfolgt die inverse Transformation zurück in den ursprünglichen Farbraum. Es wurde die IHS-Transformation nach [*Foley et al.* 1990, S. 592] ausgewählt. Diese Variante erlaubt auf Grund ihrer Symmetrieeigenschaften eine Vertauschung der Ein- und Ausgangskanäle. Sie orientiert sich also nicht an den jeweiligen Frequenzeigen-



(a): $[R,G,B] = [NIR,R,G], 120 \times 160$ Pixel



(b): [R,G,B]=[NIR",R",G"], 480 × 640 Pixel



(c): [R,G,B]=[NIR',R',G'], 480 × 640 Pixel



(d): [R,G,B]=[R',G',B'], 480 × 640 Pixel

Bild 9 – Fusion von multispektralen und panchromatischen IRS-1C-Bildern, Beispiel *Raunheim* (Orthobildausschnitt). (a): IRS-1C LISS kontrastverstärkt. (b): Pandominante Bildfusion. (c): Farberhaltende Bildfusion. (d): Simulierte Echtfarbenkomposite.



(a): $[R,G,B] = [NIR,R,G], 120 \times 160$ Pixel



(c): [R,G,B]=[NIR',R',G'], 480 × 640 Pixel



(b): [R,G,B]=[NIR",R",G"], 480×640 Pixel



(d): [R,G,B]=[R',G',B'], 480 × 640 Pixel

Bild 10 – Fusion von multispektralen und panchromatischen IRS-1C-Bildern, Beispiel *Nordwestkreuz Frankfurt* (Orthobildausschnitt). (a): IRS-1C LISS kontrastverstärkt. (b): Pandominante Bildfusion. (c): Farberhaltende Bildfusion. (d): Simulierte Echtfarbenkomposite.

schaften und ist somit auch für die hier vorzunehmenden Transformationen $[NIR, R, G] \rightarrow [I, H, S]$ und $[I_{pan}, H, S] \rightarrow [NIR', R', G']$ geeignet. Beispiele finden sich in den Bildern 9 und 10.

Einen aktuellen Vergleich erfolgversprechender Ansätze zur Multisensorfusion und ihrer Ergebnisse geben [*Zhang* und *Albertz* 1998], allerdings wiederum nur für Kombinationen von LANDSAT TM und SPOT. Untersucht werden der angesprochene Weg über die Farbtransformation sowie drei statistisch motivierte Verfahren, die grundsätzlich auf Analysen der Grauwertverteilungen aufbauen. Entscheidende Ergebnisunterschiede werden von den Verfassern in einer entweder besseren spektralen Wiedergabe, gemeint ist eine bestmögliche Farberhaltung, oder in einer besseren räumlichen Wiedergabe mit bestmöglicher Detailerkennbarkeit gesehen.

Diese Ergebnisqualitäten lassen sich durch den gezielten Einsatz von statistischer Analyse und entsprechenden LUT-Operationen im Verlauf des Farbtransformationsverfahrens gezielt steuern: Farbtreue resultiert aus bestmöglicher spektraler Ähnlichkeit zwischen dem auszutauschenden Intensitätskanal und dem neu einzusetzenden panchromatischen Bild, vgl. Bild 9(c) und 10(c), welche hier über den Weg einer einfachen Histogrammanalyse approximiert wird. Mit etwas mehr Aufwand wäre sicherlich eine noch hochwertigere Farbangleichung an die ursprünglichen multispektralen Eingangsdaten erreichbar. Die Detailerkennbarkeit dagegen profitiert aus der Integration eines gegenüber dem Eingangsintensitätsbild kontrastverstärkten panchromatischen Bildes, vgl. Bild 9(b) und 10(b). Hier wird zugunsten der Hervorhebung von Detailinformationen ein eher farbarmes Ergebnis in Kauf genommen.

Die fusionierten Bilddaten stellen nicht nur eine unverzichtbare Basis für das manuell-interaktive Arbeiten dar, sondern sie dienen auch einer Qualitätskontrolle der durchgeführten geometrischen Transformationen. In diesem Zusammenhang stellt der Übergang auf das vertraute Bild einer Naturfarbdarstellung vielfach eine Arbeitserleichterung dar. Da von IRS-1C kein Blaukanal zur Verfügung gestellt wird, ist dieser zu simulieren. Hier wurde ein Ansatz gewählt, der von der stark vereinfachenden Annahme spektraler Extrapolierbarkeit ausgeht:

B = a₁ G + a₂ R + a₃ NIR mit
$$\sum_{i=1}^{3} a_i = 1$$
; hier a₁ = 2.5, a₂ = -1.0, a₃ = -0.5^{*} (3)

Das endgültige Ergebnis der Naturfarbkomposite ist natürlich wieder von einer abschließenden LUT-Operation bezüglich des simulierten Blauanteils abhängig. Je nach Zielvorstellung erhält man beispielsweise Bild 11. Der resultierende Blaukanal kann als hochaufgelöster Pseudofarbkanal zu den drei aus der oben beschriebenen Fusion resultierenden Farbkanälen hinzugefügt werden, vgl. die Ausschnitte in Bild 9(d) und 10(d). Der Vorteil der Vorgehensweise nach Formel (3) liegt darin, daß diese einfache Operation bei Bedarf in Echtzeit am Bildverarbeitungssystem durchgeführt werden kann. Liegen ergänzend zu den LISS-Daten auch panchromatische Bilddaten vor, so läßt sich der Blaukanal auch mittels der Grundbeziehung rekonstruieren, daß sich das panchromatische Bild als gewichtetes Mittel der drei Farbkanäle Rot, Grün und Blau approximieren läßt. Auf diese Weise kann sicherlich ein qualitativ noch hochwertigeres Ergebnis erzielt werden, dies wurde im Rahmen des Projektes *UTOMA* aber nicht weiter verfolgt.

^{*}Die angegebenen Koeffizienten haben exemplarischen Charakter, da sie natürlich von den vorangegangenen bzw. nachfolgenden Helligkeits- oder Kontraständerungen (hier z.B. im Rahmen der atmospärischen Korrektur) abhängig sind.



Bild 11 – Orthobild als simulierte Echtfarbenkomposite [R,G,B], Bezugssystem ist Gauß-Krüger. Der Blaukanal [B] wurde aus den LISS-Kanälen [NIR,R,G] extrapoliert. Alle Kanäle sind kontrastverstärkt.

3 Geometrische Auswertung von Bildern flugzeuggetragener Sensorzeilenkameras

Im Rahmen der Bereitstellung von MOMS-Simulationsdaten zur Unterstützung der deutschen Nutzerbereiche bei der Realisierung ihrer Pilotprojekte im Rahmen des MOMS-2P-Weltraumprogramms wurde durch die DARA (DLR-BO) ein Aufnahmeprogramm mit der Flugzeugversion DPA (= Digital Photogrammetric Assembly) des MOMS-Weltraumsensors initiert, vgl. [FEZ 1997]. Diese DPA-Befliegung gilt als erster Routineeinsatz einer digitalen Luftbildkamera für Multispektral- und Stereoaufnahmen – ein wichtiger Meilenstein für die Weiterentwicklung des auf Otto Hofmann zurückgehenden Konzepts der digitalen Dreizeilenkamera, vgl. [Hofmann 1986], [Hofmann et al. 1993]. Die Befliegungskampagne für 19 Nutzerbereiche wurde im Zeitraum 09.-12.07.1997 auf insgesamt 21 Teilflächen der MOMS-2P-Testgebiete in Deutschland durchgeführt. Von diesen ca. 36 qkm großen Teilflächen wurden gleichzeitig digitale Stereo- und Multispektraldaten aufgezeichnet, von denen meist jedoch nur die Multispektraldaten vorprozessiert und den Nutzern zur Verfügung gestellt wurden. Anwendungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Land- und Forstwirtschaft, Umwelterkundung und Kartographie. An der Realisierung des Vorhabens waren neben den angesprochenen Nutzerbereichen und dem BWB/AMilGeo, das die DPA-Kamera kostenlos zur Verfügung stellte, das FEZ Fernerkundungszentrum Potsdam (Leitung des Vorhabens) sowie die Firmen GEOSCAN GmbH Hildesheim und DASA LFK GmbH Ottobrunn beteiligt. Die Aerotriangulationen erfolgten im 2. Halbjahr 1997 am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Seitens des BKG wurden mit DGPS gemessene Paßpunktkoordinaten beigesteuert, vgl. die Lageskizze zu den beiden Flugstreifen Frankfurt-West. Mit der mittleren Flughöhe von 3000m über Grund wird hier eine durchschnittliche Pixelgröße am Boden von $\approx 37.5 cm$ bei einer nutzbaren Streifenbreite von etwas mehr als 4km erzielt.



Bild 12 – Bildflugübersicht der beiden DPA-Flugstreifen über dem Testgebiet *Frankfurt-West*, dargestellt auf einem Ausschnitt der TK50 L9516 des LVA Hessen. Die bei der Aerotriangulation verwendeten Paßpunkte sind in rot dargestellt.

Im Hinblick auf die derzeitigen und zukünftigen Aufgaben des BKG sind sowohl Satelliten als auch Flugzeuge wichtige Sensorplattformen für die direkte digitale Bilddatengewinnung aus der Luft. Diese Bilddaten wiederum sind als wichtiges Basiselement zum Aufbau von Geodatenbanken und digitalen

kartographischen Produkten von großem Interesse. Dabei erlauben flugzeuggetragene Systeme die flexiblere Aufnahmeplanung. Günstige Randbedingungen im Hinblick auf eine vollständige Oberflächenerfassung und einen möglichst weitgehend automatisierten Auswerteprozeß können so leichter erreicht werden, z.B. durch die Wahl des konkreten Befliegungszeitpunkts in Abhängigkeit von Bewölkung, Sonnenstand, Vegetationsstand etc. Dieser Unterschied kann im Vergleich zu satellitengetragenen Systemen einen erheblichen Kostenfaktor für die Gesamtrechnung ausmachen und ist daher neben den reinen Datenbeschaffungskosten zu berücksichtigen. Für die direkte digitale Bildaufnahme spricht insbesondere, daß sich gegenüber dem derzeitig üblichen Procedere mit analoger Aufnahme und anschließender Digitalisierung eine erheblich verbesserte radiometrische Qualität erzielen läßt. Dieser Qualitätssprung wird als unabdingbare Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz automatisierter Erkennungsverfahren gewertet. Auflösungsverhältnisse ähnlich dem klassischen Luftbild und die Möglichkeit zur Farbbild- bzw. Multispektralaufzeichung lassen sich zur Zeit wohl nur mit der Mehrzeilentechnik operationell erreichen, vgl. z.B. [*Wewel et al.* 1998] und [*Sandau et al.* 1999]. Seit Herbst 1999 liegt aber auch eine erste kommerzielle Konzeption für ein auf der Basis mehrerer flächenhafter CCD-Elemente aufgebautes, digitales Luftbildkamerasystem vor [*Hinz* 1999].

Vor diesem Hintergrund konzentriert sich dieser Bericht im weiteren auf die geometrische Auswertung von DPA-Daten bis hin zur automatisierten Ableitung digitaler Oberflächenmodelle und Orthobilder. Weiterhin wurde eine Verarbeitungskette hin zur interaktiven Stereoauswertung der DPA-Daten an kommerziell verfügbaren, digitalen Stereoarbeitsplätzen konzipiert und realisiert. Auch diese wird kurz vorgestellt, die erzielten Ergebnisse sind in [*Schlüter* 1999] publiziert. Da die angestrebte geometrische Genauigkeit in der Größenordnung eines Bildpixels nicht erreicht wurde, wird ergänzend auf einige DPA-spezifische Probleme und Lösungsvorschläge eingegangen, mit denen wir bei dem vorliegenden Bildflug konfrontiert waren.

3.1 Sensordesign der DPA (= *Digital Photogrammetric Assembly*)

Da im folgenden teilweise auf DPA-spezifische Charakteristika verwiesen werden muß, soll hier kurz das grundsätzliche Sensordesign rekapituliert werden. Ausführlichere Informationen zur Kamerahardware, die neben den optoelektronischen Komponenten auch die Inertiale Meßeinheit (IME), die Bandmaschine, die Stabilisierungsplattform (welche bei der Befliegung *Frankfurt-West* allerdings abgeschaltet war), und die DGPS-Ausrüstung (wesentlich auch für das Zeitmanagement) umfaßt, finden sich in den Abschlußberichten [*Fritsch* 1997] und [*Angermaier et al.* 1998]. Für eine aktuelle Einführung in die Entwicklungsarbeiten zur Dreizeilenscannertechnik sei auf [*Albertz* 1998] verwiesen, einen Überblick über alternative Sensorentwicklungen liefert beispielsweise [*Kornus* 1999].

Ähnlich wie MOMS-02 besitzt die DPA-Kamera vier multispektrale und drei panchromatische Sensorzeilen zur Aufzeichnung der stereoskopisch nutzbaren Bilddaten. Aus technischen Gründen bestehen die drei panchromatisch aufzeichnenden Zeilen jedoch physikalisch aus jeweils zwei Sensorbausteinen und werden über zwei separate Objektive optisch zusammengesetzt, siehe die Bilder 13(a) und (b). Die Objektivparameter sind so gewählt, daß die Streifenbreite der panchromatischen Bildaufzeichnungen insgesamt der der multispektralen Bildaufzeichnung entspricht, vgl. die technischen Daten der optischen Module in den Tab. 3 und 4.

Panchromatische und multispektrale Bilddaten könnten grundsätzlich entsprechend der in Kap. 2.3 diskutierten Verfahren fusioniert werden. Im Rahmen des Projektes *UTOMA* beschränkte sich die Auswertung jedoch auf den geometrischen Aspekt, konsequenterweise wurden die aufgezeichneten Multispektraldaten des Testgebietes *Frankfurt-West* (s.u.) von der DASA bzw. dem IfP Stuttgart nicht prozessiert.



Bild 13 – Die digitale Dreizeilenkamera DPA. (a): Ansicht der vier Objektive für die Multispektralaufzeichnungen sowie der beiden Objektive für je einen vor-, nadir- und rückblickenden Sensorzeilenbaustein. (b): Anordnung der Sensorzeilen in Bezug auf die Einzelobjektive.

6 CCD–Lineararrays (2 pro Zeile)	FAIRCHILD CCD 191
Pixelgröße 10 μ m $*$ 10 μ m	Bildformat: 12 cm
Nadirkanal	12000 Pixel/Zeile
Vorwärtsblick	12000 Pixel/Zeile
Rückwärtsblick	12000 Pixel/Zeile
Stereowinkel	25°
Brennweite (Kammerkonstante)	80 mm
radiometrische Auflösung	12 bit $ ightarrow$ 8 bit
geometrische Auflösung	0.25 m (aus 2.0 km Flughöhe)

Tabelle 3 – Designparameter des DPA-Stereomoduls aus [Fritsch 1997].

4 CCD–Lineararrays (1 pro Zeile)	FAIRCHILD CCD 191
Pixelgröße 10 μ m $*$ 10 μ m	Bildformat: 6 cm
spektraler Bandpaß	440–525 nm
	520–600 nm
	610–685 nm
	770–890 nm
Brennweite (Kammerkonstante)	40 mm
radiometrische Auflösung	12 bit \rightarrow 8 bit
geometrische Auflösung	0.5 m (aus 2.0 km Flughöhe)

Tabelle 4 - Designparameter des DPA-Multispektralmoduls aus [Fritsch 1997].

3.2 Geometrische Entzerrung von Zeilenscannerbildern

In der klassischen photogrammetrischen Denkweise wird streng unterschieden zwischen der Wiederherstellung der inneren und äußeren Orientierungen der Bilddaten und der sich üblicherweise in einer zweiten Auswertephase anschließenden Rekonstruktion der Objektraumgeometrie. Die moderne digitale Photogrammetrie scheint diese strikte Trennung teilweise aufzuheben, denn im Rahmen der automatisierten Aerotriangulation werden oft derart viele Objektpunkte bestimmt, daß mit der resultierenden Wolke der Verknüpfungspunkte im Objektraum bereits eine grobe Oberflächenbeschreibung vorliegt, welche in manchen Fällen z.B. als Basis für eine – wenn auch approximative – Orthobildberechnung ausreichen mag. Für anpruchsvollere Aufgaben jedoch, also beispielsweise der Berechnung qualitativ hochwertiger Orthobilder, der automatischen Oberflächenrekonstruktion in schwierigem oder sogar innerstädtischem Terrain und natürlich für die interaktive 3D-Vektordatenerfassung an der digitalen Stereostation muß die zweistufige Vorgehensweise auch heute beibehalten werden.

In der Orientierungsphase der Dreizeilenscannerbilder wird pro Aufnahmezeitpunkt eines Bildzeilentripels je ein Satz Parameter der äußeren Orientierung (Projektionszentrum und drei Drehwinkel) geschätzt, vgl. die in Bild 14 schematisiert wiedergegebene Aufnahmesituation. Als Ausgangsinformationen stehen dafür in der Regel Winkelgeschwindigkeiten und -beschleunigungen eines Intertialmeßsystems, Bildkoordinaten von (halb-)automatisch zugeordneten Verknüpfungspunkten und manuell gemessenen Paßpunkten, DGPS-Beobachtungen bzw. -Koordinaten sowie Kamerakalibrierungsdaten zur Verfügung. Diese Daten weisen einen durchaus wünschenswerten Grad an Redundanz auf: Denn obwohl in der Literatur Lösungsvorschläge sowohl ohne die Nutzung von DGPS als auch ohne die Einbeziehung von Bildkoordinaten propagiert werden, vgl. [*Haala et al.* 1998], liefert doch erst die komplette Bündelausgleichung unter Einbeziehung aller Ausgangsinformationen die Möglichkeiten zur durchgreifenden Selbstkontrolle auf grobe Fehler, zur ergänzenden Selbstkalibrierung wesentlicher Kameraparameter, zur vollständigen Automatisierung der Verknüpfungspunktzuordnung und letztendlich zum Erreichen und Verifizieren von geometrischen Genauigkeiten in der Größenordnung eines Pixelelementes oder darunter.



Bild 14 - Geometrische Rekonstruktion mit dem optischen Dreizeilenscanner, aus [Angermaier et al. 1998].

Bereits für die Bildzuordnungsaufgaben im Rahmen der Orientierungsphase stellt sich die Frage, ob eine lokale Entzerrung der Rohbilddaten anhand der IME-Meßdaten erforderlich ist oder ob beispielsweise die direkte Berechnung von Interestpunkten aus den Rohbildern ausreichend ist. Für zahlreiche Folgeaufgaben jedoch ist die Entzerrung der Rohbilddaten anhand der vorliegenden Orientierungs- und Kalibrierungsdaten unabdingbar, z.B. um eine aufgeschlüsselte Fehlerbudgetierung für die Ergebnisse aus der Orientierungsbestimmung zu ermöglichen oder etwa die lokale Pixelauflösung im Objektraum zu visualisieren. Formuliert man die Entzerrungsaufgabe über die direkte Projektion der einzelnen Bildpixel von ihren (in der Orientierungsphase wiederhergestellten) Positionen im Bildraum in den Objektraum, so lassen sich mit dem gefundenen Ansatz auch weitere Aufgaben wie die Berechnung von Epipolarbildern oder die Orthobildgenerierung lösen, siehe Kap. 3.3. Die Epipolarbildberechnung ist nicht nur eine wichtige Vorstufe für die interaktive Stereobetrachtung, vgl. [*Gülch* 1994], sondern sie stellt auch die Schnittstelle zu bestehenden Softwareprodukten zur automatischen DGM-Rekonstruktion dar, sofern diese speziell im Hinblick auf satellitengetragene Systeme wie beispielsweise SPOT oder MOMS konzipiert sind. Das entsprechende Werkzeug zur Entzerrung soll nun etwas eingehender beschrieben werden. Grundsätzlich wird jede einzelne Pixelposition im Bildraum entsprechend ihrer Kalibrierungsdaten korrigiert, anschließend über die Elemente der äußeren Orientierung in den Objektraum projiziert und dort mit einer geometrischen Fläche (z.B. einer Horizontalebene oder einem DGM) zum Schnitt gebracht. Während die Projektion eines Bildpunktes in den Objektraum direkt berechenbar ist, kann die Rückprojektion eines Punktes vom Objektraum in den Bildraum nur iterativ durchgeführt werden und ist unter Umständen mehrdeutig. Ein Resampling auf ein regelmäßiges Stützpunktraster im Objektraum liefert wieder eine Rasterbilddarstellung, vgl. die Bilder 15 und 16.



Bild 15 – Beispiel für die geometrische Entzerrung bei mittleren Drehwinkeländerungen. (a): Sensorzeilen und Pixelpositionen eines Bildausschnitts nach der Projektion in den Objektraum. (b): Delaunay-Triangulation der Pixelpositionen. (c): Resampling auf ein regelmäßiges Raster im Objektraum.



Bild 16 – Beispiel für die geometrische Entzerrung bei starken Drehwinkeländerungen. (a): Sensorzeilen und Pixelpositionen eines Bildausschnitts nach der Projektion in den Objektraum. (b): Delaunay-Triangulation der Pixelpositionen. (c): Resampling auf ein regelmäßiges Raster im Objektraum.

Um den Kernspeicherbedarf für die Entzerrungsaufgabe geeignet begrenzen zu können, erfolgt eine fensterweise Bearbeitung des jeweiligen kompletten Bildstreifens. Die Fenstergrenzen werden im Objektraum definiert, diese Strukturierung ermöglicht eine lückenlose Bearbeitung unter Ausnutzung aller Pixelinformationen. Zunächst werden die Fenstereckpunkte im Objektraum in den Bildraum projiziert, um so den Kreis aller möglicherweisen am Objektraumfenster beteiligten Bildpixel eingrenzen zu können. Anschließend werden alle Pixelkandidaten in den Objektraum projiziert und die geometrischen Oberflächenschnittpunkte ermittelt. Die resultierenden Punktpositionen im Objektraum sind unregelmäßig verteilt. Für das Resampling müssen die lokalen Punktnachbarschaften bekannt sein; die topologische Strukturierung erfolgt hier über eine *Delaunay*-Triangulation, vgl. [*Hoschek* und *Lasser* 1992], [*De Floriani et al.* 1998]. Über diese Vorgehensweise bleibt die Softwareimplementierung offen für unterschiedliche Grauwertinterpolationsansätze, hier wurde zunächst die lineare Interpolation sowie die Nächste-Nachbar-Interpolation integriert.

Die zunächst unregelmäßig im Objektraum verteilten Punktpositionen werden hier über eine *Delaunay*-Triangulation topologisch strukturiert – warum ist diese Vorgehensweise vorteilhaft? Bei kleinen bis mittleren Drehwinkeländerungen bleiben Nachbarschaftsbeziehungen der Pixel im Bildraum, also zwischen den einzelnen Aufnahmezeilen, auch nach der Projektion in den Objektraum gültig, vgl. Bild 15. Initialisiert man die Triangulation stets mit genau dieser Annahme, so ist der verbleibende Rechenaufwand bis zur endgültigen Triangulationslösung nicht mehr groß. Bei starken Drehwinkeländerungen wie in Bild 16 sind die erforderlichen Änderungen gegenüber der Initialtriangulation aber erheblich. Nun zahlt sich aus, daß bezüglich der Verteilung der einzelnen Punkte keinerlei Prämissen eingeführt wurden. Daher wird stets die optimale Lösung gefunden, selbst wenn sich beispielsweise die Abbilder einzelner Sensorzeilen im Objektraum schleifend kreuzen, vgl. Bild 16.

Ein Beispiel für die Entzerrung zeigt Bild 17(a) die in Höhe von *Unter-Liederbach* schnurgerade verlaufende Autobahn A66. Trotz der enormen Drehwinkeländerungen erhält man mit Bild 17(b) ein plausibles Ergebnis. Je nach den vorgegebenen Informationen spiegelt das Ergebnis des Entzerrungsvorgangs die entsprechende Qualität wider: Eine Entzerrung auf eine Horizontalebene im Objektraum, bei der zunächst vollständig auf die Einbeziehung von Verknüpfungs- und Paßpunktinformationen verzichtet wird und bei der auch die Driftfehler der Intertialmeßeinheit vorläufig außer Acht gelassen werden, kann sich in der Praxis als erste Kontrolle einer Befliegung anbieten. Damit wird zunächst lediglich das synchrone Zusammenspiel der IME mit den elektrooptischen Sensoren sichergestellt, eine grundsätzliche Voraussetzung für einen gelungen Bildflug. Finden dagegen die abschließenden Ergebnisse der Aerotriangulation und ein entsprechend genaues digitales Höhenmodell Eingang in die Entzerrung, so resultiert ein absolut im Objektraum gelagertes Orthobild. Ein Beispiel für die Entzerrung eines kompletten Flugstreifens zeigt Bild 18. Der Ortskundige erkennt Hofheim am Taunus im zentralen Bildbereich. Zu den Zeitpunkten $t_1 = 70$ s und $t_2 = 77$ s traten extrem starke Winkeländerungen auf, vgl. Bild 18(b). Im Randbereich des entzerrten Gesamtbildes lassen sich diese beiden Stellen gut wiedererkennen, Bild 18(c).



Bild 17 – Ausschnitte aus Bild 18. Plausibilitätskontrolle der Bild-, DGPS-, IME- und Zeitaufzeichnungen durch geometrische Vorentzerrung, hier bei starken lokalen Drehwinkeländerungen. (a): Rohbilddaten der Sensorzeilen 'A', Bildausschnitt 560×800 Pixel². (b): Geometrische Entzerrung auf eine Horizontalebene im Objektraum.




(c)

Bild 18 – Die geometrische Entzerrung am Beispiel des gesamten Flugstreifens 9A, *Frankfurt-West.* (a): Grauwertrohdaten, 12 000 \times 24 000 Pixel, (b): Drehwinkel pro Sensorbildzeile, (c): Geometrische Entzerrung.

Å N

3.3 Stereobetrachtung und Epipolarbildberechnung

Die geometrische Auswertung der DPA-Daten unterscheidet sich erheblich von der Behandlung satellitengestützt gewonnener Bilddaten. Als wesentlicher Unterschied ist bei den flugzeuggestützten DPA-Bilddaten stets mit mittel- und hochfrequenten Bewegungen des Trägersystems während der Aufnahme zu rechnen. Selbst für benachbarte Bildzeilen ist eine Interpolation der aus den IME-Beobachtungen und einer Bündelausgleichung resultierenden, bildzeilenweise vorliegenden Orientierungsdaten nicht zulässig. Ein Algorithmus zur automatischen Bildzuordnung sollte daher die zeilenweise vorliegenden Orientierungsdaten explizit berücksichtigen oder mit vorentzerrten Bildern arbeiten. Im Rahmen des Projektes UTOMA sollte der Weg über die Vorentzerrung eingeschlagen werden, denn das für die Auswertung vorgesehene Programmsystem ARCOS zur Stereobildkorrelation, vgl. [Boochs und Hartfiel 1989], seinerzeit am IfAG entwickelt, z.Zt. vom Projektpartner Prof. Boochs an der FH Mainz gepflegt, enthielt bereits zu Projektbeginn die Option zur Auswertung satellitengestützter Zeilenabtastergeometrien. Die entsprechende Vorverarbeitungskette wurde konzipiert und realisiert. Anhaltende Probleme durch ungewöhnlich große, stark schwankende Restparallaxen in der Größenordnung von größer als drei Pixelelemente machten weitergehende Analysen erforderlich. In diesem Zusammenhang wurde die Verarbeitungskette für den Übergang auf die digitale photogrammetrische Arbeitsstation HELAVA-DPW 770 erweitert, auf dieser Station standen nur Auswertemodi für perspektive Epipolarbilder zur Verfügung. In der Folge mußte die geometrische Auswertung des Flugstreifens 9 völlig verworfen werden, die Auswertung von Flugstreifen 8 war dagegen eingeschränkt möglich, vgl. das Rekonstruktionsergebnis in Bild 19. Hier wird zunächst die Verarbeitungskette zur Berechnung der Epipolarbilder vorgestellt. Diese eröffnet nicht nur einen kostengünstigen Weg zur Nutzung bestehender kommerzieller photogrammetrischer Auswertesysteme, sondern ermöglicht auch eine ergänzende interaktive Datenerfassung am stereoskopischen Arbeitsplatz. Auf die Ursachen für die Genauigkeitsprobleme mit den Orientierungsdaten wird abschließend gesondert eingegangen, vgl. Abschnitt 3.4. Das Verständnis dieser Fehlerquellen war essentiell, um die teilweise nicht optimalen Ergebnisse der automatischen Bildzuordnung richtig einschätzen und bewerten zu können. Denn gerade die systematisch verfälschten Orientierungsdaten setzen die Kern-



Bild 19 – Digitales Oberflächenmodell und überlagertes Orthobild der Gegend südlich von Kelkheim am Taunus. 3D-Visualisierung der aus den DPA-Daten, Flugstreifen 8, *Frankfurt-West* gerechneten Oberflächenrekonstruktion.

strahlbedingung lokal außer Kraft, deren Gültigkeit bei den verwendenten Softwarepaketen ARCOS (vgl. [*Boochs* und *Hartfiel* 1989]) und auch der HELAVA-DPW 770 eine wichtige Voraussetzung ist, vgl. Abschnitt 3.3.

Eine stereoskopische Betrachtung der digitalen Flugzeugscannerdaten ist ohne Vorentzerrung in der Regel nicht möglich, vgl. [*Brand et al.* 1997]. Das Problem des Übergangs auf zeilenweise Epipolarbilder wird hier, im Gegensatz zu strikt bildraumorientierten Verfahren wie beispielsweise bei [*Dörstel* und *Ohlhof* 1996], wieder mit Blick auf den Objektraum gelöst. Bedingt durch eine mehr oder weniger unregelmäßige Flugbahn lassen sich aus Dreizeilenscannerbildern – im Gegensatz zum analogen Luftbild – keine Epipolarbilder bei völliger Unkenntnis des Oberflächenverlaufs im Objektraum berechnen. Bild 20 zeigt den Grund: Bei Flugrichtung in X resultiert aus den Verschiebungen ΔY_O und ΔZ_O des Projektionszentrums zwischen der Aufzeichnung eines Bodenpunktes im Vor- und im Rückblick eine Restparallaxe Y_P nach der Projektion in den Objektraum. Die Größenordnung der lokalen Restparallaxen kann bereits durch die Vorgabe eines relativ groben, stark geglätteten Digitalen Oberflächenmodells (='glatte Approximation' in Bild 20) auf den Subpixelbereich reduziert werden. Die Genauigkeitsansprüche für das grobe DOM sind in der Regel so gering, daß die Objektrauminformation aus der Orientierungsphase oder das Ergebnis einer vollautomatisch durchgeführten digitalen Bildzuordnung auf einer höheren Bildpyramidenstufe (vierte bis achte) vollkommen ausreicht.



Bild 20 – Restparallaxen bei der Vorentzerrung in Abhängigkeit von der Flugbahn und dem vorgegebenen Digitalen Oberflächenmodell (DOM).

In den resultierenden zeilenweisen Epipolarbildern verbleiben nur die Höhendifferenzen des wahren Oberflächenverlaufs gegenüber der stark geglätteten DOM-Vorgabe als Parallaxeninformation. Die endgültige Auswertung kann dann beispielsweise interaktiv am Stereoschirm erfolgen. Der bei Versuchen zur interaktiven Gebäudeerfassung mit der HELAVA-DPW 770 erzielte visuelle Stereoeindruck steht – bei stimmigen Orientierungsdaten – dem eines Luftbildpaares in nichts nach, durch das äußerst geringe Grauwertrauschen sind auch starke Ausschnittsvergrößerungen noch bequem betrachtbar.

Weiterhin ermöglicht die nun vorliegende Epipolarbildgeometrie auch den Einsatz einer Reihe von kommerziellen Softwareprodukten für die automatische Oberflächenrekonstruktion, welche auf der Epipolargeometrie aufbauen. Die HELAVA-DPW 770 wurde im Luftbildmodus eingesetzt, wobei nur festgelegte Streifenabschnitte von ca. 6000×12000 Pixeln für die Rekonstruktion Verwendung fanden, um die oben genannten Probleme mit der absoluten äußeren Orientierung zumindest lokal in den Griff zu bekommen. Die Objektkoordinaten aus der Bildzuordnung müssen von der unterstellten Luftbildgeometrie über die Zeilenabtastergeometrie der Epipolarbilder in die ursprüngliche Zeilenabtastergeometrie zurückgerechnet und anhand der Orientierungsdaten aus der Aerotriangulation erneut zum Schnitt gebracht werden, um zu korrekten absoluten Koordinaten im ursprünglichen System der äußeren Orientierung zu gelangen. Diese Umrechnung erfolgt über die bekannten Abbildungsgleichungen, Bild 21.



Bild 21 – Überlagerung von Vor- und Rückblick der vorentzerrten DPA-Daten (ein Abschnitt aus Flugstreifen 8), hier eingefärbt als Anaglyphenbild. Die geometrische Auswertung dieser Bilddaten erfolgt zunächst unter der Annahme von Perspektivbild- und Epipolargeometrie an einer Stereoauswertestation für digitale Luftbilder. Die resultierenden Objektraumkoordinaten $(\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z})_i$ müssen anschließend über die jeweiligen Abbildungsgleichungen rücktransformiert werden, um zu den absoluten Koordinaten $(X, Y, Z)_i$ zu gelangen.

Diese Koordinatentransformationen können prinzipiell in Echtzeit durchgeführt werden, hier wurden sie jedoch zunächst nur als Nachbearbeitungsschritt realisiert. Bild 19 zeigt ein Ergebnis dieser Verarbeitungskette, der berechneten Oberflächengeometrie wurde das ebenfalls aus den DPA-Daten ermittelte digitale Orthobild überlagert. Sowohl die Epipolarbilder als auch das resultierende Orthobild wurden mit dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Ansatz berechnet.

3.4 Ursachen für Restfehler der Aerotriangulation

Zur Bestimmung der endgültigen absoluten Orientierungen wurden seitens des BKG Frankfurt a.M. pro Flugstreifen jeweils 9 natürliche Paßpunkte via DGPS mit Genauigkeiten unter $\pm 10cm$ bestimmt und bereitgestellt. Die auf dieser Basis am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart durchgeführte Bündelausgleichung konnte leider die hohen Erwartungen an die geometrische Genauigkeit nicht vollends bestätigen, es verblieben Restparallaxen in der Größenordnung von ca. 3-5 Pixeln. Durch die Analyse der Ausgangs- und Ergebnisdaten konnten drei potentielle Ursachen identifiziert werden:

- 1. Änderung der inneren Orientierung (im Vergleich zu den vorliegenden Laborkalibrierungsdaten) für die Teilsensoren der Aufnahmezeile 'C', vgl. die Bilder 23 bis 25, eine Neukalibrierung oder eine ergänzend durchgeführte Selbstkalibrierung (Bündelausgleichung) ist erforderlich
- 2. Modellierungsdefizit bei der Einbindung von Paß- und Verknüpfungspunkten in die Bündelausgleichung für den Spezialfall starker lokaler Drehwinkeländerungen
- Hardwarefehler bei der Übertragung der Drehgeschwindigkeiten und -beschleunigungen von der Inertialen Meßeinheit (IME) im Aufnahmesystem

Die Sensorzeilen des panchromatischen Aufnahmesystems der DPA-Kamera bilden keine physikalische Einheit, sondern bestehen aus je zwei CCD-Zeilen à 6000 Pixeln, wobei sowohl für die drei links- als auch für die drei rechtsseitigen Sensorzeilen ein eigenes Objektiv vorgesehen ist, vgl. Bilder 13, 22 sowie [*Müller* 1991].



Bild 22 - Laborkalibrierungsergebnisse (DASA) für die panchromatischen Sensorbausteine zu zwei Zeitpunkten.

An der 'Nahtstelle' zwischen jeweils zwei zugehörigen Sensorbausteinen ergibt sich somit die Möglichkeit für eine einfache Plausibilitätskontrolle der Kamerakalibrierungsdaten durch die Projektion der Grauwerte in den Objektraum. Bei einer der drei Blickrichtungen wurde ein Kalibrierungsfehler in der Größenordnung von ca. 2-3 Pixeln nachgewiesen. Exemplarisch zeigen Bild 23 und die Vergrößerung in Bild 24 die korrekt zusammengeführte Nahtstelle zwischen den beiden Teilsensoren 'A' nach erfolgter Projektion in den Objektraum, während Bild 25 den Fehler in den Kalibrierungsdaten mit einem Verschiebungsbetrag in der Größenordnung von zwei bis drei Pixelkantenlängen entlang der Nahtstelle der Teilsensoren 'C' nachweist. Effekte dieser Art sind durchaus keine Ausnahme: So belegen beispielsweise [*Jacobsen* 1997] für IRS-1C und [*Kornus et al.* 1998] für MOMS-2P die Notwendigkeit einer



Bild 23 – Plausibilitätskontrolle der geometrischen Kalibrierung im Übergangsbereich 'zwischen' zwei Sensorbausteinen. (a): Rohbilddaten der Sensorzeilen 'A', Bildausschnitt 400×400 Pixel². (b): Korrekte Abbildung bei der Entzerrung durch die Projektion in den Objektraum.



Bild 24 – Plausibilitätskontrolle der geometrischen Kalibrierung im Übergangsbereich 'zwischen' zwei Sensorbausteinen. (a): Rohbilddaten der Sensorzeilen 'A', Bildausschnitt 160×160 Pixel² aus Bild 23. (b): Korrekte Abbildung bei der Entzerrung durch die Projektion in den Objektraum.

Inflight-Kalibrierung als Ergänzung zur Laborkalibrierung um das Genauigkeitspotential der jeweiligen Sensoren ausschöpfen zu können. Die Vermeidung derartiger Probleme allein über den Weg der Laborkalibrierung ist schwierig. Eine flexiblere Lösungsmöglichkeit für solche 'kleinen' Kalibrierungsfehler bietet die Selbstkalibrierung als integrativer Bestandteil einer Bündelausgleichung, welche neben Bildpunktbeobachtungen auch IME- und GPS- Beobachtungen mit einbezieht. Die softwaretechnische Möglichkeit zur Selbstkalibrierung des DPA-Aufnahmesystems wird daher für zukünftige Befliegungen als unverzichtbar erachtet. Veröffentlichungen zur geometrischen Selbstkalibrierung von Dreizeilenscannern liegen bisher schwerpunktmäßig für MOMS bzw. allgemein für satellitengetragene Systeme vor.



Bild 25 – Laborkalibrierung versus Selbstkalibrierung. (a): Rohbilddaten der Sensorzeilen 'C' im Übergangsbereich 'zwischen' zwei Sensorbausteinen, Bildausschnitt $480 \times 480 \text{ Pixel}^2$ (b): Ausschnittsvergrößerung der Rohdaten, (c): Restfehler bei der Entzerrung im Objektraum mit inkonsistenten Kalibrierdaten, (d): Soll nach Selbstkalibrierung.

Ausführliche Genauigkeitsbetrachtungen und Simulationsrechnungen für DPA über den Weg der photogrammetrischen Bündelausgleichung sind z.Zt. wohl nur in [*Müller* 1991] verfügbar. Insgesamt lassen sich aus der vorliegenden Literatur folgende Schlüsse zum Thema Selbstkalibrierung der DPA-Kamera zusammenfassen:

- 1. Die Inflight-Kalibrierung ergänzt und korrigiert die Laborkalibrierung, kann sie aber nicht vollständig ersetzen, vgl. [Kornus et al. 1996], [Kornus et al. 1998], [Kornus et al. 1999b], [Kornus et al. 1999b], [Haala et al. 1998].
- 2. Der Lagebezug der GPS-Antenne gegenüber dem DPA-Projektionszentrum sowie des INS gegenüber dem DPA-Projektionszentrum muß im Rahmen der angestrebten absoluten Genauigkeit bekannt sein, sollte also direkt gemessen werden.
- Ergänzend zur vollen Funktionstüchtigkeit der INS- und DGPS-Hardware ist ein einheitliches Zeitreferenzsystem mit einer Genauigkeit von mindestens 1/10 der Lesefrequenz des hochauflösenden panchromatischen Sensors, also ca. 2000 Hz, zu realisieren.
- 4. Eine Kreuzbefliegung reduziert die Anzahl der erforderlichen Paßpunktinformation dramatisch, vgl. [Müller 1991], [Kornus 1999]. Andere Aufnahmekonfigurationen sind bei Satelliten als Sensorplattform nicht möglich und werden daher in der Literatur grundsätzlich nicht in Betracht gezogen. Erfahrungen aus terrestrischen Testfeldkalibrationen legen die Überfliegung eines quadratischen Testgebiets aus allen vier Himmelsrichtungen nahe. Dies stützt insbesondere die Lagebestimmung der Sensorbausteine in der Bildebene (Hauptpunktverschiebung).
- Für alle auszuwertenden Gebiete muß die Sichtbarkeit in allen drei Kamerablickrichtungen sichergestellt sein.
- 6. Mangelnde Höhenunterschiede im Testgelände wirken sich vor allem auf eine schwache Bestimmbarkeit der Kamerakonstanten aus, vgl. Punkt 1. Für Satellitenaufnahmen trifft diese Annahme immer zu, entsprechend entstanden alle zitierten Simulationsrechnungen unter der Annahme horizontal verlaufenden Geländes.

Im Unterschied zu satellitengetragenen Kameras sind bei flugzeuggetragenen digitalen Aufnahmesystemen gerade die hochfrequenten Anteile der Winkelgeschwindigkeiten und -beschleunigungen von besonderer Bedeutung. Sie sind vor der Driftbereinigung von den eher niederfrequenten Anteilen abzuspalten und *a posteriori* wieder unverfälscht zu ergänzen. Im Falle extremer Winkeländerungen in Flugstreifen 9, vgl. Bild 18(b) und (c) auf S. 35, haben sich möglicherweise zu große oder lokal inadäquat gewählte Orientierungspunktabstände bei der Umsetzung der Bündelausgleichung negativ auf das Gesamtergebnis ausgewirkt. Während die Entzerrung des entsprechenden Bildausschnitts anhand der relativen Orientierungsdaten (ohne Einbeziehung von Paß- und Verknüpfungspunkten) eher geringfügige Fehler aufweist, vgl. Bild 26(a), so ist das Resultat nach der Bündelausgleichung unter Einbeziehung von Paß- und Verknüpfungspunkten deutlich verschlechtert, Bild 26(b). Eine ausreichende Anzahl an Verknüpfungspunkten und situationsangepaßt gewählte Orientierungspunktabstände sollten zu verbesserten Ergebnissen führen.



Bild 26 – Geometrische Entzerrung bei starken Drehwinkeländerungen. (a): Verwendung von Drehwinkeln ohne Driftkorrektur der IME-Beobachtungen. (b): Verwendung von Drehwinkeln nach Driftkorrektur der IME-Beobachtungen.

In seiner Gesamtwirkung schwer abgrenzbar ist die dritte Fehlerquelle, die in einem hardwaretechnischen Ausfall eines Bits bei der Datenübertragung seitens der Intertialmeßeinheit bestand, vgl. [*Haala et al.* 1998]. Die Auswirkungen des Übertragungsfehlers der IME-Meßdaten ist in den an das BKG gelieferten IME-Daten noch deutlich zu erkennen, vgl. die horizontalen beobachtungsarmen Bänder bzw. Wertebereiche in Bild 27. Die IME-Beobachtungen sind offensichtlich einer Vorverarbeitung unterzogen worden, da keine streng beobachtungsfreien Bänder auftreten. Dieser Fehler beeinflußt die geometrische Auswertegenauigkeit stark, da die Orientierungsdaten systematisch verfälscht werden. Hier wird die Hauptursache für das lokale Auftreten der erheblichen Restparallaxen (> 3 Pixel) vermutet, welche die Bildzuordnung in der Originalauflösung erheblich erschweren. Weiterhin muß von einer entsprechenden Verfälschung der Parallaxen in Flugrichtung ausgegangen werden, welche sich direkt als Fehler bei der Höhenberechnung auswirken.

Der Hardwarefehler der IME wurde zwischenzeitlich seitens der DASA für zukünftige Flüge bereinigt. Auch die fehlerhaften Kalibrierungsdaten der geteilten Aufnahmezeile 'C' konnten seitens der DASA zurückverfolgt werden. Die Beseitigung der diskutierten Fehlerquellen läßt nun ein zumindest pixelgenaues Ergebnis erwarten. Die geschilderten Probleme und Erfahrungen belegen, daß sich die Lösung der Orientierungsaufgabe für flugzeuggetragene Dreizeilenscanner bei angemessenen Genauigkeitsansprüchen stets auf eine integrierte Lösung unter Einbeziehung von Paßpunkten, DGPS-Daten, IME-Daten und photogrammetrischen Verknüpfungen stützen sollte. Dabei vereinfachen DGPS-Koordinaten



Bild 27 – IME-Beobachtungen für den gesamten Flugstreifen 8 der Befliegung *Frankfurt-West*, punktweise aufgetragen als Funktion der Aufnahmezeit. Sowohl die Drehgeschwindigkeiten als auch die linearen Beschleunigungen weisen eine starke Systematik auf, Messwerte treten je nach Wertebereich mit stark unterschiedlichen Häufigkeiten auf.

das automatisierte Auffinden homologer Punkte erheblich. Im Gegenzug sichern die gewonnenen Verknüpfungen die direkten Orientierungsbeobachtungen in geeigneter Art und Weise ab. Die redundanten Beobachtungen stehen bei Bedarf auch für eine Nachbesserung der Laborkalibrierung über einen Selbstkalibrierungsansatz im Sinne der photogrammetrischen Bündelausgleichung zur Verfügung.

3.5 Zusammenfassung und Wertung

Durch eine geeignete Aufbereitung der DPA-Daten sowie eine entsprechende Rücktransformation der erzielten Ergebnisse gelingt es, photogrammetrische Bildzuordnungsansätze für satellitengestützte Zeilenscanner wie SPOT und MOMS (im Falle der Verwendung von ARCOS) bzw. für digitalisierte analoge Luftbildaufnahmen (im Falle der Verwendung der HELAVA-DPW 770) unter strenger Einbeziehung aller vorliegenden Orientierungsdaten zum Einsatz zu bringen. Dies eröffnet nicht nur einen kostengünstigen Weg zur Nutzung bestehender kommerzieller photogrammetrischer Auswertesysteme, sondern ermöglicht auch eine ergänzende interaktive Datenerfassung am stereoskopischen Arbeitsplatz.

Die primär mit ARCOS und später auch die mit der HELAVA-DPW 770 vorgenommen Experimente zur hochaufgelösten Oberflächenrekonstruktion innerhalb bebauter Gebiete zeigten nicht den vollen erhofften Erfolg. Obwohl die Höhenstruktur größerer Industriebauten ansatzweise richtig erfaßt werden konnte, gelang das im Fall lockerer Wohnbebauung nur in Ausnahmefällen. Wie anhand von Luftbildern gewonnene Ergebnisse zeigen, ist dies aber bereits mit Pixelgrößen von $0.5 \times 0.5m^2$ am Boden grundsätzlich möglich, vgl. z.B. [Schlüter 1998, S.6]. Der ergänzend eingeschlagene Weg zur Bearbeitung der DPA-Daten mit der HELAVA-DPW 770, also die Behandlung der Bilder als Pseudoperspektivbilder in Epipolargeometrie, schaffte eine verbesserte Transparenz zur Bewertung der Ursachen für die Probleme bei der hochaufgelösten innerörtlichen Rekonstruktion.

Obwohl bei der Auswertung der DPA-Befliegung *Frankfurt-West* die angestrebte geometrische Genauigkeit nicht erreicht wurde, hat sich das Konzept der Dreizeilenkamera insgesamt als erfolgversprechend erwiesen. Die möglichen Fehlerquellen ließen sich relativ scharf eingrenzen und wurden, soweit sie hardwaretechnischer Natur waren, inzwischen seitens der DASA beseitigt.

Trotz der angesprochenen Probleme konnte die photogrammetrische Verarbeitungskette bis hin zur interaktiven Auswertung am Stereoschirm bzw. zu den Endprodukten *Digitales Orthobild* und automatisch generiertes *Digitales Oberflächenmodell* erfolgreich aufgebaut und erprobt werden.

4 GIS–Vorwissen als Basis für die Lösung von Erkennungs- und Fortführungsaufgaben

Vorhandenes Wissen für die automatisierte Fortführung von Geodaten aus Bilddaten zu nutzen ist ein wesentlicher, aus den Forschungsarbeiten der letzten Jahre resultierender Trend, vgl. z.B. [*Bähr* und *Vögtle* 1998], [*Kunz* 1999], [*Walter* 1999]. Die rasche Entwicklung auf diesem Gebiet spiegelt sich wider in den im Zuge des Projektes *UTOMA* eingesetzten Verfahren. So mußten anfangs digitalisierte Karten, also beispielsweise die gescannte Situationsfolie der Topographischen Karte 1:50 000 (TK50) des Hessischen Landesvermessungsamtes sowie einzelne Folien der *Joint Operations Graphic* (JOG) der NATO im Maßstab 1:250 000 zur Lösung von Georeferenzierungsaufgaben und zur Gewinnung von Trainingsinformationen eingesetzt werden, vgl. Abschnitt 4.1. Ab Anfang 1999 konnte auf das ATKIS Basis-DLM der Ersterfassungstufe zurückgegriffen werden. Durch die nunmehr strukturiert vorliegenden Geobasisdaten ergaben sich sofort konkrete Konsequenzen für die Arbeitsabläufe im Rahmen der multispektralen Klassifizierung, vgl. die Abschnitte 4.2 und 4.3. Gegenüber den erstgenannten Geodatenquellen schlugen natürlich auch der erheblich geringere Generalisierungsgrad des ATKIS Basis-DLM sowie die geometrische Lagegenauigkeit von maximal drei Metern positiv zu Buche.

Im folgenden sollen einige der Probleme und Vorzüge dargestellt werden, die im Zuge einer engen Verknüpfung von fernerkundlichen Erkennungsaufgaben unter Einbeziehung von topographischem Vorwissen auftreten. Zunächst wird die Festlegung von Trainingsgebieten für die Objektklasse 'Siedlung' vorgestellt, denen Rastergraphikdaten im Maßstab 1:250 000 zugrunde liegen. Anschließend werden die Objektbereiche, -gruppen, -arten sowie ausgewählte Attribute des ATKIS Basis-DLMs den mit Mitteln der Fernerkundung extrahierbaren Objektklassen gegenübergestellt. Als zweites Beispiel wird die automatische Klassifizierung von Waldgebieten samt der Unterteilung in Laub- und Nadelholz präsentiert, wobei das Augenmerk speziell auf der Gewinnung fortführungsrelevanter Informationen bei flächenhaft vorliegendem Vorwissen gerichtet wird. Hier liegen die attributierten Vektordaten des ATKIS Basis-DLMs zugrunde.

4.1 Trainingsgebiete für die Siedlungserkennung aus kleinmaßstäbigen GIS-Daten

Für die Siedlungserkennung anhand von Texturmerkmalen aus Bildern von SPOT und IRS-1C greift [*Busch* 1998] auf kleinmaßstäbige GIS-Daten zurück. Konkret werden Siedlungsumrisse und -signaturen der *Joint Operations Graphic* (JOG) 1:250.000 der NATO eingesetzt, um Trainingsgebiete für die Unterscheidung von Siedlungsgebieten gegenüber den verschiedenartigen, hier aber nicht weiter aufzuschlüsselnden Außenbereichen zu erhalten. Für die Siedlungsextraktion wird ein hoher Automatisationsgrad angestrebt. Diesem Aspekt trägt die gewählte GIS-Datenquelle grundsätzlich Rechnung, da sie bundesweit mit homogener Qualität vorliegt.

Zu beachten ist, daß diese Daten weniger aktuell als die Bilddaten und entsprechend ihrem Maßstab kartographisch generalisiert sind. Die Ergebnisdarstellung in Bild 28 veranschaulicht dies: Neben der Vereinfachung unterliegt der GIS-Siedlungsumriß der Verdrängung, er ist aufgrund der nordöstlich passierenden Fernverkehrsstraße, die im GIS vergrößert dargestellt ist, in südwestlicher Richtung verschoben. Ferner faßt der GIS-Siedlungsumriß die beiden erkannten Siedlungsgebiete zusammen. Neben diesen durch Generalisierung bedingten Unterschieden hat sich die Siedlung offensichtlich in der Südostecke etwas ausgedehnt, hier besteht Fortführungsbedarf.

Im Zuge der Generalisierung werden ferner kleinere Ortschaften mit weniger als fünftausend Einwohnern typisiert. Sie werden also nicht mehr flächenhaft in den vorliegenden GIS-Daten repräsentiert, sondern über eine punktförmige Signatur. Insgesamt gesehen sind die durch die Generalisierungseffekte vorgegebenen Randbedingungen typisch für Fortführungsaufgaben im kleinmaßstäbigen Bereich.



Bild 28 – Unterschiede aufgrund von Generalisierung und Fortführungsbedarf zwischen automatisch extrahierten Siedlungsbereichen (in grün) und im GIS dargestellten Siedlungsbereichen (in rot), aus [*Busch* 1998].

Um möglichst sichere Vorinformationen bezüglich der Texturcharakteristika von bebauten und nicht bebauten Gebieten zu gewinnen, werden die aufgrund von Generalisierungseffekten und Fortführungsdefiziten stärker betroffenen Randbereiche der Siedlungen für die Gewinnung der Trainigsinformation ausgeschlossen. Die signaturiert dargestellten Siedlungen können aufgrund der jeweils unbekannten Ausdehnungen nur vom Außenbereich ausgenommen werden, können aber keine Informationen bezüglich der Siedlungsinnenbereiche beitragen.

Der resultierende Verfahrensablauf gestaltet sich nach [*Busch* 1998] dann folgendermaßen: Bild 29(a) zeigt zunächst die aus der JOG extrahierten Umrisse von Siedlungen mit mehr als fünftausend Einwohnern. Diese Siedlungsumrisse wurden von UTM nach Gauß-Krüger transformiert und automatisch zu Regionen gefüllt. Um möglichst sichere Trainingsgebiete für die Siedlungsbereiche zu gewinnen, werden die Siedlungsflächen der JOG morphologisch verkleinert, Bild 29(b). Diese Annahmen gelten natürlich auch für die Festlegung von Trainingsgebieten für den Außenbereich. Bild 29(c) zeigt die wiederum über morphologisch Operationen aus Bild 29(a) verkleinerten Außenbereiche. Zusätzlich werden auch die Umgebungen der über eine punktförmige Signatur repräsentierten Ortschaften vom Außenbereich ausgenommen, vgl. Bild 29(d). Aus einer logischen ODER-Verknüpfung der Darstellungen in Bild 29(c) und Bild 29(d) resultiert die endgültige Maske für die Trainigsgebiete der Außenbereiche, vgl. Bild 30.

Die Ergebnisdarstellung für die automatische Bestimmung der Trainingsgebiete in Bild 30 macht deutlich, daß weitgehend adäquate Bildbereiche ausgewählt wurden. Lediglich im Bereich des Frankfurter Flughafens fällt auf, daß die Flughafengebäude in der JOG nicht unter die Kategorie 'Siedlungsgebiete' fallen. Natürlich ließe sich durch die ergänzende Einbeziehung entsprechender weiterer GIS-Ebenen dieses Ergebnis noch verbessern. Dieser Mehraufwand konnte jedoch unterbleiben, da das gesamte Erkennungsverfahren robust genug ist, um die verbliebenen Defizite ausgleichen zu können, vgl. Abschnitt 5.2. Die vorliegenden Trainingsgebiete erweisen sich als präzise genug.



Bild 29 – Vorarbeiten zur Festlegung von Trainingsgebieten für die Objektklasse 'Siedlung'. (a): Siedlungspolygone aus JOG, Regionen nach Vektor-Raster-Wandlung. (b): Um Randzonen verkleinerte Siedlungsgebiete. (c): Um Randzonen verkleinerter Außenbereich. (d): Ergänzende Außenbereichsmaske für Siedlungen mit weniger als 5000 Einwohnern.



Bild 30 – Automatisiert abgeleitete Trainingsgebiete für die Objektklassen 'Siedlung' (**–**) und 'Außenbereich' (**–**).

4.2 Synergetische Nutzung von ATKIS-Vorwissen und Fernerkundungsmethoden für die ATKIS-Fortführung und -Modellgeneralisierung

Mit der anstehenden bundesweiten Verfügbarkeit der Daten des ATKIS Basis-DLMs steht auch für Fernerkundungsanwendungen ein enormes Reservoir an raumbezogener Information zur Verfügung. Im Hinblick auf eine möglichst wirtschaftliche Arbeitsweise und auch auf die Ausnutzung von Synergieeffekten greifen Fernerkundungsmethoden auf die bereits verfügbaren Geodaten zurück und schöpfen das in ihnen enthaltene Vorwissen aus. In Bild 31 wird skizziert, auf welche Weise Fernerkundungsdaten innerhalb des ATKIS-Konzeptes zum Tragen kommen könnten: Während die Objekterkennung zunächst maßgeblich von den bereitstehenden Daten des ATKIS Basis-DLMs profitiert, kann das Basis-DLM wiederum durch die Ergebnisse aus der Fernerkundung verifiziert werden. (Z.Zt. bestehen hier noch auflösungsbedingte Grenzen.) Darüber hinaus wird die Erstellung und Fortführung der kleinmaßstäbigen Digitalen Landschaftsmodelle durch die Fernerkundungsergebnisse unterstützt. Da die Modellgeneralisierung mittelfristig noch nicht durchgehend realisiert werden kann, gewinnt die Einbeziehung von Informationen aus Fernerkundungsverfahren sogar noch an Bedeutung: Denn gerade die mittelfristig vorgesehene, sich an pragmatischen Gesichtspunkten orientierende Generierung des DLM 50 aus der TK50 oder des DLM 250 aus der JOG kann von ergänzenden, aktuellen Ergebnissen aus Fernerkundungsanwendungen erheblich profitieren.



Bild 31 – Konzeption und Praxis der Produktion von ATKIS. In schwarz und grün: Herstellung der Digitalen Landschaftsmodelle und Ableitung der Digitalen Topographischen Karten entsprechend der theoretischen Konzeption. In rot: Mittelfristig ergänzend einzubeziehende Quellen. In Blau: Vorgeschlagene Integration von Fernerkundungsdaten. (Das Bild basiert auf zwei Abbildungen, welche freundlicherweise von *Dr. Andreas Illert*, BKG Frankfurt am Main, bereitgestellt wurden.)

Im folgenden wird zunächst kurz in das ATKIS-Konzept eingeführt. Anschließend werden die Inhalte des ATKIS Basis-DLMs im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Fernerkundung diskutiert: Welche ATKIS-Objekte und Attribute lassen sich grundsätzlich aus Fernerkundungsbildern extrahieren, welche fortführungsrelevanten Informationen können aus den Bilddaten abgeleitet werden? Mit dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) werden bundesweit ein einheitliches räumliches Bezugssystem und aktuelle Informationen über topographische Objekte in digitaler Form als Basisinformation für externe GIS-Anwendungen nach dem Grundsatz "einmalige Erfassung und mehrfache Nutzung" bereitgestellt. Weiterhin wird die rationellere und schnellere Herstellung der amtlichen topographischen Kartenwerke durch digitale Verfahren angestrebt [*Hake* und *Grünreich* 1994]. Die ATKIS-Konzeption legt den Aufbau von zunächst drei Digitalen Landschaftsmodellen fest, zur Zeit sind diese das Basis-DLM (vormals DLM 25), das DLM 250 (vormals DLM 200) und schließlich das DLM 1000. Für das Basis-DLM werden all die Objekte vollständig erfaßt, deren topographische Bedeutung dem Maßstabsbereich 1:25 000 angemessen ist. Dabei ist eine Modellgenauigkeit von $\pm 3m$ für wesentliche lineare Objekte einzuhalten, also für die linienförmig zu modellierenden Straßen, Bahnstrecken, Gewässer etc., vgl. [*AdV* 1989]. Dies bedeutet für die zur Verfügung stehenden Satellitenbilddaten mit Bodenpixelgrößen der Größenordnung sechs bis dreißig Meter nahezu eine Sollgeometrie. Die angegebene Genauigkeit wird durch die Erfahrungen bei der Georeferenzierung bestätigt, vgl. Kapitel 2.1.

Der Objektartenkatalog für das DLM 250 ist gegenüber dem OK des Basis-DLMs als Selektionsvorschrift konzipiert, er umfaßt also lediglich eine Untermenge an Objektarten und Attributen. Aus dem Maßstabsbereich 1:250 000 ergibt sich neben dieser Vereinfachung der Inhalte auch eine deutlich verringerte Informationsdichte. Insgesamt gesehen wäre damit das DLM 250 als Referenz für Erkennungsaufgaben anhand der aktuell verfügbaren Satellitenbilder angemessen, vgl. [*Kunz et al.* 1997]. Das DLM 250 steht aber bislang (außer für ausgewählte Testgebiete) noch nicht zur Verfügung. Deshalb wurde hier ersatzweise auf das Basis-DLM zurückgegriffen, welches Anfang 1999 vom Geodatenzentrum des BKG in Leipzig in der ersten Realisierungssstufe (gemäß ATKIS-OK 25/1) für das Testgebiet *Frankfurt am Main West* freundlicherweise bereitgestellt wurde.

Der Objektartenkatalog (ATKIS-OK) ist hierarchisch strukturiert und "… hat die Aufgabe, die Landschaft nach vornehmlich topographischen Gesichtspunkten zu gliedern, die topographischen Erscheinungsformen und Sachverhalte der Landschaft … zu klassifizieren und damit den Inhalt der Digitalen Landschaftsmodelle (DLM) festzulegen sowie die für den Aufbau der DLM erforderlichen Modellierungsvorschriften bereitzustellen", vgl. [*AdV* 1999]. Vom Groben ins Feine werden die Landschaftsobjekte zunächst in Objektbereiche, diese dann in Objektgruppen und diese wiederum in Objektarten, samt zugeordneten Attributen gegliedert. Während die Erdoberfläche durch einige (flächenförmige modellierte) Objektarten redundanzfrei beschrieben wird, dürfen ausgewählte Objektarten auch redundant eingesetzt werden. Ferner können durch die linienhafte Modellierung flächenförmiger topographischer Objekte auch unbelegte Grundflächen resultieren.

Mit den Methoden der Fernerkundung können zahlreiche, meist flächenartige Objektarten und Attribute erfaßt werden, aber viele Informationen wie beispielsweise die Abgrenzungen von Verwaltungsgebieten oder die Widmungen von Verkehrswegen lassen sich aus Bildern natürlich nicht ablesen. Ebenfalls wird eine redundante Darstellung der Erdoberfläche mit den modernen Methoden der automatisierten Interpretation von Fernerkundungsbildern in der Regel nicht angestrebt. Auch wenn im Rahmen eines Klassifizierungsprozesses mitunter mehrere Landnutzungshypothesen unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit zugelassen werden, vgl. z.B. [*Jacobs* und *Stiehs* 1995], [*Sindhuber* 1998], so zielt die Auswertung insgesamt doch stets auf eine eindeutige Klassenzuweisung. Vor diesem Hintergrund ist es hilfreich, aus den vorliegenden GIS-Daten eine Referenz (mit exemplarischen Charakter) in einer Rasterdarstellung zu generieren, welche in Auflösung und inhaltlicher Tiefe den zu erwartenden Klassifzierungsergebnissen nahe kommt, vgl. das Beispiel in Bild 32(a). Die für die Bildung dieser Referenz zu treffenden Entscheidungen lassen interessante Rückschlüsse auf die Möglichkeiten zur späteren Fortführung des GIS aus den Fernerkundungsdaten zu.

Zunächst wird die Objekthierarchie der ATKIS-Daten genutzt, um eine Vorauswahl der darzustellenden Inhalte zu treffen. Auf der obersten Hierarchiestufe finden sich sieben Objektbereiche, davon werden die Bereiche 'Siedlung', 'Verkehr', 'Gewässer' und 'Vegetation' in die Betrachtung einbezogen. Die



(a)

- Objektbereich 'Siedlung'
- Objektbereich 'Verkehr', Objektgruppen 'Straßenverkehr' und 'Schienenverkehr'
- Objektbereich 'Gewässer'

Objektbereich 'Vegetation':

- Objektart 'Ackerland'
- Objektart 'Grünland'
- Objektart 'Gartenland'
- Objektarten 'Wald, Forst' & 'Gehölz', Vegetationsmerkmal 'Laubholz'
- Objektarten 'Wald, Forst' & 'Gehölz', Vegetationsmerkmal 'Nadelholz'
- Objektarten 'Wald, Forst' & 'Gehölz', Vegetationsmerkmal 'Laub- und Nadelholz'
- Objektart 'Sonderkultur'
- Objektart 'Vegetationslos'



(b)

Objektbereich 'Siedlung':

- Objektgruppe 'Baulich geprägte Flächen'
- Objektgruppe 'Siedlungsfreiflächen'
- Objektgruppe 'Bauwerke und sonstige Einrichtungen'

Objektbereich 'Verkehr':

Objektarten flächenförmigen Objekttyps

Bild 32 – ATKIS Basis-DLM – ausgewählte Inhalte im Hinblick auf die automatisierte Erkennung in Fernerkundungsbildern. (a): Redundanzfreie flächendeckende Rasterdarstellung. (b): Aufschlüsselung der Objektbereiche 'Siedlung' und 'Verkehr'. Objektbereiche 'Festpunkte' und 'Gebiete' enthalten keine aus Bildern ableitbare Information, die im Objektbereich 'Relief' abzulegenden Inhalte liegen noch nicht vor.

Der Objektbereich 'Gewässer' wurde nicht weiter aufgeschlüsselt. Die eindeutigen spektralen Merkmale offerieren bekanntermaßen gute Voraussetzungen für die automatische Erkennung über die multispektrale Klassifizierung. Ferner können die Objektarten 'Strom, Fluß, Bach' und 'Binnensee, Stausee, Teich' anhand ihrer geometrischen Formmerkmale unterschieden werden. Dagegen ist die automatische Unterscheidung zwischen 'Strom, Fluß, Bach' und 'Kanal (Schiffahrt)' wohl nur über die Einbeziehung von kontextbezogenem Wissen möglich, sofern beispielsweise entsprechende begleitende Bauwerke in den Bildern identifizierbar wären, vgl. die Beispiele von [*Growe* 1999], [*Tönjes* 1999] zur Objektidentifikation aus Luftbildern auf der Basis eines semantischen Netzes ([*Liedtke et al.* 1997]). In den vorliegenden Satellitenbildern reicht die Kontextinformation oft nicht für eine zuverlässige Entscheidung aus. So kann beispielsweise selbst aus der Nachbarschaft von erkannten Zufahrtswegen, Gebäuden, Brücken und Gewässer oft nicht sicher entschieden werden, ob es sich bei den entsprechenden Anlagen um die Objektart 'Einrichtungen und Bauwerke an Gewässern' des Objektbereichs 'Gewässer' oder etwa die Objektart 'Industrie- und Gewerbefläche' des Objektbereichs 'Siedlung' handelt.

Aus der Kenntnis dieser Schwierigkeiten heraus wird auch der Objektbereich 'Siedlung' hier nicht weiter aufgeschlüsselt. Dies erfüllt natürlich in keiner Weise die vollständigen Vorgaben des OK 250, reicht aber bei einigen kleinmaßstäbigen Kartenwerken wie beispielsweise der JOG 1:250 000 für die flächenhafte Siedlungsdarstellung durchaus aus. Vielfach problematisch für die Erkennbarkeit in Satellitenbildern ist, daß Siedlungsbereiche nicht nur im ATKIS sehr stark ausdifferenziert sind, sondern daß sie, und zwar oft unabhängig von den ATKIS-Objektarten, ein spektral sehr heterogenes Erscheinungsbild bieten. Exemplarisch wird dazu in Bild 32(b) der Objektbereich 'Siedlung' in seine drei Objektgruppen gegliedert dargestellt. Ferner sind auch die Objektarten flächenförmigen Objekttyps des Objektbereichs 'Verkehr' markiert, wobei die erheblichen Redundanzen zwischen diesen beiden Objektbereichen sich auch in den Modellierungsvorschriften der ATKIS-OKe finden. Gerade für den Objektbereich 'Siedlungsfreiflächen' kann oft ein erhöhter oder sogar überwiegender Vegetationsanteil erwartet werden. Dies ist aber kein hinreichendes Merkmal, denn die hier untergeordneten Objektarten wie beispielsweise 'Sportanlage' oder 'Friedhof' können sowohl spektral als auch seitens ihrer Form- und Texturmerkmale sehr unterschiedliche Charakteristika aufweisen. Erfolgversprechende Lösungsstrategien sollten also die Vorabinformation aus ATKIS hinsichtlich der in Siedlungsgebieten tendentiell erhöhten Unsicherheitsrate miteinbeziehen. Mit unterschiedlichen Klassifzierungsstrategien können in der Regel auch unterschiedliche Teilaspekte des Objektbereichs 'Siedlung' besonders gut herausgearbeitet werden. Die Kombination von sich ergänzenden Erkennungsansätzen ist erfolgversprechend, vgl. Abschnitt 5.2.

Eine wesentlich verbesserte Erkennbarkeit bietet der Objektbereich 'Vegetation'. Hier können nahezu alle Objektarten in die Referenz übernommen werden, wobei die im ATKIS-OK des definierten Objektarten 'Heide', 'Moor, Moos', 'Sumpf, Ried', 'Nasser Boden' im Testgebiet nicht vorkommen. Problematisch ist hier in erster Linie die per Definition vorgenommene Unterscheidung der Objektarten 'Wald, Forst' und 'Gehölz', vgl. Tab. 5. Diese Trennung kann in vielen Fällen nur mit erheblichem Kontextwissen korrekt erfolgen. Für die Fernerkundungsreferenz wurden daher diese beiden Objektarten zusammengefaßt. Darüber hinaus werden aber die jeweils gleichlautenden Vegetationsmerkmale 'Laubholz', 'Nadelholz', 'Laub- und Nadelholz' aufgeschlüsselt. Die Festlegung für die Objektart 'Sonderkultur' ließ sich anhand der Bilddaten nicht nachvollziehen. Insgesamt gesehen wird mit dem Objektbereich 'Vegetation' ein hoher Anteil der Gesamtfläche abgedeckt, welcher im Gegesatz zu den vorher diskutierten Objektbereichen relativ detailliert aufgeschlüsselt werden darf, nämlich jeweils nach der Objektart bzw. dem Vegetationsmerkmal der Objektart.

Die Inhalte des Objektbereichs 'Verkehr' genießen hier eine Sonderstellung, da die Fortführung der Verkehrswege eine der dringlichsten Aufgaben im Katalog der Fortführungsaktivitäten darstellt. Hier werden sämtliche außerörtlichen Verkehrswege von der Bundesautobahn bis zur Kreisstraße anhand ihrer Widmung identifiziert und in die Referenz übernommen. Obwohl in Kap. 5 einige interessante Ergeb-

	Objektart 'Wald, Forst'	Objektart 'Gehölz'
Definition:	Fläche, die mit Forstpflanzen	Fläche, die mit einzelnen Bäumen,
	(Waldbäume und Waldsträucher)	Baumgruppen, Büschen, Hecken
	bestockt ist.	und Sträuchern bestockt ist.
Erfassungskriterium:	Fläche > 0,1ha	Fläche > 0,1ha
Besondere Objekt- und	Die Änderung des Attributwertes	keine
Objektteilbildungsregeln:	beim Attribut VEG wird nur dann	
	berücksichtigt, wenn dadurch Ob-	
	jektteile entstehen, deren Fläche	
	≥ 10 ha.	
Attributwerte VEG	'Laubholz', 'Nadelholz',	'Laubholz', 'Nadelholz',
(Vegetationsmerkmal):	'Laub- und Nadelholz'	'Laub- und Nadelholz'

Tabelle 5 – Ausgewählte Angaben zu den Objektarten 'Wald, Forst' und 'Gehölz' nach [AdV 1999].

nisse zu diesem Thema erzielt werden konnten, ist die automatische Erkennung von Verkehrswegen aus Fernerkundungs- oder auch Luftbildern bis heute noch nicht zufriedenstellend gelöst, vgl. [*Mayer* 1998]. Die Darstellung der Verkehrswege in Bild 32(a) ist also mehr als Orientierungshilfe für den Betrachter zu verstehen, sie soll keineswegs die Möglichkeit einer vollständigen, automatisierten Extraktion aus den Satellitenbilddaten andeuten.

Während die Vorgaben des ATKIS-OK ganz gezielt flächenhafte Redundanz für ausgewählte Objektarten zulassen, wird in Fernerkundungsbilder nur die jeweils "zuoberst" liegende Objektart direkt abgebildet. Diese direkt wahrnehmbare Objektart wird jeweils in die Referenz übernommen, also beispielsweise die Objektart 'Brücke' aus dem Objektbereich 'Verkehr' vor der Objektart 'Strom, Fluß, Bach' aus dem Objektbereich 'Gewässer'; die Objektart 'Wald' bei redundantem Auftreten mit anderen Objektarten wie z.B. 'Industrie- und Gewerbefläche' oder 'Freizeitanlage'.

Die Auswahl von ATKIS-Objekten im Hinblick auf eine mögliche Erkennbarkeit in Fernerkundungsbildern macht deutlich, daß die Stärken der Fernerkundung bei der z.Zt. vorliegenden Auflösung in der flächenhaften Leistung liegen, aber nicht in der Erkennung oder Identifikation von Detailinformation. Etwas anders verhält es sich mit der Generierung von möglichst vollständigen Hinweisen auf bestehenden Fortführungsbedarf. Diese Aufgabenstellung ist mit Fernerkundungsdaten in vielen Fällen sehr effizient und erfolgreich zu lösen, es lassen sich wertvolle Hinweise zum gezielten Einsatz alternativer Informationsquellen gewinnen. Das potentielle Anwendungsspektrum ist dann gegenüber der reinen Erkennungsaufgabe erheblich verbreitert.

Es muß abschließend betont werden, daß sich der Nutzen von ATKIS natürlich nicht auf die hier exemplarisch vorgenommene Ableitung eines Rasterdatensatzes beschränkt. Gerade die attributorientierte Datenbankstruktur eröffnet den Weg zu einem praxisgerechten, hybriden Einsatz von Raster- und Vektordaten. Durch den direkten Datenbankzugriff können Algorithmen der Fernerkundung gezielt und effizient gesteuert bzw. mit umfassendem Vorwissen versorgt werden. Ergebnisse der Bildverarbeitung können im Zusammenspiel mit der Datenbank über statistische Methoden überprüft werden. Eventuelle interaktive Kontrollen können über die Erstellung von Rangfolgen abgekürzt und damit beschleunigt werden. Schließlich können Ergebnisse aus der Fernerkundungsanwendung direkt als Attribute in der Datenbank abgelegt werden. Um auch die Vorteile der hybriden Datenverarbeitung exemplarisch zu veranschaulichen werden im folgenden Abschnitt einige Aspekte der multispektralen Klassifizierung von Waldgebieten im Hinblick auf die Fortführung eines ATKIS-DLMs beleuchtet.

4.3 Flächenhafte Fortführung von ATKIS am Beispiel von Waldgebieten

Digitale Satellitenbilddaten eignen sich insbesondere zur Fortführung topographischer Flächenobjekte. Frühere Arbeiten unter Beteiligung des BKG bzw. des IfAG konzentrieren sich im Hinblick auf kleinmaßstäbige Kartenwerke konsequenterweise auf Siedlungs-, Wald- und Wasserflächen, vgl. z.B. [*Hanke* und *Proß* 1994], [*Blau, Boochs* und *Schulz* 1997]. Insbesondere für Wald- und Wasserflächen wurde bereits in der Vergangenheit eine hohe Ergebnisqualität durch den Einsatz der flächenhaften Klassifizierung erreicht. Daher wurde im Rahmen von *UTOMA* die Klassifizierung von Waldgebieten unter einem gezielt ausgewählten Gesichtspunkt weiterverfolgt: die Einbeziehung flächenhafter Informationen des ATKIS Basis-DLMs im Hinblick auf einen wesentlich erhöhten Automatisierungsgrad bei der multispektralen Klassifizierung.

Die Erkennung von Waldgebieten wird in der fernerkundlichen Praxis mit Schwellwertverfahren auf einzelnen, meist panchromatischen Bildkanälen durchgeführt, vgl. z.B. [Hanke und Proß 1994], [Franzen et al. 1998]. Dabei weisen [Hanke und Proß 1994] ausdrücklich darauf hin, daß die notwendige Voraussetzung statistisch gesicherter Schwellen-Grauwerte nicht immer erfüllt ist. Die Einbeziehung multispektraler Bilddaten ist daher im Hinblick auf großflächige Anwendungen zu bevorzugen. In diesem Unterkapitel wird zunächst am Beispiel einer stark vereinfachten Klassifizierungsstrategie die flächenhaft GIS-gestützte multispektrale Klassifizierung von Waldgebieten erläutert. Auf die Vorteile der multispektralen Klassifizierung nach [Schulz und Wende 1993] unter Einbeziehung des flächenhaften GIS-Vorwissens wird anschließend im Zusammenhang mit der Unterscheidung von Laub- und Nadelwald eingegangen.

Aufgrund der Aufnahmetermine im Sommer wurden hier die ersten zwei bzw. drei Hauptkomponenten der vorliegenden LANDSAT TM-Szenen als Klassifizierungsgrundlage gewählt, vgl. Tab. 2 auf S. 23. Bei den in Frühjahr und Herbst aufgenommenen IRS-1C-Bildern liegt dagegen keine homogene Belaubung vor. Eine Differenzierung der phänologischen Erscheinungsformen wäre mit diesem Bildmaterial zwar prinzipiell möglich, sie ist im Rahmen der Aufgabenstellung aber nicht erforderlich und damit unwirtschaftlich, vgl. Kap. 6. In der folgenden Darstellung werden exemplarisch nur die terrainkorrigierten, auf ihre Hauptachsen transformierten TM-Kanäle vom 12.8.1997 verwendet. Dies ist durch die im Hinblick auf die Erkennung von Waldgebieten nur unwesentlichen Unterschiede in den Bildinhalten der TM-Szenen von August und September 1997 gerechtfertigt.

Zur Lösung von Klassifizierungsaufgaben hat sich in einigen Fällen eine hierarchische Vorgehensweise bewährt. Statt einer direkten eindeutigen Unterteilung des Merkmalsraumes zur Extraktion der gesuchten Objekte kann der Merkmalsraum zunächst in problemrelevante Submerkmalsräume unterteilt werden, vgl. z.B. [*Segl* 1996]. Derartige Strategien erlauben beispielsweise die Erkennung ausgewählter Objektarten mittels speziell abgeleiteter Pseudokanäle, vgl. den Einsatz von Textur und NDVI-Varianz in den folgenden Kapiteln, ohne daß mit diesen Pseudokanälen gleichzeitig noch die Abgrenzung der jeweils übergeordneten Objektbereiche oder -gruppen gewährleistet werden muß. Die hierarchische Vorgehensweise muß stets als Hilfmittel, aber nie als Allheilmittel betrachtet werden. Teilweise bestehen automationsgerechtere Lösungen: So wird beispielsweise die objektspezifische Auswahl originärer Bildkanäle durch den Einsatz der Hauptkomponententransformation vollständig vermieden, vgl. [*Schulz* 1990]. Da die hierarchische Strukturierung aber auch überschaubare Arbeitsläufe sicherstellt, wird im folgenden von ihr Gebrauch gemacht. So wird hier zunächst generell die Objektart 'Wald' klassifiziert, erst anschließend erfolgt die Unterteilung in Laub- und Nadelholz.

Um zu klären, ob sich vorgegebene GIS-Flächennutzungen auch in Satellitenbildern spektral voneinander abgrenzen lassen, können Scattergramme eingesetzt werden [*Kraus* 1990]. Ein Scattergramm zeigt die Häufigkeiten der Grauwertkombinationen für zwei Bildkanäle an, vgl. Bild 33(a). Scattergramme eröffnen Einblicke in die spektrale Trennbarkeit einzelner Objektklassen, bezogen auf die ausgewählten Bildkanäle. Flächenhaft vorliegendes GIS-Vorwissen kann nun dazu eingesetzt werden, Scattergramme nur für diejenigen Pixelgrauwerte zu generieren, welche an den Orten ausgewählter Objektarten auftre-



Bild 33 – Spektrale Abgrenzung von Waldgebieten mit GIS-Vorwissen. (a): Scattergramm der ersten beiden Hauptkomponenten der TM-Orthobilder vom 12.8.1997. (b): wie (a), jedoch *nur* für die von den Objektarten 'Wald, Forst' und 'Gehölz' des ATKIS Basis-DLMs überlagerten Bildpixel. (c): wie (a), jedoch *nicht* für die von den Objektarten 'Wald, Forst' und 'Gehölz' des ATKIS Basis-DLMs überlagerten Bildpixel.

ten. Daraus lassen sich dann auf statistischem Wege Aussagen über die jeweiligen spektralen Trennbarkeiten ableiten. Bild 33(b) und (c) zeigen beispielsweise auf, daß die zusammengefaßten Objektarten 'Wald, Forst' und 'Gehölz' des ATKIS Basis-DLMs sich auch anhand ihrer spektralen Merkmale in den Bilddaten von den anderen vorliegenden Objektarten abheben. Ein entsprechendes Scattergramm könnte beispielsweise auch nachweisen, daß die Trennung der Objektarten 'Wald, Forst' und 'Gehölz' auf spektralem Weg nicht möglich ist, vgl. Abschnitt 4.2.

Der Anschaulichkeit halber soll die Klassifizierung von Waldgebieten hier zunächst allein auf der Basis der objektartabhängig generierten Scattergramme durchgeführt werden, um zu zeigen, daß diese grundsätzlich hinreichendes Vorwissen über die aus den Bilddaten zu extrahierenden Flächen beinhalten. Dabei ist klar, daß die Scattergramme selbst bei spektral gut unterscheidbaren Objektarten nie fehlerfrei sein können. So sind beispielsweise Abweichungen auf Grund von Fortführungsbedarf zu erwarten gerade dieser soll doch detektiert werden! Da als Entscheidungsgrundlage aber der Vergleich der lokalen Häufigkeiten gewählt wird, muß die GIS-Referenz nur eine mehrheitlich zutreffende Entscheidungsgrundlage liefern. Hier zeigte sich, daß der Umfang der tatsächlich auftretenden Abweichungen stets erheblich geringer war als für den Erfolg der Methodik erforderlich gewesen wäre. Die resultierenden Klassenzugehörigkeiten werden auf der Basis weiterverarbeiteter Scattergramme festlegt. Als Weiterverarbeitungsschritt ist eine Glättung der ausgewählten Scattergramme empfehlenswert, beispielsweise durch einen robusten Mittelwertfilter. Anschließend werden durch Vergleich der lokalen Häufigkeiten (wie sie in den Bildern 33(b) und (c) dargestellt sind) binäre Masken erzeugt, welche die Klassenzugehörigkeit für jede Pixelkombination repräsentieren. Bei diesem Schritt sind die absoluten Häufigkeiten der Objektarten aus dem Basis-DLM mit einzubeziehen. Das resultierende Klassifizierungsergebnis ist in Bild 34 dargestellt.

Die Gegenüberstellung des Klassifizierungsergebnisses mit den Daten des ATKIS Basis-DLMs weist die zu erwartende weitgehende Übereinstimmung auf. Die markierten Differenzen besitzen unterschiedliche Relevanz hinsichtlich des tatsächlichen Fortführungsbedarfs. Einige Unterschiede können durch einfache, regelbasierte Abfragen bereits vorab von der interaktiven Begutachtung ausgeschlossen werden, so beispielsweise die im nördlichen Bereich von Bild 34 allein durch die Klassifizierung detektierten Waldflächen. Diese sind im ATKIS der Objektgruppe 'Siedlungsfreifläche' zugehörig und vermutlich tatsächlich baumbestanden, was aber aus den Basis-DLM per Definition nicht eindeutig hervorgeht. Andere Flächen sind zu klein, um bei der vorliegenden Bodenpixelgröße von $30 \times 30m^2$ als sicher erkannt gelten zu dürfen. In diesen Fällen weisen die auftretenden Klassifizierungsunterschiede also nicht auf Fortführungsbedarf hin.



- Objektart 'Wald, Forst' im ATKIS Basis-DLM und im Klassifizierungsergebnis
- Objektart 'Wald, Forst' nur im ATKIS Basis-DLM
- Disktart 'Wald, Forst' nur im Klassifizierungsergebnis

Bild 34 – Erkennung von Waldgebieten. (a): Orthobild (2.Hauptkomponente) als Darstellungsgrundlage. (b): Ergebnisse der GIS-gestützten multispektralen Klassifizierung im Vergleich zu den Vorgaben des ATKIS Basis-DLMs. (Für Ausschnittsvergrößerungen siehe Bild 35.)

In der Ausschnittvergrößerung Bild 35(a) und (b) werden dagegen gravierende fortführungsrelevante Änderungen deutlich. Diese resultieren zum einen aus dem Neubau der ICE-Trasse *Frankfurt am Main – Köln*, welche das Bild nördlich des Flughafens quert, zum anderen aus dem Neubau des Frachtzentrums Süd ('CargoCity') am Südrand des Flughafens. Teilweise werden über die spektralen Informationen aber auch Veränderungen angezeigt, welche aufgrund ihres temporären Charakters per Definition keinen Eingang in kartographische Darstellungen finden. So heben sich Holzeinschlaggebiete und kleinere Lichtungen natürlich spektral von baumbestandenen Gebieten ab, sie werden aber üblicherweise weiterhin als Waldgebiete geführt. Die vollautomatische Trennung derartiger temporärer Umwidmungen von tatsächlich fortführungsrelevanten Veränderungen ist nicht immer möglich und insbesondere in Waldrandgebieten schwierig, Bild 35(a) und (b) unten. So könnte es sich beispielsweise bei der ausgedehnten Änderung der Nutzungsart im Zentrum der Bilder 35(c) und (d) durchaus um eine dauerhafte Umwidmungen weise eine gezielte Aussage über die neue Nutzungsart, vgl. Kap. 6 zur automatischen Klassifizierung von Grünland und Ackerflächen.



- Objektartabgrenzungen der Objektart 'Grünland' des ATKIS Basis-DLM
- Disktart 'Wald, Forst' im ATKIS Basis-DLM und im Klassifizierungsergebnis
- Objektart 'Wald, Forst' nur im ATKIS Basis-DLM
- Disktart 'Wald, Forst' nur im Klassifizierungsergebnis

Bild 35 – Erkennung von Waldgebieten. (a), (b): Szene *Flughafen Frankfurt am Main*, Orthobild (2. Hauptkomponente). (c), (d): Szene *Wallau-Nordost*, Orthobild (3 Hauptkomponenten als [R,G,B]).

Obwohl die der Klassifizierung zugrundeliegenden multispektralen Orthobilder nur auf einer Bodenpixelgröße von $30 \times 30m^2$ basieren, zeigen die Grenzbereiche der detektierten Nutzungsänderungen in vielen Fällen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Einzelflächenabgrenzungen des Basis-DLMs. Die z.Zt. zur Verfügung stehenden Satellitenbildauflösungen erlauben eigentlich keine Generierung der Objektartabgrenzungen des ATKIS Basis-DLMs, denn die entsprechenden topographischen Details wie beispielsweise Schneisen oder Forstwege sind normalerweise nicht sichtbar. Dennoch könnten die detektierten Veränderungen bereits in der vorliegenden Form zur automatisierten Fortführung der Attributierung des Basis-DLMs genutzt werden, denn eine flächenhaft konsistente Nutzungsänderung für ein Flächenstück des Basis-DLMs reicht als Hinweis für eine automatische Attributierungsänderung grundsätzlich aus.

Die dargestellten Ergebnisse machen am Beispiel deutlich, daß die vorgegebenen Flächeninformationen aus dem ATKIS Basis-DLM auch bei vorliegendem Fortführungsbedarf ausreichendes Vorwissen für die automatische Klassifizierung beinhalten. Wesentliche Aspekte im Hinblick auf eine qualitativ hochwertige Klassifizierung kommen bei dem einfachen Ansatz der Scattergrammauswertung jedoch zu kurz: So hat sich die Einbeziehung von Kontextinformation, also z.B. von der Hypothese, daß für räumlich benachbarte Bildpixel eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer übereinstimmenden Objektklasse anzunehmen ist, als wertvoll erwiesen, vgl. den Überblick von [Sharma und Sarkar 1998]. Hier wird statt der vereinfachten Scattergrammauswertung das Verfahren zur multispektralen Klassifizierung nach [Schulz und Wende 1993] eingesetzt. Es basiert auf dem Grundgedanken der unüberwachten Klassifizierung. Die einzelnen Klassen werden zunächst allein aufgrund der spektralen Merkmalsstruktur gebildet, dabei spielt die n-spektrale Homogenität lokaler Bildbereiche eine zentrale Rolle. (Dieser Aspekt bleibt bei dem oben dargestellten, vereinfachten Auswerteansatz über die Scattergramme unberücksichtigt!) Die Interpretation, also die Identifizierung und Zusammenfassung der Spektralklassen erfolgt erst am Ende des Verarbeitungsprozesses. Dabei können für jede Klasse aber wieder automatisch die entsprechenden Häufigkeiten des Auftretens spektraler Cluster in den Bildern im Vergleich mit den vorliegenden flächenhaften GIS-Objektarten ausgewertet werden. Je nach den resultierenden Verhältniszahlen wird dann eine spektrale Klasse sicher einer Objektart zugeordnet oder als unsicher deklariert und an die interaktive Bearbeitung zur endgültigen Bewertung weitergegeben.

Dieses Verfahren wird nun für die Unterscheidung von Laub- und Nadelholz eingesetzt. Dazu werden die ersten drei Hauptkomponenten der TM-Szene vom 12.8.1997 einbezogen. Aus dem ATKIS Basis-DLM können jetzt nur noch die Flächen mit eindeutiger Attributierung als 'Laubholz' oder 'Nadelholz' als Vorwissen genutzt werden. Das Vorwissen ist in seinem Umfang gegenüber der Waldklassifizierung also reduziert, da weite Flächenbereiche das Vegetationsmerkmal 'Laub- und Nadelholz' aufweisen, vgl. Bild 36(a). Diese Flächen aus dem Basis-DLM können hinsichtlich der spektralen Unterscheidbarkeit von Laub- und Nadelholz natürlich keine Informationen beitragen.

Entsprechend enthält das automatisch generierte Klassifizierungsergebnis in Bild 36(b) auch nur die Objektklassen 'Laubholz' und 'Nadelholz'. Um die scheinbar erheblichen Unterschiede zwischen den Bildern 36(a) und (b) richtig zu interpretieren, müssen die Erfassungsvorschriften aus dem Objektartenkatalog des ATKIS Basis-DLMs gegenwärtig sein: Die Objektart 'Wald, Forst' ist als "Fläche, die mit Forstpflanzen (Waldbäume und Waldsträucher) bestockt ist" definiert, Erfassungskriterium ist eine Ausdehnung der Fläche von > 0.1ha, eine Änderung des Attributwertes des Vegetationsmerkmals wird nur dann berücksichtigt, wenn dadurch Objektteile entstehen, deren Fläche ≥ 10 ha ist [*AdV* 1999]. Insbesondere wegen der im Verhältnis zum Erfassungskriterium recht großzügigen Objektteilbildungsregel ist die Festlegung des Vegetationsmerkmals im ATKIS Basis-DLM maßgeblich von der jeweils gewählten Objektartabgrenzung abhängig. Diese Abgrenzung ist im Satellitenbild meist nicht nachvollziehbar, sei dies auflösungsbedingt, oder weil die Abgrenzung bei der Erfassung des Basis-DLMs unabhängig von der Flächennutzung vorgenommen wurde, vgl. die aus Blattschnittgrenzen o.ä. resultierenden horizontalen und vertikalen Abgrenzungen in Bild 35(c).



Bild 36 – Unterscheidung von Laub- und Nadelholz. (a):Vegetationsmerkmale der Objektarten 'Wald, Forst' und 'Gehölz' des ATKIS Basis-DLM (b):Ergebnis der multispektralen Klassifizierung im Hinblick auf die Vegetationsmerkmale 'Laubholz' und 'Nadelholz'.

Eine automatisierte Verifizierung der Datenbestände des Basis-DLMs hinsichtlich der Attributierung der einzelnen Flächenstücke kann aufgrund der vorliegenden Klassifizierungsergebnisse dennoch vorgenommen werden. Dann steht allerdings nicht die Überprüfung der einzelnen Objektartgrenzen, sondern allein die tatsächliche Nutzungsart pro Flächenstück im Blickpunkt. Eine entsprechende Verifizierung wurde hier im Hinblick auf kleinere Ergebnismaßstäbe als 1:25 000 durchgeführt. Dabei wurden nicht die teilweise sehr kleinen Flächenstücke des Basis-DLMs zugrundegelegt, sondern direkt benachbarte Flächenstücke des Basis-DLMs mit übereinstimmendem Vegetationsmerkmal wurden vorab zusammengefaßt. Anschließend wurden pro Flächenstück die jeweils als Laub- oder Nadelholz klassifizierten Pixel ausgezählt, die Darstellungen in den Bildern 37(a) und (b) und 38 sind nach den drei ATKIS-Vegetationsmerkmalen aufgeschlüsselt. Es zeigt sich, daß die Festlegung der Vegetationsmerkmale 'Laubholz' und 'Nadelholz' im Basis-DLM in der überwiegenden Zahl der Fälle durch das Klassifizierungsergebnis bestätigt wird, Bild 37(a) und (b). Die interaktive Kontrolle kann sich auf die vereinzelten Ausreißer beschränken. Die Waldflächen mit dem Vegetationsmerkmal 'Laub- und Nadelholz' im Basis-DLM sind dagegen nach dem Klassifizierungsergebnis deutlich von Laubholzflächen dominiert, Bild 38. Dies deutet in der Regel sicher nicht unbedingt auf Fortführungsbedarf hin, sondern eher auf ein landschaftliches Charakteristikum dieses Abschnittes des Taunus. Der oben zitierte Spielraum in den Festlegungen für den Objektbereich 'Vegetation' im ATKIS-OK läßt derartige Spielräume durchaus zu und wurde bei der Erfassung wohl sinngemäß angewandt.



Bild 37 – Verifizierung der Vegetationsmerkmale 'Laubholz' und 'Nadelholz' in Waldgebieten: (a): Einzelflächenbezogene Trefferquote der Klassifizierung bei der Nutzungsart 'Laubholz'. (b): Einzelflächenbezogene Trefferquote der Klassifizierung bei der Nutzungsart 'Nadelholz'.



Bild 38 – Verifizierung des Vegetationsmerkmals 'Laub- und Nadelholz' in Waldgebieten: Einzelflächenbezogene Trefferquote der Klassifizierung bei der Nutzungsart 'Laub- und Nadelholz'.

Zusammenfassend soll darauf hingewiesen werden, daß der Waldnutzung in den klassischen topographischen Kartenwerken eine ausgezeichnete Rolle zugewiesen wird, denn sie wird in der Regel mittels einer flächenhaften Farbgebung hervorgehoben. Diese Ausnahmestellung für den Wald ist gerechtfertigt, gliedert er doch auf einzigartige Weise die mitteleuropäische Kulturlandschaft. In Bild 36 werden zwei auf unterschiedlichen Erhebungsarten und -maßstäben beruhende Darstellungen dieser Waldflächen angeboten. Im Hinblick auf die Modellgeneralisierung und die Laufendhaltung kleinmaßstäbiger Geodatenbasen in den Maßstabsbereichen 1:50 000 bis 1:250 000 können beide Darstellungsvarianten unterschiedliche Qualitäten in den Arbeitsprozeß einbringen. Seitens des Klassifizierungsergebnisses ist hier zu allererst der Punkt Aktualität hervorzuheben. Ferner weisen die Klassifizierungsergebnisse aber auch eine interessante Charakteristik hinsichtlich ihres Generalisierungsgrades auf, denn im Gegensatz zu den stark generalisierten Waldnutzungsarten des Basis-DLMs liegt hier lediglich eine Erfassungsgeneralisierung entsprechend der verwendeten Bodenpixelgrößen vor. Sollen beispielsweise die Vegetationsmerkmale 'Laubholz' und 'Nadelholz' in einen Folgemaßstab übernommen werden, so bieten die Klassifizierungsergebnisse vielfach eine günstigere Ausgangsbasis als die Daten des Basis-DLMs, um eine landschaftstypisch korrekte Darstellung der Nutzungsarten abzuleiten. Ein markantes Beispiel ist der von Nadelwald dominierte Höhenzug im Norden des Testgebietes, der bei einer Generalisierung aufgrund der ATKIS-Daten allein so nicht mehr zum Vorschein treten wird. Ein synergetisches Zusammenwirken von Geobasisdaten und Fernerkundungsdaten für die Modellgenerierung wird daher als vorteilhaft erachtet.

5 Extraktion und Klassifizierung linienhafter Objekte

Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der *automatischen Linienerkennung und -vektorisierung*, aufbauend auf der integrativen Nutzung von multispektralen und panchromatischen IRS-1C-Bilddaten. Primäres Ziel der automatischen Linienerkennung ist die selektive Extraktion von Verkehrswegen. Es wird davon ausgegangen, daß Verkehrswege zum großen Teil als Linien im Satellitenbild erscheinen. Darüber hinaus sind sie von anderen linienhaften Objektarten abzugrenzen.

Grundgedanke ist die Nutzung multispektraler Information für die Linienextraktion, also die Verwendung mehrerer multispektraler Kanäle anstelle eines panchromatischen Kanals, wobei alle extrahierten Linien abschließend geeignet zusammengefaßt werden, vgl. [*Busch* 1996]. Der Übergang auf die mehrkanaligen Basisdaten ermöglicht weiterhin eine Differenzierung der gefundenen Linienelemente aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften. Über den Weg der automatischen multispektralen Klassifizierung sollen linienhafte Verkehrswege von anderen linienhaften Objekten wie z.B. Schneisen oder schmalen Ackerstreifen getrennt werden. Grundsätzlich sind zwei etwas unterschiedliche Strategien denkbar: Zum einen erfolgt zunächst die Auswahl möglichst dominanter Linienstrukturen, welche dann als Trainingsgebiete in die multispektrale Klassifizierung eingeführt werden – Verkehrswege werden dann über ihre Zugehörigkeit zu den entsprechenden Clustern aus der Klassifizierung gefunden. Zum anderen wird vorab ein möglichst vollständiger Satz aller potentiellen Linienpixel gesammelt, mit der sich anschließenden Klassifizierung dann nur noch eine Untermenge aus dieser Gesamtheit aller Linienpixel selektiert.

Die automatische Extraktion von Verkehrswegen wird erheblich erleichtert, wenn man tendentiell einfach zu erkennende Objektarten mit ähnlichen Charakteristika vorab klassifiziert und damit für die Verkehrswegeselektion a priori ausschließen kann. Typische Beispiele sind die Extraktion von Gewässerlinien, da Gewässer aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften in der Regel vollautomatisch mit hoher Trefferquote klassifiziert werden können. Ein weiteres Beispiel stellen geschlossene Siedlungsgebiete dar. Diese lassen sich über Texturmerkmale relativ gut abgrenzen. Sie weisen aber auch zahlreiche, wenn auch meist kurze, linienhafte Strukturen auf und enthalten zu einem hohen Prozentsatz Pixel mit den spektralen Signaturen von Verkehrswegen. Obwohl Verkehrswege innerhalb geschlossener Ortschaften bei der vorliegenden Auflösung der Satellitenbilddaten nur in Ausnahmefällen klar abgegrenzt werden können, geben die automatischen Extraktionsstrategien zahlreiche Hinweise auf das mögliche Vorhandensein von Verkehrswegen in diesen Gebieten. Es ist daher sinnvoll, sich bei der linienhaften Verkehrswegeerkennung bei Bodenpixelgrößen von größer $5 \times 5m^2$ auf außerörtliche Verkehrsverbindungen zu konzentrieren und die Abgrenzung von Siedlungsgebieten in einem getrennten Schritt vorzunehmen, vgl. hierzu [*Busch* 1998].

Natürlich stellt die automatische Extraktion der geschlossenen Siedlungsgebiete bereits in sich ein wichtiges und erfolgreich einsetzbares Werkzeug dar, insbesondere im Hinblick auf die automatisierte Fortführung von Siedlungsumrissen in kleinmaßstäbigen digitalen Geodatenbasen. Im Zusammenhang mit der Linienextraktion wird durch die Unterscheidung von Siedlungsgebieten und Außenbereich eine erste Einbeziehung von Kontextinformation im Sinne der Forderungen von [*Strat* 1995] für die Steuerung von Extraktionsalgorithmen vorgenommen: Innerhalb und außerhalb geschlossener Siedlungsbereiche führen *unterschiedliche* Strategien zum Ziel der Verkehrswegeerkennung. (Speziell auf der Grundlage der IRS-1C-Bilddaten kann bzw. darf hier aufgrund der unzureichenden Bodenpixelgröße innerhalb von Siedlungsgebieten keine sichere Extraktion von Straßen erwartet bzw. angestrebt werden.) Eine ähnliche Abgrenzung eines globalen Kontextes wird beispielsweise von [*Baumgartner et al.* 1999] für die Straßenextraktion aus panchromatischen Luftbildern (Bodenpixelgröße 0.2 bis 0.5*m*) angesetzt, dort werden 'Siedlung', 'Wald' und 'Offene Landschaft' unterschieden.

Die Darstellung in diesem Kapitel ist gegliedert hinsichtlich der Erkennung von Fließgewässern, Siedlungsgebieten und außerörtlichen Verkehrswegen. Da das AKTIS Basis-DLM für das Testgebiet *Frankfurt am Main West* erst gegen Ende der entsprechenden Projektarbeiten zur Verfügung stand, mußte anfangs ersatzweise auf die digitale Fassung der Topographischen Karte 1:50 000 des Hessischen Landesvermessungsamtes zurückgegriffen werden, welche in Form von getrennt gescannten Farbfolien vorlag. Durch die generalisierte Einzelgebäudedarstellung ist die TK50 aber eine umständlich zu handhabende Referenz, was den Soll-Ist Vergleich der extrahierten Gebäudedaten angeht. Die Siedlungserkennung wird daher in Kap. 6 noch einmal kurz aufgegriffen werden, und zwar im Hinblick auf die ergänzende Einbeziehung spektraler Merkmale, welche speziell auf die Erkennung schwach texturierter Industrieund Gewerbeflächen abzielt.

5.1 Erkennung von Fließgewässern

Einige linienhafte Objekte lassen sich in den multispektralen Bildern IRS-1C LISS allein aufgrund ihrer spektralen Charakteristika global abgrenzen. Dies gilt insbesondere für die linienhaften Fließgewässer, soweit sie ausreichend aufgelöst werden. Dementsprechend ist im vorliegenden Testgebiet die automatische Erkennung des Mains unproblematisch. Sie wird daher hier nicht separat dargestellt, sondern in Kap. 5.3 kurz behandelt.

Für die kleineren Nebenflüsse, wie beispielsweise die Nidda, trifft dies nicht mehr zu, da diese in den multispektralen Bilddaten nur unzureichend aufgelöst werden. Auch die automatische Klassifizierung – speziell im Hinblick auf diesen Gewässertyp – in den kombinierten Bildern mit der rechnerisch erhöhten Auflösung, vgl. Bild 10(c) auf S. 26, erwies sich als unbefriedigend, obwohl die Möglichkeit zur visuellen Interpretation weitgehend vorliegt. Die entsprechenden Untersuchungen wurden frühzeitig abgebrochen, da sie nur ein Randgebiet der Aufgabenstellung darstellen. Es kann aber bereits festgehalten werden, daß weiteren Untersuchungen eine radiometrische Korrektur der panchromatischen Ausgangsdaten vorangestellt werden sollte, z.B. entsprechend der Vorgehensweise von [*Reinartz et al.* 1997].

5.2 Erkennung von Siedlungsgebieten anhand von Texturmerkmalen

Im Gegensatz zur Erkennung der Fließgewässer wird die Verkehrswegeextraktion durchaus von dem jeweils vorliegenden globalen Kontext beeinflußt. Die visuelle Betrachtung macht sofort deutlich, daß Verkehrswege innerhalb geschlossener Siedlungsgebiete in der Regel nicht sicher und vollständig abgrenzbar sind, während sie in der offenen Feldlage vielfach gut interpretierbar sind; dies gilt mit gewissen Eingeschränkungen ebenso für Waldgebiete. Da sowohl innerhalb als auch außerhalb von Siedlungsgebieten ähnliche spektrale Signaturen in den Bereichen von Verkehrswegen zu erwarten sind, soll der gewählte Lösungsansatz für die Linienerkennung, also die Linienextraktion samt ergänzender Integration multispektraler Informationen, vgl. Kap. 5.3, durch die Vorgabe globaler Kontextinformation abgesichert werden.

Die gewählte Vorgehensweise bezieht Siedlungsgebiete aus vorliegenden GIS-Daten mit ein. Konkret werden Siedlungsumrisse und -signaturen aus der *Joint Operations Graphic* (JOG) 1:250 000 eingesetzt, um Trainingsgebiete für die Unterscheidung von Siedlungsgebieten gegenüber Außenbereichen zu erhalten, vgl. die ausführliche Darstellung in Abschnitt 4.1 und insbesondere Bild 30 auf S. 48. Wie bereits dargelegt, unterscheidet sich die Geometrie der kleinmaßstäbigen Kartengraphikdaten lokal von der der Bilddaten aufgrund von Fortführungsbedarf und Generalisierung.

Die Extraktion der Siedlungsgebiete selbst wird über einen Interestoperator vorgenommen, der auf einer punktweisen Analyse der lokalen Krümmungsverhältnisse der Grauwertoberfläche aufbaut, vgl. [*Busch* 1998]. Die lokale Dichte der resultierenden Punktobjekte, vgl. Bild 39(a) und 39(b), wird als Indikator für die Objektklasse 'Siedlung' verwendet. Anhand der absoluten Häufigkeiten der Punktobjektdichten in den vorgegebenen Trainingsgebieten für die Bereiche Siedlung und Außenbereich kann der Schwellwert für die Trennung der beiden Objektklassen automatisch gewählt werden, vgl. die Darstellung der beiden Histogramme in Bild 39(c). Die verbleibenden Resthäufigkeiten jenseits des gewählten Schwellwerts können für eine Fehlerabschätzung herangezogen werden. Eine derartige Abschätzung ist zu pessimi-



Bild 39 – Automatische Extraktion der Objektklasse 'Siedlung'. (a): Extrahierte Punktobjekte. (b): Bestimmung der lokalen Punktobjektdichte bezüglich eines 25×25 Pixel großen Fensters (c): Absolute Häufigkeiten der Punktobjektdichten in den Trainingsgebieten (vgl. Bild 30) für Siedlung und Außenbereich.

stisch, wenn die automatisch gewählten Trainingsgebiete fehlerbehaftet sind. Im vorliegenden Beispiel enthalten die Trainingsgebiete für die Siedlungsgebiete auch einige homogen wirkende Bereiche der Flußauen der Nidda, wohingegen die Gebäudekomplexe im Bereich des Frankfurter Flughafens sämtlich zum Trainigsbereich für den Außenbereich zählen. Wird der aus Bild 39(c) gewonnene Schwellwert zur Selektion von Siedlungsgebieten aus den zuvor bestimmten Punktobjektdichten (Bild 39(b)) herangezogen, so erhält man zunächst die in Bild 40(a) dargestellten Regionen. Je nach dem angestrebten Ergebnisses sinnvoll. Hier werden zunächst kleine Löcher in den Siedlungsbereichen gefüllt, vgl. Bild 40(b). Anschließend werden noch sehr kleine Regionen eliminiert. Die Umrisse der derart gewonnenen Siedlungsgebiete werden abschließend den Orthobilddaten für eine visuelle Kontrolle und eventuelle Nacharbeit überlagert, vgl. Bild 41 und 42.



(a)

(b)

Bild 40 – Automatische Bereinigung der erkannten Siedlungsbereiche. (a): Siedlungsgebiete aufgrund der Histogrammanalyse von Bild 39(c). (b): Siedlungsgebiete nach dem Auffüllen kleiner Löcher (Δz und $\Delta s < 100 Pixel$)

Das Beispiel macht deutlich, daß die automatisch erzielten Ergebnisse für kartographische Darstellungen im Maßstabsbereich 1:200 000 bis 1:250 000 gut geeignet sind. Die Abgrenzung der gefundenen Siedlungsregionen ist detailreicher als für die kleinmaßstäbige Darstellung notwendig. Als Nachbearbeitung ist daher meist nur ein weiter vereinfachender Generalisierungsschritt angebracht.

Die Unterscheidbarkeit der Gebäudekomplexe hinsichtlich ihrer Bedeutung wurde im Rahmen des Projektes nicht untersucht. Dieses Problem ist allein anhand von Luft- und Satellitenbildern nicht lösbar. Möglicherweise kann das verwendete Verfahren anhand eines zusätzlichen Schwellwerts Flächen unterscheiden, die durch größere oder kleinere Gebäude geprägt sind. So könnte ein grobe Unterteilung in Wohn- und Industriefläche erreicht werden. Weiterhin kann man in den Bildern 42(a)-(c) feststellen, daß Industriegebiete und Sportanlagen teilweise nicht vollständig erkannt werden. Dies hat seine Ursache darin, daß ausgedehnte einzelne Hallen, insbesondere am Rand von Siedlungsgebieten, auf dem Weg über die Punktobjektdichte aufgrund schwächer ausgeprägter Textur dem Außenbereich zugeschlagen werden. Hierdurch kann im Einzelfall Korrekturbedarf entstehen, wenn beispielsweise wie in Bild 42(c) rechts unten ein Industriegebiet nur in unabhängigen Teilstücken erkannt wird (in den Bildern 40(a) und (b) sind diese noch enthalten), welche dann aufgrund ihrer zu geringen Ausdehnung im Rahmen der au-



Bild 41 – Ergebnis der automatischen Siedlungserkennung: Siedlungsgebiete sind gelb umrandet, hinterlegt ist das Orthobild aus den panchromatischen IRS-1C-Bilddaten.

tomatischen Bereinigung sämtlich eliminiert werden, (in Bild 41 sind sie nicht mehr enthalten). Auch das Tanklager in Bild 42(a) wird beispielsweise zunächst als bebautes Gebiet erkannt, bei der automatischen Bereinigung aber aufgrund der zu geringen räumlichen Ausdehnung für eine Darstellung im Maßstab 1:200 000 konsequenterweise wieder eliminiert. Die automatische Detektion und richtige Zuordnung von Kleingartenanlagen, Friedhöfen oder Sportanlagen am Rand oder außerhalb von Siedlungen ist im Rahmen des eingeschlagenen Erkennungsverfahrens nicht möglich. Diese Flächen sind nicht stark genug durch Gebäude geprägt und sind im genutzten Bildmaterial durch die lokale Textur nicht eindeutig beschreibbar. Ferner fällt auf, daß das Erkennungsvergebnis im Taunus etwas an Qualität verliert. Dies



(a)



(b)



(c)

Bild 42 – Ergebnisbeispiele zur automatischen Siedlungserkennung: Siedlungsgebiete sind rot umrandet, hinterlegt ist das Orthobild als Naturfarbkomposite. (a): Ausschnitt *Raunheim*. (b): Ausschnitt *Steinbach (Taunus)*. (c): Ausschnitt *Krifteler Dreieck*.

betrifft jedoch stets Flächen, die in den genutzten GIS-Daten nur durch ein Kreissymbol dargestellt sind und deshalb nicht zu den Trainingsgebieten (vgl. Kap. 4.1) beitragen. Die in Kap. 5.3 erzielten Ergebnisse weisen nach, daß die Kombination mit multispektraler Bildinformation die Erkennungsgenauigkeit steigert und Anwendungsmöglichkeiten in mittleren Maßstäben eröffnet.

Für zukünftige großflächige (z.B. bundesweite) Auswertungen erscheint es sinnvoll, die Parameter für die automatische Erkennung jeweils getrennt für in etwa homogene Regionen zu bestimmen, also beispielsweise separat für den von Waldflächen geprägten Taunus und die von agrarischer Nutzung bestimmte Wetterau. Der Gedanke des globalen Kontextes ist also in einem hierarchischem Sinne zu erweitern – diesen Grundgedanken behandelt beispielsweise [*Mayer* 1998] in ähnlicher Form unter dem Begriff der Multiskalenräume.

5.3 Linienextraktion und Klassifizierung im Hinblick auf außerörtliche Verkehrswege

Der hier eingesetzte Linienerkennungsansatz baut auf der Linienextraktion in den einzelnen Multispektralkanälen auf. Hier werden in den Bildkanälen der roten und grünen Spektralbereiche von IRS-1C LISS helle Linien, im nahen Infrarotbereich dagegen dunkle Linien extrahiert, vgl. Bild 44 und 45 auf den Seiten 69 und 70. Die Beschränkung auf derart vorgegebene Helligkeitsverhältnisse erlaubt im Rahmen der automatischen Vorgehensweise ein schärfer abgegrenztes Ergebnis im Vergleich zur Suche nach beliebig gearteten Linienkandidaten. Die in den Abbildungen dargestellten Knotenelemente treten vor allem in Regionen auf, die durch sehr viele kurze Linien geprägt sind.

Die Überlagerung der aus den einzelnen Kanälen extrahierten Linien deckt u.a. Restfehler der geometrischen Kalibrierung bzw. Registrierung der einzelnen Farbkanäle auf. Der Anschaulichkeit halber werden in Bild 43 die vorläufigen Ergebnisse *ohne* die in Kap. 2.1 beschriebene Korrektur des Versatzes des Rotkanals von IRS-1C LISS gegenüber Infrarot- und Grünkanal wiedergegeben. Das erhebliche Potential einer auf Linienobjekten (*line features*) basierenden geometrischen Registrierung der Multispektralkanäle gegenüber der zur Zeit zur Verfügung stehenden grauwertbasierten Zuordungsvariante ist offenkundig.

Weiterhin zeigt sich am Beispiel des unkorrigierten Rotkanals, daß trotz der geometrischen Verschiebung in der Größenordnung eines halben Pixels eine brauchbare Zusammenfassung und Vereinheitlichung zu einem unitären Vektordatensatz bei Vorgabe entsprechender Toleranzen automatisch gelingt, vgl. wiederum Bild 43. Dieser Verfahrensschritt wurde hier über die vektordefinierten *snap*-Funktionen von *ArcInfo* vollzogen. Er ist dann von Bedeutung, wenn die prinzipiell subpixelgenau vorliegende Linieninformation in ihrer vollen geometrischen Genauigkeit weiterverarbeitet bzw. erhalten werden soll. Er ist nicht erforderlich, wenn für die gesamte Folgeverarbeitung die einfache Pixelgenauigkeit ausreicht. Dann ist die einfachere, aber mit dem Verlust der Subpixelgenauigkeit verbundene Vektor-Raster-Wandlung direkt durchzuführen.

Aufbauend auf den extrahierten Linienelementen wird nun die vorliegende Multispektralinformation für die Linien*erkennung* eingesetzt. Bei der hier zunächst beschriebenen Lösungsvariante werden die vorliegenden Linienelemente als Vorauswahl von Trainingsgebieten für eine automatische Klassifizierung im Sinne von [*Schulz* und *Wende* 1993] eingeführt. Die Kernaussage von [*Schulz* und *Wende* 1993] besteht in der strikten Trennung der statistisch-spektralen von der thematischen Sicht. Dies bedeutet, daß die (automatisch zu findenden) Trainingsgebiete zunächst rein statistisch-spektralen Anforderungen zu genügen haben, während die Bildung thematischer Klassen erst *a posteriori* auf der Basis automatisch klassifizierter spektraler Klassen durchgeführt werden darf. Dabei wird der Aspekt einer Verschmelzung von Klassen aber nicht nur für die abschließende thematische Sicht, sondern auch für die spektrale Sicht definiert und vorgesehen.

Während die Suche nach spektral homogen Trainingsgebieten von [Schulz und Wende 1993] flächenhaft für eine quadratische Pixelumgebung realisiert wurde, wird nunmehr nach spektraler Homogenität entlang der extrahierten und anschließend vereinigten Linienelemente gesucht. Während bei der flächen-



Bild 43 – Zusammenfassung der Vektordaten und Auswirkung des Versatzes des Rotkanals von IRS-1C LISS gegenüber Infrarot- und Grünkanal bei der Linienextraktion aus den einzelnen Multispektralkanälen. (–): Aus NIR- und Grünkanal extrahierte Linien. (–): Aus dem Rotkanal extrahierte Linien. (–): Als unitärer Vektordatensatz zusammengefaßte Linien. (a): Bsp. *Wiesbadener Kreuz*, (b): Bsp. *Flughafen Frankfurt am Main*.

haft realisierten Variante die Ausdehnung der Suchmatrix vorgegeben wurde, für welche spektrale Homogenität gefordert wurde, so wird nun die minimale Länge des Linienzuges gewählt, für welche die Forderungen der Homogenität zu erfüllen sind. Diese sind im einzelnen:

- 1. Eine vorzugebende Streuung der kanalweise untersuchten Grauwerte innerhalb des Linienzuges wird nicht überschritten.
- 2. Die von dieser Streuung abhängigen diskreten Schwellwerte der Normalverteilung werden eingehalten (68%, 95% 99% der Pixelgrauwerte liegen innerhalb der ein-, zwei-, dreifachen Streuung um den Mittelwert).
- 3. Die Häufigkeit der Verbesserung, deren Betrag nahe bei Null liegt, erreicht mindestens den aus der vorgegebenen Streuung berechneten theoretischen Wert.

Das entsprechende Softwaremodul wurde in die XPACE-Umgebung der Bildverarbeitungssoftware EA-SI/PACE der Firma *PCI* eingebettet.

Die Darstellungen der extrahierten und anschließend vereinigten Linienelemente zeigt in der Aufschlüsselung nach der Länge der einzelnen Linienzüge, vgl. Bild 46, welche Linienzüge (in all ihren möglichen Teilbereichen) als Kandidaten für spektral homogene Trainingsgebiete einer bestimmten Mindestlänge jeweils zur Verfügung stehen. Für die automatische Klassifizierung werden neben der Wahl der Ausdehnung der spektral homogenen Bereiche hier die Steuerungsparameter aus Tab. 6 verwendet. Die automatische Aggregation von spektralen Klassen erfolgt also nur in moderatem Umfang aufgrund des Grenzabstandes für die *a posteriori*-Verschmelzung zweier Cluster. Die sich anschließende Verschmelzung von spektralen zu thematischen Klassen wird manuell vorgenommen. Der dabei erforderliche Aufwand hängt stark von den jeweils als Kandidaten vorgegebenen Trainingsgebieten ab, also von der vorgegebenen Länge der Linienteilstücke, welche automatisch auf Homogenität untersucht werden. Tab. 7 macht diesen Sachverhalt deutlich.



Bild 44 – Extraktion heller Linien mit einer Suchfenstergröße von 5×5 Pixel bei einem Signifikanzniveau von 20% und schwacher Glättung der Grauwerte (Gauß-Maske). (–): Extrahierte Linien, (–): Extrahierte Knoten. Szene: Orthobildkanal IRS-1C LISS (grün) vom 24.4.1997.

Werden sehr viele Linienelemente als Kandidaten für die Trainingsgebietsuche zugelassen, so werden zahlreiche Cluster gefunden, die abschließend manuell wieder aussortiert werden müssen. Als Beispiel vgl. Bild 46(a): Alle Linienelemente ab einer Länge von 9 Pixeln werden als Kandidaten für die Trainingsgebietsuche zugelassen, abschließend erweisen sich nach Tab. 7 zwölf von zweiundzwanzig gefunden spektralen Klassen als uninteressant, vgl. die grau dargestellten Bereiche in Bild 47(a). Weiterhin zeigt sich, daß auch eine äußerst begrenzte Vorgabe von Trainingsgebieten wie in Bild 46(c) oder 46(d) keine Unterscheidung von bestimmten Bereichen in Siedlungsgebieten sowie außerörtlich verlaufenden



Bild 45 – Extraktion dunkler Linien mit einer Suchfenstergröße von 5×5 Pixel bei einem Signifikanzniveau von 20% und schwacher Glättung der Grauwerte (Gauß-Maske). (–): Extrahierte Linien, (–): Extrahierte Knoten. Szene: Orthobildkanal IRS-1C LISS (NIR) vom 24.4.1997.

Straßen möglich macht – hier liegt offensichtlich keine spektrale Unterscheidbarkeit vor, vgl. Bild 47(c) und 47(d). Allerdings können einzelne Straßen innerhalb der geschlossenen Siedlungsgebiete auch nicht klar abgegrenzt werden. Die Notwendigkeit einer separaten Abgrenzung von Siedlungsgebieten wurde aber bereits vorweggenommen und in Kap. 5.2 erfolgreich gelöst.

Beim Übergang von Linienlänge 36 auf 25 läßt sich nach Tab. 7 ein Informationszuwachs hinsichtlich der gefundenen Straßenpixel vermuten. Es zeigt sich aber bei näherer Analyse, daß hier in weiten Teilen
Max. zulässige Streuung entlang eines Linienteilstücks der vorgegebenen Länge:	2.5
Grenzabstand für die Fusion von zwei Trainingsgebieten:	0.8
Grenzabstand für die Fusion eines Pixels zu einem Cluster:	5.7
Grenzabstand für die a posteriori-Verschmelzung zweier Cluster:	3.0

Tabelle 6 – Steuerparameter für die automatische Klassifizierung zu Bild 47. Die Berechung der Abstandsmaße erfolgt nach [*Schulz* und *Wende* 1993].

Training	gsgebiete	thematische Klass					te thematische Klassen				
Linienlänge	vgl.	Straße/Siedlung		ng Gewässer		Uneindeutig		Sonstiges			
größer	Bild:	Klassen	Pixel	Klassen	Pixel	Klassen	Pixel	Klassen	Pixel		
9	46(a), 47(a)	6	105251	3	3837	1	2969	12	121021		
25	46(b), 47(b)	5	115441	2	3571	-	0	8	63100		
36	46(c), 47(c)	3	80246	1	3374	1	4791	1	704		
49	46(d), 47(d)	3	80444	1	3374	_	0	1	704		

Tabelle 7 – Automatische Klassifizierung mit unterschiedlichen Vorgaben (Linienlänge) für die Wahl spektral homogener Trainingsgebiete. Die angegebene Anzahl von Klassen gibt den Stand nach der spektral motivierten Verschmelzung wieder, diese Klassen bilden gemeinsam eine thematische Klasse mit der angegebenen Anzahl an beteiligten Pixeln.

Pixel innerhalb der geschlossenen Siedlungsbereiche ergänzt werden, wodurch sich im Hinblick auf die außerörtlichen Verkehrswege kaum ein Informationszuwachs ergibt. Damit reicht die begrenzte Vorgabe weniger, aber klar zum thematischen Komplex der Verkehrswege gehörenden Trainingsgebiete bei diesem Beispiel aus. Die manuelle Bildung thematischer Klassen, wie sie für die Linienlängen 9 und 25 vorzunehmen war, ist damit verzichtbar. Trotzdem bleibt für die automatische Bestimmung der Straßenbzw. Siedlungsbereiche genug Spielraum im Hinblick auf eine vollautomatische Erkennung, da die Zwischenergebnisse für die Linienlängen von 36 und 49 als gleichwertig eingestuft werden dürfen.

Man gelangt zu einer alternativen Lösungsvariante, wenn man die Linienerkennung durch multispektrale Klassifikation von vornherein auf die Summe der extrahierten Linienpixel beschränkt. Diese Alternative wurde hier ergänzend untersucht, weil sie die Möglichkeit bietet, die subpixelgenau in einer Vektordarstellung vorliegenden Linien einerseits über die multispektrale Information in spektrale und dann auch thematische Klassen aufzuteilen, andererseits aber auch die hochgenaue Lageinformation der Linienextraktion beibehalten zu können. Nachteilig ist dabei natürlich, daß die Linienkandidaten möglichst komplett vorzugeben sind – hier sind also auch kurze Linienstücke unbedingt mit einzubeziehen.[†] Dagegen hat man bei der Auswahl der Kandidaten für die Trainingsgebiete wieder ähnliche Freiheiten wie bei dem zuvor vorgeschlagenen Lösungsweg.

Sowohl bei der flächenhaften als auch bei der auf die Linienpixel beschränkten Lösungsvariante erhält man das Endergebnis der Linienerkennung durch die Einbeziehung globaler Kontextinformation. Hier wird auf die zuvor aus den panchromatischen IRS-1C-Bildern extrahierten Siedlungsgebiete zurückgegriffen, wobei Bild 40(b) als Maske für die Trennung von inner- und außerörtlichen Verkehrswegepixeln verwendet wird. Auf den bereinigenden Generalisierungsschritt der Elimination kleiner Gebiete wird also im Rahmen der Maskenbildung verzichtet, wie die in Kap. 5.2 diskutierten Erfahrungen nahelegen.

Einen Überblick über die Gesamtergebnisse liefern Bild 49 und 50. Aus Gründen der visuellen Erkennbarkeit wurden alle klassifizierten Verkehrswege-Pixel über morphologische Operationen vergrößert. Es

[†]Wünschenswert wäre die Linienextraktion direkt im Bildraum, mit anschließender Übertragung der berechneten Vektoren im Zuge der Orthobildberechnung. Die softwaretechnische Möglichkeit der Übertragung von Vektordaten unter Nutzung der photogrammetrischen Projektionsgleichungen ist aber mit der Version *OrthoEngine SE 6.2* der Firma *PCI* noch nicht gegeben. *PCI Geomatics Group* hat aber zugesagt, sich der Fragestellung anzunehmen.



Bild 46 – Extrahierte und anschließend vereinigte Linienzüge aus den Kanälen von IRS-1C LISS, dargestellt in Abhängigkeit von der Länge ℓ der Linienzüge in Pixeleinheiten.

zeigt sich, daß die Autobahnen im Testgebiet weitgehend vollständig erkannt wurden. Da die Gesamtergebnisse in den Darstellungen Bild 49 und 50 nur stark vergröbert wiedergegeben werden können, konzentriert sich die weitere Diskussion auf den in Bild 51 und 52 dargestellten Ausschnitt – hier ist das pixelweise Klassifikationsergebnis noch deutlich erkennbar. Die verbliebenen Siedlungs- bzw. Verkehrswege-Pixel sind bei beiden vorgestellten Varianten zu einem hohen Prozentsatz mehrspurigen Fernverkehrsstraßen zugehörig und somit erfolgreich klassifiziert. Eine weitere große Gruppe der als Siedlungs- bzw. Verkehrswege-Pixel klassifizierten Pixel spiegelt die genannte Schwäche der Siedlungs-



(a): $\ell = 9$



(b): $\ell = 25$



(c): $\ell = 36$

(d): $\ell = 49$

Bild 47 – Zwischenergebnis nach der thematischen Verschmelzung der automatisch klassifizierten spektralen Cluster. Klassifizierungsergebnis je nach Vorgabe der Linienzuglänge ℓ für spektral homogene Trainingsgebiete, vgl. Tab. 7. (\blacksquare): Straße/Siedlung, (\blacksquare): Gewässer, (\blacksquare): Uneindeutig, (\blacksquare): Sonstiges.

umrißbestimmung wider, sofern sich die Siedlungsumrißbestimmung allein auf den beschriebenen Weg über die Punktobjektdichtenbestimmung in den panchromatischen Bilddaten beschränkt. Dies deutet darauf hin, daß die aus den panchromatischen Daten gewonnene Siedlungsinformation durch die aus den multispektralen Bildern gewonnene Information synergetisch verbessert werden kann, z.B. über ein durch das Klassifikationsergebnis gestütztes Regionenwachstumsverfahren.



Bild 48 – Linienerkennung unter Beschränkung auf die Klassifikation von Linienpixeln. (a): Vorgabe von Linienpixeln als potentielle Verkehrswegepixel. (b): Als Verkehrswege klassifizierte Linienpixel (

Haupt- und Nebenstraßen sowie Eisenbahnlinien werden nur in Ausnahmefällen erkannt. Die Ursache ist darin zu suchen, daß die Auflösung der panchromatischen Bilddaten für den multispektralen Erkennungsansatz nicht genutzt werden kann. Eine automatische Klassifizierung auf der Basis der fusionierten panchromatischen und multispektralen Orthobilder (in der Auflösung der panchromatischen Bilddaten mit $6 \times 6m^2$ Bodenpixelgröße) erwies sich erwartungsgemäß als unzureichend. Dafür ist zum einen die mangelnde radiometrische Qualität der panchromatischen IRS-1C-Bilddaten verantwortlich, unter Umständen könnte hier eine radiometrische Korrektur im Sinne der Vorgehensweise von [*Reinartz et al.* 1997] eine verbesserte Ausgangssituation schaffen. Als Hauptproblem verbleibt aber der enorme Auflösungsunterschied von 4×4 zu einem Pixel zwischen panchromatischen und multispektralen Daten und die damit prinzipiell vorhandene Informationslücke. In diesem Punkt erweisen sich die IRS-1C-Bilddaten gegenüber den ursprünglich vorgesehenen MOMS-2P-Daten mit einem entsprechenden Verhältnis von 2×2 zu eins leider als nicht äquivalente Ersatzdaten.

Die Erkennungsraten der beiden vorgestellten Varianten zur Linienerkennung unterscheiden sich bezüglich der erkannten Fernverkehrswege nur geringfügig. Die Variante der flächenhaften Klassifizierung ist dann zu bevorzugen, wenn auch die Siedlungsumrißbestimmung durch die multispektrale Information zusätzlich verbessert werden soll. Der Vorteil der Klassifikation allein auf den Linienelementen liegt in der Bewahrung des subpixelgenauen Geometriebezugs für alle erkannten Linienstücke.

Die verwendeten Ansätze zur automatischen Linienerkennung vereinigen explizites Modellwissen über die Geometrie (Straßenbreite) und die Radiometrie (Reflexionseigenschaften) von Verkehrswegen. Automatisch erkannte Siedlungsgebiete werden, in Anlehnung an die Begriffswahl von [*Mayer* 1998], im Sinne von globaler Kontextinformation berücksichtigt. Probleme ergeben sich insbesondere durch die zu grobe Auflösung der multispektralen IRS-1C-Bilddaten, die Gesamtheit der Verkehrswege des DLM 250 kann nicht automatisch erkannt, teilweise nicht einmal visuell identifiziert werden. Daraus folgt, daß die Integration von Modellwissen bezüglich der Topologie (Netzstruktur) von Verkehrswegen sowie von lokalem Kontext (z.B.: welche geometrischen Relationen lassen sich zwischen den Objekten 'Gebäude', 'Fahrzeug' und 'Straße' formulieren?) für die Linienerkennung hier nicht erfolgversprechend eingesetzt

werden kann, im Gegensatz zu wesentlich höher aufgelösten digitalisierten Luftbildern. Auch die Einbeziehung von automatisch gewonnener DOM-Information als Zusatzinformation für die automatische Verkehrswegeerkennung ist bei den vorliegenden Pixelgrößen kritisch (es waren von vornherein auch keine stereoskopisch auswertbaren IRS-1C-Bilder gefordert).

Die vorliegende Bildinformation wird also mit der dokumentierten Vorgehensweise weitgehend ausgeschöpft. Eine Gruppierung und Netzbildung könnte als abschließender Schritt noch ergänzt werden, das Gesamtergebnis auf der Basis der multispektralen IRS-1C-Bilddaten wird aber nur in Ausnahmefällen deutlich über das komplette Autobahnnetz hinausgehen. Wesentlich vielversprechender sind die vorliegenden Ergebnisse hinsichtlich der automatischen Siedlungserkennung. Diese ist nach [*Busch* 1997] in engem inhaltlichen Zusammenhang mit der Linienerkennung zu sehen. Im Sinne der Einbeziehung von globaler Kontextinformation wurde die Siedlungserkennung hier eng mit der Linienerkennung verzahnt, um die Abgrenzung außerörtlicher Verkehrswege gegenüber den Siedlungsbereichen zu gewährleisten.

Während sich die Siedlungserkennung in diesem Kapitel rein auf Information aus den panchromatischen Bilddaten beschränkte, wobei auch schon ein beachtlicher Erfolg erzielt werden konnte, so bietet die Ergänzung multispektraler Bildinformationen eine interessante Basis, um die Siedlungserkennung in einigen Problemzonen weiter – auf automatischem Wege – zu verfeinern. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 6.2 noch einmal aufgegriffen werden.



Bild 49 – Endergebnis der flächenhaften Klassifizierung auf Basis der Linienpixel. Für die überblicksartige Darstellung werden die erkannten Verkehrswegepixel **morphologisch vergrößert** und ohne Bereinigung wiedergegeben. (): Siedlungsumrisse, (): Verkehrswegepixel, (): Fließgewässer aus Klassifikation (Rasterdaten). Hinterlegt ist wieder das Orthobild als Naturfarbkomposite.



Bild 50 – Endergebnis der Klassifizierung der Linienpixel. Für die überblicksartige Darstellung werden die erkannten Verkehrswegepixel **morphologisch vergrößert** und ohne Bereinigung wiedergegeben. (■): Siedlungsumrisse, (■): Verkehrswegepixel, (■): Fließgewässer aus Linienextraktion (Vektordaten). Hinterlegt ist wieder das Orthobild als Naturfarbkomposite.



Bild 51 – Endergebnis der flächenhaften Klassifizierung auf Basis der Linienpixel, Ausschnitt *Hofheim am Taunus / Bad Soden am Taunus*. (
): Siedlungsumrisse, (
): Verkehrswegepixel, (
): Fließgewässer aus Klassifikation (Rasterdaten). Hinterlegt ist wieder das Orthobild als Naturfarbkomposite.



Bild 52 – Endergebnis der Klassifizierung der Linienpixel, Ausschnitt *Hofheim am Taunus / Bad Soden am Taunus*. (**■**): Siedlungsumrisse, (**■**): Verkehrswegepixel, (**■**): Fließgewässer aus Linienextraktion (Vektordaten). Hinterlegt ist wieder das Orthobild als Naturfarbkomposite.

6 Extraktion flächenhafter Objekte durch multitemporale Klassifizierung

Eine vollständige Klassifizierung landwirtschaftlicher Kulturarten in Anbaugebieten mit zahlreichen Arten ist nach [*Hildebrandt* 1996] in der Regel nur mit multitemporalen Luftbildern möglich. Im Hinblick auf die Fortführung topographischer Geodatenbasen aus Satellitenbildern ist die Erkennung der Kulturarten zwar nicht von Interesse, dennoch bestehen ähnliche Probleme: Allein aufgrund ihrer spektralen Merkmale lassen sich Grünland- und Ackerflächen je nach Aufnahmezeitpunkt und Wachstumsstand nicht immer sicher von anderen Nutzungsarten abgrenzen. Vor diesem Hintergrund wurden Untersuchungen zur multitemporalen Klassifizierung in das Projekt *UTOMA* mit einbezogen.

Die multitemporale Klassifizierung basiert auf der Auswertung einer Zeitreihe von multispektralen Satellitenbilddaten. Da die Objektoberfläche je nach Aufnahmezeitpunkt in einem mehr oder weniger veränderten Zustand abgebildet wird, läßt die Analyse der entsprechenden spektralen Veränderungen in vielen Fällen interessante Rückschlüsse auf Veränderungen der Objektoberfläche selbst zu. Einen Überblick bezüglich der entsprechenden Basistechniken vermittelt [Singh 1989]. Das Aufdecken von Veränderungen direkt aus den Bilddaten zweier Zeitepochen ist für die Fortführung topographischer Geodaten durchaus von Interesse, auch wenn seitens der Bilddaten zahlreiche Voraussetzungen zu erfüllen sind: Für alle Aufnahmeepochen ist durch weitgehend übereinstimmende Tages- und Jahreszeiten, Bildmaßstäbe, Sensorcharakteristika, etc. ein möglichst wenig verändertes Bild der unverändert gebliebenen Flächennutzungen anzustreben, um die Selektion der kartographisch relevanten Änderungen von den zahlreichen übrigen Effekten effizient und automatisiert durchführen zu können. Gegenüber dieser sog. pre-classification change detection wird heute in der Praxis meist die post-classification change detection bevorzugt, also die Veränderungsdetektion durch den Vergleich zweier Klassifizierungsergebnisse [Metternicht 1999]. Diese Zielrichtung wird im folgenden Abschnitt implizit verfolgt, denn die multitemporale Klassifizierung wird durch eine entsprechende Wahl von (nahe beieinanderliegenden) Aufnahmezeitpunkten dazu eingesetzt, die Ergebnisse für eine Aufnahmeepoche zu verbessern.

Um eine inhaltliche Abgrenzung von der meist auf die Detektion von Veränderungen abzielenden Auswertung multitemporaler Bilddaten zu erreichen wird hier der Terminus *multisaisonale* Klassifizierung vorgeschlagen. Im folgenden wird zunächst auf die Klassifizierung ausgewählter Objektarten des Objektbereichs 'Vegetation' eingegangen. Anschließend wird, wie zuvor bereits angekündigt, die Erkennung von Siedlungsflächen unter Einbeziehung von multispektralen Merkmalen noch einmal kurz aufgegriffen.

6.1 Erkennung von Grünland- und Ackerflächen in multisaisonalen Bilddaten

Für bestimmte Objektklassen sind zeitabhängige Veränderungen objektarttypisch. Diese Veränderungen treten meist zyklisch auf. Tageszeitlich und jahreszeitlich variierende Oberflächeneigenschaften überwiegen, aber auch andere Wiederholungsraten können auftreten. Die multitemporale Klassifizierung kann in solchen Fällen der verbesserten Erkennbarkeit einzelner Objektklassen dienen. Die Abgrenzung von (aus spektraler Sicht) stark variierenden Nutzungsarten gegenüber sich nur unmaßgeblich ändernden Nutzungsarten wird möglich. Dazu ist aber die Klassenzugehörigkeit der beteiligten Nutzungsarten für die gesamte Zeitreihe zunächst als statisch zu betrachten.

Vegetationsflächen sind in der Regel von jahreszeitlich bedingten Veränderungen betroffen. Besonders stark macht sich dies bei ackerbaulich genutzten Flächen bemerkbar. Hier kann oft eine Differenzierung der angebauten Arten je nach Anbauzyklus vorgenommen werden. Die Voraussetzungen für die Trennung von Vegetation und vegetationsfreien Flächen durch die simultane multispektrale Klassifizierung sind damit grundsätzlich gut. Um die statische Klassenzugehörigkeit möglichst weitgehend zu gewährleisten, sollte ein maximaler Zeitraum von einem Jahr nicht überschritten werden. Als weitergehende Rahmenbedingung für die Aufnahmen wird eine zeitlich regelmäßige Verteilung der Aufnahmezeitpunkte gefordert, etwa von Anfang bis Ende der mitteleuropäischen Vegetationsperiode. Für 1997 standen wolkenfreie IRS-1C-Szenen des Testgebietes *Frankfurt am Main West* nur von Terminen in März, April und Oktober zur Verfügung. Die zeitliche Aufnahmelücke im Sommer wurde durch zwei Szenen von LANDSAT TM überbrückt, vgl. Tab. 2 auf S. 23. Die erforderlichen Vorverarbeitungsschritte der multisensoralen Auswertung wie die atmosphärisch und topographisch bedingten Korrekturen und die Überführung aller Bilddaten in ein gemeinsames geometrisches Basissystem wurde nin Kap. 2 diskutiert. Eine noch detailliertere Termininierung nach phänologischen Kriterien würde eine sehr gezielte Beschränkung auf ausgewählte Vegetationsarten und die Berücksichtigung regionaler Kriterien erforderlich machen, dies stünde jedoch in krassem Widerspruch zu dem flächendeckenden und auf Großflächigkeit angelegten Anspruch kartographischer Anwendungen. Weiterhin müßte der Wunsch nach einer noch detaillierteren Termininierung an den z.Zt. starren Aufnahmezyklen der bestehenden Sensorsysteme scheitern, ein gezielter Einsatz je nach lokalen Bewölkungsverhältnissen wird erst für die neuen hochauflösenden Systeme angestrebt werden. Die vorliegenden Daten erfüllen damit seitens der Aufnahmezeitpunkte die an sie im Rahmen der Aufgabenstellung von *UTOMA* zu stellenden Ansprüche.

Die radiometrisch und geometrisch korrigierten Ausgangsdaten werden auf gleichen Mittelwert und Varianz normiert und einer Hauptkomponententransformation unterworfen. Die Beschränkung auf die ersten Hauptkomponenten – diese tragen die wesentliche Bildinformation – ist eine geeignete Datenkompression, mit der sich die objektorientierte Auswahl von Bildkanälen erfolgreich umgehen läßt [*Schulz* 1990]. Wie Tab. 8 (oben) zeigt, wird hier auf die direkte Berechnung einer Hauptkomponententransformierten für *alle* vorliegenden Rohbildkanäle verzichtet, obwohl eine derartige Vorgehensweise in der Literatur mitunter propagiert wird, vgl. z.B. [*Wiemker et al.* 1997] für die Aufgabenstellung der Veränderungsdetektion. Dies hat seinen Grund darin, daß in den multitemporalen Bilddaten zwei zu unterscheidende Typen von Veränderungen zu erwarten sind, nämlich Veränderungen aufgrund von Vegetationszyklen sowie Veränderungen auf Grund von Nutzungsartänderungen. Diesem Vorwissen wird Rechnung getragen, indem nicht die Bilddaten selbst in die Zeitreihenbetrachtung einbezogen werden, sondern die aus ihnen abgeleitete Vegetationsindizees (hier der sog. NDVI = *normalized difference vegetation index*, vgl. [*Hildebrandt* 1996]). Dadurch soll das Erkennungsverfahren insgesamt an Robustheit gegenüber Nutzungsartänderungen innerhalb der Aufnahmeepoche von Frühjahr bis Herbst 1997 gewinnen.

Bilddaten:	Anz.	Varianzen der ersten					
	Kanäle:	Hauptkomponenten:					
korr. Rohdaten, IRS-1C, 2.3.97	3	77.50%	21.45%	1.05%	_	_	_
korr. Rohdaten, IRS-1C, 24.4.97	3	70.49%	28.95%	0.56%	-	_	_
korr. Rohdaten, TM, 12.8.97	6	66.94%	27.89%	3.93%	0.81%	0.34%	0.09%
korr. Rohdaten, TM, 20.9.97	6	72.04%	21.05%	5.49%	0.92%	0.30%	0.20%
korr. Rohdaten, IRS-1C, 28.10.97	3	60.97%	37.84%	1.19%	-	-	_
NDVIs der korr. Rohdaten	5	76.89%	13.83%	4.43%	2.68%	2.18%	_
Standardabweichungsbild							
aller NDVIs	1	100%	_	_	-	_	_
Differenzbilder jahreszeitlich							
benachbarter NDVIs	5	56.61%	17.39%	14.89%	11.11%	0.00%	-
Ratiobilder jahreszeitlich							
benachbarter NDVIs	5	58.19%	36.52%	2.99%	1.17%	1.13%	—

Tabelle 8 - Übersicht zu den potentiellen Ausgangsdaten für die multitemporale Klassifizierung

Aus den NDVIs gewinnt man geeignete Maße für die gesuchten Vegetationsänderungen: Als qualitatives Maß dient die erste Hauptkomponente der NDVIs und als quantitatives Maß die pixelweisen Standardabweichungen der NDVIs, vgl. die mittleren Zeilen in Tab. 8. Ferner können die NDVI-Unterschiede zwischen den einzelnen Aufnahmezeitpunkten auch in einzelnen Differenz- oder Ratiobildern ausgedrückt und anschließend wieder über die Hauptkomponententransformation zusammengefaßt werden, vgl. Tab. 8 (unten). Diese Vorgehensweise erwies sich jedoch als ungünstig, denn die Randbereiche von in den Rohdaten spektral homogenen Flächen weisen in diesen Darstellungen überproportional stark streuende Grauwerte auf. In der Folge werden die Differenz- und Ratiobilder durch ihren generell stark inhomogenen Charakter für die multispektrale Klassifizierung weitgehend unbrauchbar, da im Untersuchungsgebiet generell eine relativ kleinräumige Verteilung der Nutzungsarten vorherrscht. Dies trifft ebenso auf die aus den Differenz- und Ratiobildern resultierenden Hauptkomponenten zu.

Die Klassifizierung der Waldgebiete war ursprünglich ebenfalls im Rahmen der Vegetationserkennung via multitemporaler Klassifizierung geplant gewesen. Es zeigte sich aber, daß bei den vorliegenden Bodenpixelgrößen mit der multitemporalen Vorgehensweise keine nennenswerten Vorteile gegenüber der monotemporalen Klassifizierung erzielt werden konnten. Die multitemporale Klassifizierung im Hinblick auf Waldgebiete ist damit unwirtschaftlich. Wesentliche Veränderungen ergaben sich jedoch aus der Einbeziehung des flächenhaft vorliegenden ATKIS-Vorwissens im Vergleich zur traditionellen Arbeitsweise mit eher kleinflächigen Trainingsgebieten. Diesem Aspekt wurde ein eigenes Kapitel zugebilligt, vgl. insbesondere Abschnitt 4.3. Die Erkennung von Grünland- und Ackerflächen gelingt dagegen mit der monotemporalen Klassifizierung eher unbefriedigend. Für diese Klassifizierungsaufgabe werden daher neben dem ATKIS-Vorwissen die oben angegebenen, aus den multitemporalen Bildern berechneten Zusatzkanäle berücksichtigt, vgl. Bild 53. Ansonsten wird die in Abschnitt 4.3 für die Klassifizierung von Laub- und Nadelholz eingeführte, auf [*Schulz* und *Wende* 1993] aufbauende Vorgehensweise beibehalten.

Die Pseudofarbendarstellung in Bild 53(a) deutet an, daß sich die erkannten Ackerflächen aus mehreren, spektral klar voneinander abgrenzbaren Flächentypen zusammensetzen. Dies spricht dafür, daß wahrscheinlich die Anbauflächen diverser Feldfrüchte unterschieden werden könnten, was aber nicht zu den Zielen dieser Auswertung gehörte. Hier war aus ökonomischen Überlegungen stärker von Interesse, ob sich das in Bild 53(b) vorliegende Ergebnis auch mit einer verringerten Anzahl von Aufnahmezeitpunkten in ähnlicher Qualität erzeugen läßt. Folgende Minimalvoraussetzungen wurden für das vorliegende Beispiel ermittelt: Es sollten für mindestens drei Zeitpunkte die Vegetationsindizes aufgestellt werden können. Dabei müssen die Szene vom 24.4.1997 sowie eine der beiden TM-Szenen aus dem Sommer 1997 beteiligt werden. Weiterhin sollte die erste Hauptkomponente einer dieser drei Szenen die spektralen Rohbildinformationen beisteuern.

Die Klassifizierungsergebnisse wurden mit einer morphologischen Filteroperation nachbearbeitet, diese hatte das Auffüllen kleiner 'Löcher' unter Beibehaltung der Außenränder der detektierten Flächen zum Ziel, Bild 54(a). Für den Vergleich mit den Referenzdaten des ATKIS Basis-DLMs in Bild 54(b) wurden die Objektarten 'Grünland' und 'Ackerland' zusammenfaßt, denn die Entscheidung über Fehlklassifizierung oder Wandel der Nutzungsart (= Fortführungsbedarf) in Bezug auf die Unterscheidung von 'Grünland' und 'Ackerland' konnte in den meisten Fällen auch unter Zuhilfenahme weiterer Informationsquellen (TK25, TK50) nicht zufriedenstellend sicher getroffen werden. Dies deckt sich mit den Erfahrungen anderer Institutionen, wo bei ähnlichen Aufgabenstellungen von vornherein auf die Trennung zwischen 'Grünland' und 'Ackerland' verzichtet wird, vgl. z.B. [*Franzen et al.* 1998], [*Heipke* und *Straub* 1999], [*Petzold* und *Walter* 1999]. Es ist plausibel, daß temporär brachliegendes Ackerland spektral oft nicht von Grünland zu unterscheiden ist.

Nach der Zusammenfassung der Objektarten 'Grünland' und 'Ackerland' ist eine differenziertere Bewertung der Klassifizierungsergebnisse möglich: Einige Flächen werden entgegen den Angaben des ATKIS Basis-DLMs als Acker- und Grünland detektiert. Die Überprüfung zeigt auf, daß es sich dabei überwiegend um Wiesenflächen handelt, die im Basis-DLM unter Objektarten wie 'Sonderkultur', 'Gartenland'



Bild 53 – Erkennung der Objektarten 'Ackerland' und 'Grünland'. (a): Ausgangsdaten für die multitemporale Klassifizierung als [R,G,B]-Pseudofarbendarstellung. (b): Ergebnisse der ATKIS-gestützten multitemporalen Klassifizierung.

oder 'Industrie- und Gewerbefläche' subsumiert sind. Die spektral grundsätzlich richtige Erkennung muß sich hier der Semantik des Objektes unterordnen. Nicht erkannt werden dagegen Acker- und Grünlandflächen des Basis-DLMs, wenn diese von einzelnen Büschen, Bäumen oder beispielsweise Streuobst bestanden sind. Diese Tatsache läßt sich für zahlreiche der in Bild 54(b) nicht klassifzierten Grünlandflächen anhand der entsprechenden Signaturen der TK50 nachvollziehen. Die entsprechenden Vegetationsmerkmale wie beispielsweise 'Streuobst' sind als Attribute im ATKIS Basis-DLM zwar teilweise vorgesehen, in der vorliegenden Erfassungsstufe aber noch nicht belegt.

Weiterhin läßt sich beobachten, daß sich das Klassifizierungsergebnis im Vergleich zwischen monound multitemporaler Klassifizierung gerade in den Randbereichen spektral homogener Flächen erkennbar verschlechtert. Dies hat seine Ursache darin, daß die gegenseitige Georeferenzierung zwar nahezu flächendeckend mit einer Genauigkeit von unter einem halben Pixel sichergestellt werden konnte, daß aber die verbleibenden Restfehler die bekannte Mischpixelproblematik verschärfen (im Gegensatz zur TM-Auswertung eines Zeitpunktes mit nahezu idealer geometrischer Übereinstimmung zwischen allen Bildkanälen). An diesem Punkt läßt sich möglicherweise noch eine weitere Verbesserung der Ergebnisqualität erzielen, wenn die Informationen über die Homogenität von Teilflächen gezielt nur aus einem Aufnahmezeitpunkt abgeleitet und in den Erkennungsprozeß eingeführt werden.



Bild 54 – Erkennung der Objektarten 'Ackerland' und 'Grünland'. (a): Automatisch nachbereinigte Klassifizierungsergebnisse. (b): Klassifizierungsergebnisse im Vergleich zu den Vorgaben des ATKIS Basis-DLMs.

Insgesamt gesehen sind die erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Erkennung von Acker- und Grünlandflächen für die kleineren ATKIS-Folgemaßstäbe eine wertvolle Information. Auch wenn die Vollständigkeit der erkannten Flächen nicht ganz die Qualität der Walderkennung erreicht, so weist Bild 54(b) doch ganz überwiegend spektral korrekt erkannte Flächen aus. Für die verbleibenden Lücken kann bei den vorliegenden Bodenpixelgrößen keine sichere Aussage getroffen werden, da dort meist ein stark gemischter Vegetationsbestand vorliegt. Hier ist wichtig, daß diese Flächen auch im alle Nutzungsarten zusammenfassenden Endergebnis klar als nicht erkannt ausgewiesen werden, siehe Bild 57 auf S. 90.

6.2 Erkennung von Siedlungsflächen durch texturelle und spektrale Informationen

Die Abgrenzung von Siedlungsgebieten gelingt weitgehend allein anhand von Texturinformation, welche aus einer hochauflösenden panchromatischen IRS-1C-Szene generiert wurden, wie in Abschnitt 5.2 dargestellt . Trotzdem kann man in Bild 42 auf S. 66 feststellen, daß einzelne Industriegebiete und Sportanlagen nicht vollständig erkannt werden; exemplarisch sind in Bild 56 das Main-Taunus-Zentrum und die Industriegebiete von Liederbach und Hattersheim gekennzeichnet. Dies hat seine Ursache darin, daß ausgedehnte einzelne Hallen, insbesondere am Rand von Siedlungsgebieten, auf dem Weg über die Punktobjektdichte aufgrund mangelnder Textur dem Außenbereich zugeschlagen werden. Gerade für Bereiche mit schwacher Textur bzw. lokal homogenen Grauwerten ist aber die multispektrale Klassifizierung äußerst erfolgversprechend. Die synergetische Bündelung beider Ansätze sollte das bisherige Gesamtergebnis also noch verbessern können.

Hier wird die Texturinformation in die multispektrale Klassifizierung mit einbezogen, indem die lokale Punktobjektdichte als Pseudokanal eingesetzt wird, vgl. Bild 39(b) auf S. 63. Als weitere Kanäle werden die ersten beiden Hauptkomponenten der TM-Szene vom 12.8.1997 verwendet, vgl. Bild 55. Die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Selektion spektral homogener Cluster sind in Siedlungsgebieten



- [R]: 1. Hauptkomponente, TM vom 12.8.'97
- [G]: 2. Hauptkomponente, TM vom 12.8.'97
- [B]: Punktobjektdichte

Bild 55 - Ausgangsdaten für die Erkennung von Siedlungsgebieten (Pseudofarbendarstellung).



- Objektbereich 'Siedlung' Basis-DLM und im Klassifizierungsergebnis
- Objektbereich 'Siedlung' nur im Basis-DLM
- Objektbereich 'Siedlung' nur im Texturerkennungs- bzw. Klassifizierungsergebnis

Bild 56 – Erkennung des Objektbereichs 'Siedlung' im Vergleich zu den Vorgaben aus dem ATKIS Basis-DLM. (a): Erkennung allein über Texturinformation. (b): Ergebnis der multispektralen Klassifizierung unter Einbeziehung der Texturinformation.

normalerweise über weite Flächen nicht gegeben, die spektral homogenen Flächen in einzelnen Industriegebieten etc. sind als Ausnahme zu betrachten. Um dennoch zu einer umfassenden Auswahl spektral homogener Cluster als Ausgangsbasis für die flächendeckende Klassifizierung der Siedlungsgebiete zu gelangen, wurde auf die multitemporale Information zurückgegriffen: Pixel mit hoher Varianz der Grauwerte wurden maskiert und von der Suche nach spektral homogenen Clustern ausgeschlossen. Nach der Klassifizierung wurden diese Pixel anhand der benachbarten Klassifizierungsergebnisse einer Objektklasse zugeordnet. Diese Vorgehensweise ist methodisch sicher noch nicht ausgereift, insbesondere der Rückgriff auf die multitemporale Information mag den Eindruck erwecken, hier würde mit Kanonen auf Spatzen geschossen. Immerhin gelingt ohne großen Aufwand der Nachweis, daß sich Textur- und Spektralinformation synergetisch einsetzten lassen, um Siedlungsgebiete weitgehend vollständig voneinander abzugrenzen, vgl. Bild 56(b) gegenüber Bild 56(a).

Die verbleibenden Differenzen zwischen Klassifizierungsergebnis und Basis-DLM wurden bereits in Abschnitt 5.2 diskutiert. Ausgedehnte Rasenflächen in Industriegebieten beispielsweise werden stets als Vegetationsflächen im auf spektralen Merkmalen aufbauenden Klassifizierungsergebnis erscheinen. Um eine automatisierte Verifizierung der Objekte des Basis-DLMs vorzunehmen oder zumindest deren Plausibilität im Zusammenhang mit den Bilddaten abzuprüfen sind regel- und wissensbasierte Ansätze aufzugreifen vgl. [*Quindt* 1997], [*Tönjes* 1999].

7 Zusammenfassende Diskussion

Die Auswerteverfahren und -ergebnisse der flugzeuggestützt aufgezeichneten DPA-Dreizeilenscannerdaten wurden bereits vorab in Abschnitt 3.5 auf S. 44 bewertet. Auch wenn die erwarteten Genauigkeiten aufgrund sensorspezifischer Detailprobleme mit dem Kameraprototyp DPA nicht voll erreicht wurden, sind die gewonnenen Erfahrungen zur geometrischen Auswertung von Flugzeugscannerbildern äußerst wertvoll für die nahe Zukunft. Es zeigte sich nämlich auch, daß die bevorstehende Einführung digitaler Luftbildkamerasysteme auf grundsätzlich praxisgerechten Verfahren und Algorithmen aufbaut.

Die gewonnenen Erfahrungen lassen sich teilweise auf satellitengestützte Aufnahmesysteme übertragen. Dies ist für die nahe Zukunft von Bedeutung, denn im Hinblick auf die neuen hochauflösenden Fernerkundungssatelliten gewinnen photogrammetrische Denkweisen, Kalibrier- und Auswerteprozesse für die Fernerkundung enorm an Bedeutung. Am Beispiel der in diesem Bericht dargestellten geometrischen und radiometrischen Vorverarbeitungsschritte wird die anstehende Verschmelzung von Photogrammetrie und Fernerkundung offensichtlich: Für die Georeferenzierung der multitemporalen Bilddaten werden die Methoden der Orthobildberechnung aufgegriffen. Ebenso finden Methoden der Fernerkundung Eingang in die Auswertung digitaler Luftbilder: Die Fusionierung niederaufgelöster Multispektralbilder mit hochaufgelösten panchromatischen Bilddaten ist sowohl für IRS-1C als auch für die multispektral aufzeichnende DPA von Interesse, beide Systeme zeichnen mit sensortypischen Auflösungsunterschieden je nach Spektralbereich auf. Generell ermöglicht erst die hohe radiometrische Qualität direkt aufgezeichneter digitaler Bilddaten den wirtschaftlichen Einsatz von automatisierten Klassifizierungs- und Objekterkennungsverfahren.

Hier wurde die automatisierte Extraktion linien- und flächenhafter Informationen aus LANDSAT TMund IRS-1C-Szenen (als Ersatzdaten für MOMS-02) vorgenommen. Die Ergebnisse aus der flächenhaften Klassifizierung sind in Bild 57 zusammengefaßt dargestellt. Die Objektarten 'Ackerland' und 'Grünland' wurden aus multitemporalen Bildern abgeleitet, für die anderen Klassen erwies sich eine monotemporale Auswertung als ausreichend. Die thematische Auswahl der Objektklassen orientiert sich an denen des ATKIS. Mit der Einbeziehung des ATKIS Basis-DLMs steht hinreichendes Vorwissen für die Objekterkennung zur Verfügung: Die geometrischen Nutzungseinheiten des Basis-DLMs werden mit der unüberwachten multispektralen Klassifizierung in Flächen gleicher spektraler Eigenschaften aufgelöst, so daß die interaktive Auswahl von Trainingsgebieten entfällt. Die Pixel eines aus der unüberwachten multispektralen Klassifizierung resultierenden Clusters werden via Häufigkeitsanalyse auf automatischem Wege mit den Objektbereichen und -arten des ATKIS DLMs in Zusammenhang gebracht. Auch wenn die Bodenpixelgrößen der verwendeten Sensoren für die Fortführung des ATKIS Basis-DLMs nicht immer ausreichen, können vielfach wertvolle und flächendeckende Hinweise auf lokalen Fortführungsbedarf ermittelt werden. Für die Fortführung ausgewählter flächenhafter Objektklassen der DLMe in den Folgemaßstäben des Basis-DLMs sind die eingesetzten Satellitenbilddaten dagegen weitaus besser geeignet. Hier besteht aus der Sicht des Kartographen insbesondere für die kleinmaßstäbigen Darstellungen der neuen Bundesländer ein großer Bedarf an aktualisierten Siedlungsumrissen. Auch wenn kleine Ergebnismaßstäbe das Ziel sind, empfiehlt sich nach den hier vorgelegten Untersuchungen der Einsatz des Basis-DLMs als Vorwissen für die Objekterkennung, da die Inhalte des Basis-DLMs im Hinblick auf die Satellitenbildauflösung als nicht generalisiert angesehen werden dürfen. Dies verweist auf Parallelen zur ATKIS-Konzeption, denn auch für die Fernerkundung erweist sich eine maßstabsübergreifende Sichtweise auf Fortführungsaufgaben als erfolgversprechend.

Der Vorzug der flächenhaft erzielten Klassifizierungsergebnisse besteht in der weitgehenden Flächendeckung, bei der unsicher erkannte Gebiete als solche markiert bzw. offen gelassen werden, vgl. Bild 57. Grundsätzlich erreicht die durch multispektrale Informationen gestützte Linienextraktion eine vergleichbare Qualität. Allerdings erlaubt die zu geringe geometrischen Auflösung der Bildpixel z.Zt. keine vollständige Erkennung des Straßenverkehrsnetzes. Im Hinblick auf die zukünftigen hochauflösenden Satelliten könnten sich hier wesentlich verbesserte Rahmenbedingungen ergeben, denn es ist zu erwar-



Legende:

Aus dem ATKIS Basis-DLM übernommen: — Objektbereich 'Verkehr' (Auswahl)

Hintergrund:

Orthobild (IRS-1C, 1. Hauptkomponente)

Klassifizierungsergebnisse:

- Objektbereich 'Siedlung'
- Objektbereich 'Gewässer'
- Objektart 'Ackerland'
- Objektart 'Grünland'
- Objektarten 'Wald, Forst' & 'Gehölz', Vegetationsmerkmal 'Laubholz'
- Objektarten 'Wald, Forst' & 'Gehölz', Vegetationsmerkmal 'Nadelholz'

Bild 57 – Zusammenstellung der flächenhaften Klassifizierungsergebnisse.

ten, daß die Verbesserung der geometrischen Auflösung mit einer hohen radiometrischen Qualität der aufgezeichneten Multispektralkanäle einhergeht. Die Übertragung bisheriger Erkenntnisse zur Linienerkennung auf der Basis von Satellitenbildern oder gescannten Luftbildern ist daher heute nur bedingt möglich, hier verbirgt sich sicher noch ein großes Potential. Insgesamt gesehen ist die Fortführung von Verkehrswegen aus Satellitenbildern nicht konkurrenzfähig zur Fortführung anhand von Fachdaten entsprechender Institutionen: Insbesondere bei Verkehrswegen ist eine vollständige Attributierung von Bedeutung, welche aus Bilddaten nicht ableitbar ist. Allerdings zeichnet sich bereits heute die Linienerkennung als praxisnaher und geeigneter Weg ab, um in Verbindung mit den linienhaften Informationen des ATKIS Basis-DLMs eine automatisierte Georeferenzierung vorzunehmen.

Die Untersuchungen zu den in der Vorhabenbeschreibung aufgegliederten Aufgabenstellungen konnten innerhalb des vorgesehenen Zeitrahmens von zwei Jahren erfolgreich abgeschlossen werden. Einige inhaltliche Ergänzungen wie z.B. die massive Einbeziehung des ATKIS Basis-DLMs erschienen unumgänglich, sie runden das Pilotprojekt insgesamt ab.

Dank

Ich bedanke mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des BKG Frankfurt am Main für die kompetente Zusammenarbeit und Unterstützung. Insbesondere gilt dieser Dank *Prof. Dr. B.-S. Schulz* für seine umsichtige Projektleitung. Die im Projekt *UTOMA* durchgeführten Untersuchungen stehen in der Kontinuität der am BKG bzw. vormals am IfAG geleisteten photogrammetrisch-fernerkundlichen Forschungsarbeiten. Es ist hervorzuheben, daß seitens *Dr. A. Busch* erhebliche Vorleistungen in Form von eigenen Forschungsarbeiten zur Linienerkennung in das Projekt *UTOMA* eingebracht und zur weiteren Nutzung zur Verfügung gestellt wurden. *Prof. Dr. F. Boochs* und seine Mitarbeiter *C. Garnica* und *M. Twardochlib* von der FH Mainz haben sich im Rahmen der geometrischen Bildzuordnungsaufgaben erfolgreich engagiert. Frau *Dipl.-Inform. C. Wende* unterstützte kompetent und tatkräftig in den Bereichen EDV, GIS und Softwareentwicklung. *Prof. Dr. E. Proß* stand für die Bewertung der erzielten Ergebnisse aus kartographischer Sicht bereitwillig zur Verfügung.

Dem BKG Frankfurt am Main bin ich für seine Unterstützung bei der Realisierung des Projektes *UTOMA* zu Dank verpflichtet. Weiterhin haben folgende Personen und Institutionen den erfolgreichen Projektablauf mit Fachwissen, Diskussionsbeiträgen und auch der Bereitstellung von Datenmaterial gefördert:

- Dr. W. Steinborn, DLR/GE, Bonn
- Prof. Dr. D. Fritsch, Dr. N. Haala, D. Stallmann, M. Cramer, Institut für Photogrammetrie (ifp), Universität Stuttgart
- Dr. W. Kornus, Dr. M. Lehner, Dr. P. Reinartz, Dr. M. Schröder, DLR/NE-OP, Oberpfaffenhofen
- Dr. O. Hofmann, Brunnthal
- OTL Burkart, Amt für militärisches Geowesen, Euskirchen
- Dr. F.-J. Müller, DaimlerChrysler Aerospace AG / LFK, Ottobrunn
- *Prof. Dr. H. Ebner, A. Baumgärtner, K. Eder, Dr. O. Hellwich*, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU München
- *Prof. Dr. C. Heipke*, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover
- H. Kantelhardt, Hessisches Landesvermessungsamt, Wiesbaden
- Euromap Satellitendaten-Vertriebsgesellschaft mbH, Neustrelitz
- UVE Fernerkundungszentrum Potsdam GmbH
- Dr. M. Endrullis, BKG Leipzig, Geodatenzentrum

Ihnen allen sei herzlich gedankt.

Literatur

- *AdV*: Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS). Hannover, 1989. Druck und Vertrieb: Landesvermessungsamt NRW.
- *AdV*: ATKIS-Objektartenkatalog (ATKIS-OK), Teil D0 der Gesamtdokumentation mit Stand 15.2.1998; Teil D1 der Gesamtdokumentation mit Stand 1.10.1997, Ergänzungen 1.12.1998; Teil D2 der Gesamtdokumentation mit Stand 1.3.1999; Teil D3 der Gesamtdokumentation mit Stand 1.3.1999. Hannover, 1999. Internet: http://www.adv-online.de/veroeffentlichungen/index.htm.
- Albertz, J.: The geometric restitution of line scanner imagery three decades of technical development. In: Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. Gottfried Konecny zur Emeritierung, Bd. 227 von Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 25–34. 1998.
- Angermaier, A.; T. Hockling; W. Klein und F. Müller: Digitale Photogrammetrie-Ausstattung (DPA). Schlußbericht FE IV 1 - T/F41G/V0018/24257, Daimler-Benz Aerospace, LFK GmBH, München, 1998.
- *Bähr, H.-P.* und *T. Vögtle*: Digitale Bildverarbeitung Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. Wichmann, Heidelberg, 3. Aufl., 1998.
- Baumgartner, A.; C. Steger; H. Mayer; W. Eckstein und H. Ebner: Automatische Straßenextraktion auf der Grundlage von verschiedenen Auflösungsstufen, Netzbildung und Kontext. PFG, 1: 5–17, 1999.
- Blau, E.; F. Boochs und B.-S. Schulz: Digital landscape model for europe (DLME). Official Publication N^O 34, European Organization for Experimental Photogrammetric Research (OEEPE), Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main, 1997.
- Boochs, F.: Ein Verfahren zur präzisen gegenseitigen geometrischen Einpassung von Multispektralbildern. In: J. Albertz (Hg.), Photogrammetrie und Fernerkundung: Neue Sensoren – Neue Anwendungen; Vorträge 19. Wissenschaftlich–Technische Jahrestagung der DGPF, 13.-15. Oktober 1999, Essen, Bd. 8 von Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung. Berlin, 2000. In Vorb.
- *Boochs, F.* und *P. Hartfiel*: Festigung von Sicherheit und Zuverlässigkeit der DGM-Bestimmung bei Einsatz der Bildkorrelation. Bildmessung und Luftbildwesen (BuL), 57(3): 103–112, 1989.
- Brand, R.; T. Ohlhof und M. Stephani: Processing of 3-line imagery on a digital photogrammetric workstation. In: D. M. McKeown, Jr.; J. C. McGlone und O. Jamet (Hg.), Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III, Bd. 3072, 2–10. Proceedings of SPIE, Orlando, Florida, 1997.
- *Busch, A.*: A common framework for the extraction of lines and edges. In: ISPRS 18th Congress, Bd. IAPRS 31(B3) Comm. I, 88–93. Wien, 1996.
- Busch, A.: Extraction of roads and built-up areas from satellite imagery. In: F. Leberl; R. Kalliany und M. Gruber (Hg.), Mapping Buildings, Roads and other Man-Made Structures from Images, 277–292. Schriftenreihe der Österreichischen Computer-Gesellschaft, Bd. 92, Oldenbourg Verlag, Wien, 1997. Proceedings of the IAPR-TC7 Workshop 'Remote Sensing and Mapping', Technical University Graz, Austria, 2.-3. September, 1996.
- *Busch, A.*: Revision of built-up areas in a GIS using satellite imagery and GIS data. In: ISPRS Comm. IV Symposium 'GIS Between Visions and Applications', Bd. IAPRS 32(4), 91–98. Stuttgart, 1998.

- *De Floriani, L.*; *S. Bussi* und *P. Magillo*: Triangle-based surface models. Technical Report DISI-TR-98-05, Department of Computer and Information Sciences (DISI), University of Genova, 1998.
- *DLR*: Data Products. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 1999. Internet: http://www.nz.dlr.de/moms2p/dproducts/.
- *Dörstel, C.* und *T. Ohlhof*: Processing and display of three-line imagery at a digital photogrammetric workstation. In: ISPRS 18th Congress, Bd. IAPRS 31(B2) Comm. II, 72–77. Wien, 1996.
- *Ehrhardt, H.*: Modellorientierte Entzerrung von Thematic-Mapper-Rohdaten. Forschungsbericht DLR-FB 90-55, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Hauptabteilung Angewandte Datentechnik, Oberpfaffenhofen, 1990.
- *Euromap*: Documentation. Euromap Satellitendaten Vertriebsgesellschaft mbH, 1999. Internet: http://www.euromap.de/doc_000.htm.
- *FEZ*: Kurzinformation zur Durchführung der DPA-Befliegung. Fernerkundungszentrum Potsdam GmbH, 1997. Internet: http://www.fez-potsdam.de/projekte/dpa97/index.html.
- *Foley, J. D.*; *A. van Dam*; *S. K. Feiner* und *J. F. Hughes*: Computer Graphics. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1990.
- Franzen, M.; G. Kohlhofer; J. Jansa und A. Sindhuber: Ergänzung und Fortführung des Digitalen Landschaftsmodelles des BEV mit Fernerkundung. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 86(3): 161–166, 1998.
- *Fritsch, D.*: Bewertung der Digitalen Photogrammetrie-Ausstattung (DPA). Abschlußbericht, Institut für Photogrammetrie, Uni Stuttgart, 1997.
- *Growe, S.*: Knowledge based interpretation of multisensor and multitemporal remote sensing images. In: Joint EARSeL/ISPRS Workshop on 'Fusion of Sensor Data, Knowledge Sources and Algorithms for Extraction and Classification of Topographic Objects'. Valladolid, Spain, 1999.
- *Gülch, E.*: Erzeugung digitaler Geländemodelle durch automatische Bildzuordnung. Dissertation, Universität Stuttgart, DGK C 418, München, 1994.
- Haala, N.; D. Stallmann und M. Cramer: 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 Multispectral and Multisensor Pixels', Bd. IAPRS 32(3/1), 23–30. Columbus, Ohio, 1998.
- Hake, G. und D. Grünreich: Kartographie. Walter de Gruyter, Berlin, 7. Aufl., 1994.
- Hanke, P. und E. Proß: Zur Fortführung des ATKIS 200 unter Verwendung digitaler Bilddaten. Kartographische Nachrichten (KN), 44(4): 138–143, 1994.
- *Heipke, C.* und *B.-M. Straub*: Towards the automatic GIS update of vegetation areas from satellite imagery using digital landscape model as prior information. In: ISPRS Conference 'Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery', Bd. IAPRS 32(3-2W5), 167–174. München, 1999.
- Hildebrandt, G.: Fernerkundung und Luftbildmessung. Wichmann, Heidelberg, 1. Aufl., 1996.
- Hinz, A.: The Z/I Imaging digital aerial camera system. In: D. Fritsch und R. H. Spiller (Hg.), Photogrammetric Week '99, 109–115. Wichmann, Heidelberg, 1999.
- Hofmann, O.: Dynamische Photogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen (BuL), 54(3): 3-19, 1986.

- Hofmann, O.; A. Kaltenecker und F. Müller: Das flugzeuggestützte, digitale Dreizeilenaufnahme- und Auswertesystem DPA – erste Erprobungsergebnisse. In: D. Fritsch und D. Hobbie (Hg.), Photogrammetric Week '93, 97–107. Wichmann, Karlsruhe, 1993.
- Hoschek, J. und D. Lasser: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. Teubner, Stuttgart, 2. Aufl., 1992.
- Jacobs, H. und M. Stiehs: Multitemporale Landnutzungsklassifizierung und Analyse der Nutzungsänderung im Oberrheingraben. ZPF, 63(4): 160–173, 1995.
- Jacobsen, K.: Self-calibration of IRS-1C PAN-camera. In: ISPRS Joint Workshop 'Sensors and Mapping from Space', 163–170. Hannover, 1997.
- Jansa, J.: A global topographic normalisation algorithm for satellite images. In: ISPRS Comm. VII Symposium, Bd. IAPRS 32(7), 8–15. Budapest, 1998.
- Konecny, G.: Hochauflösende Fernerkundungssensoren für kartographische Anwendungen in Entwicklungsländern. ZPF, 64(2): 39–51, 1996.
- Konecny, G. und J. Schiewe: MOMS-02: Deutsche Erdbeobachtung aus dem Weltraum. ZfV, 122(8): 345–355, 1997.
- *Kornus, W.*: Dreidimensionale Objektrekonstruktion mit digitalen Dreizeilenscannerdaten des Weltraumprojekts MOMS-02/D2. Dissertation, TU München, DGK C 496, München, 1999.
- Kornus, W.; M. Lehner; F. Blechinger und E. Putz: Geometric calibration of the stereoscopic CCDlinescanner MOMS-2P. In: ISPRS 18th Congress, Bd. IAPRS 31(B1) Comm. I, 90–98. Wien, 1996.
- Kornus, W.; M. Lehner; H. Ebner; H. Fröba und T. Ohlhof: Photogrammetric point determination and DEM generation using MOMS-2P/PRIRODA three-line imagery. In: ISPRS Joint Workshop 'Sensors and Mapping from Space'. Hannover, 1999a.
- Kornus, W.; M. Lehner und M. Schroeder: Geometric inflight calibration of the stereoscopic CCDlinescanner MOMS-2P. In: ISPRS Comm. I Symposium 'Earth Observation Systems for Sustainable Development'. Bangalore, Indien, 1998.
- Kornus, W.; M. Lehner und M. Schroeder: Geometric inflight-calibration by block adjustment using MOMS-2P-imagery of three intersecting stereo-strips. In: ISPRS Joint Workshop 'Sensors and Mapping from Space'. Hannover, 1999b.
- Kraus, K.: Fernerkundung, Bd. II. Dümmler, Bonn, 1. Aufl., 1990.
- Kraus, K.: Photogrammetrie, Bd. I. Dümmler, Bonn, 5. Aufl., 1994.
- *Kunz, D.*: Integrated analysis of image and map data based on disjoint objects. In: *W. Förstner*; *C.-E. Liedtke* und *J. Bückner* (Hg.), Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, 11–24. München, 1999.
- Kunz, D.; K.-J. Schilling und T. Vögtle: A new approach for satellite image analysis by means of a semantic network. In: W. Förstner und L. Plümer (Hg.), Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, 211–227. Birkhäuser, Basel, 1997.
- *Liedtke, C.-E.; J. Bückner; O. Grau; S. Growe* und *R. Tönjes*: AIDA: A system for the knowledge based interpretation of remote sensing data. In: 3rd International Airborne Remote Sensing Conference. Copenhagen, Denmark, 1997.

- Mathieu-Marni, S.; M. Xie und M. Berthod: Atmospheric and topographic corrections of satellite images.
 In: F. Leberl; R. Kalliany und M. Gruber (Hg.), Mapping Buildings, Roads and other Man-Made Structures from Images, 119–140. Schriftenreihe der Österreichischen Computer-Gesellschaft, Bd. 92, Oldenbourg Verlag, Wien, 1997. Proceedings of the IAPR-TC7 Workshop 'Remote Sensing and Mapping', Technical University Graz, Austria, 2.-3. September, 1996.
- Mayer, H.: Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern. Habilitationsschrift, TU München, DGK C 494, München, 1998.
- *Metternicht, G.*: Change detection assessment using fuzzy sets and remotely sensed data: an application of topographic map revision. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54(4): 221–233, 1999.
- Müller, F.: Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras. Dissertation, TU München, DGK C 372, München, 1991.
- *Petzold, B.* und *V. Walter*: Revision of topographic databases by satellite images. In: ISPRS Joint Workshop 'Sensors and Mapping from Space'. Hannover, 1999.
- *Pfeiffer, B.*: Die Multisensorbildkarte 1:50 000 Rheinhessen. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I(104): 27–39, 1990.
- *Pohl, C.*: Geometric Aspects of Multisensor Image Fusion for Topographic Map Updating in the Humid Tropics. Dissertation, Universität Hannover, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 214, 1996.
- *Quindt, F*.: Kartengestützte Interpretation monokularer Luftbilder. Dissertation, Universität Karlsruhe, DGK C 477, München, 1997.
- *Reinartz, P.; R. Müller* und *M. Schröder*: Relative radiometric calibration of MOMS-2P-data. In: ISPRS Joint Workshop 'Sensors and Mapping from Space', 179–181. Hannover, 1997.
- *Richter, R.*: Correction of satellite imagery over mountainous terrain. Applied Optics, 37(18): 4004–4015, 1998.
- Sandau, R.; P. Fricker und A. S. Walker: Digital photogrammetric cameras: possibilitiies and problems. In: D. Fritsch und R. H. Spiller (Hg.), Photogrammetric Week '99, 71–82. Wichmann, Heidelberg, 1999.
- *Schlüter, M.*: 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', Bd. IAPRS 32(4), 545–552. Stuttgart, 1998.
- Schlüter, M.: Geometrische Auswertung von DPA-Dreizeilenkameradaten. In: J. Albertz und S. Dech (Hg.), Photogrammetrie und Fernerkundung - Globale und lokale Perspektiven; Vorträge 18. Wissenschaftlich–Technische Jahrestagung der DGPF und 15. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums, 14.-16. Oktober 1998, München, Bd. 7 von Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, 391–398. Berlin, 1999.
- *Schulz, B.-S.*: Analyse der statistischen Voraussetzungen zur Klassifizierung multispektraler Daten. ZPF, 58(3): 66–74, 1990.
- Schulz, B.-S. und C. Wende: Vollautomatische, hochdifferenzierende, pixelweise Klassifizierung multispektraler Bilder – eine neue Methodik –. In: Geoinformation durch Fernerkundung; Vorträge 13.
 Wissenschaftlich–Technische Jahrestagung der DGPF, 1993, Augsburg, Bd. 2 von Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, 193–198. Berlin, 1993.

- Segl, K.: Integration von Form- und Spektralmerkmalen durch künstliche neuronale Netze bei der Satellitenbildklassifizierung. Dissertation, Universität Karlsruhe, DGK C 468, München, 1996.
- Seige, P.; P. Reinartz und M. Schroeder: More than three years experience with the MOMS-2P camera onboard the MIR-space station. In: ISPRS Joint Workshop 'Sensors and Mapping from Space'. Hannover, 1999.
- Sharma, K. und A. Sarkar: A modified contextual classification technique for remote sensing data. PE&RS, 64(4): 273–280, 1998.
- Sindhuber, A.: Ergänzung und Fortführung eines digitalen Landschaftsmodelles mit multispektralen und hochauflösenden Fernerkundungsaufnahmen. Dissertation, Universität Wien, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 48, 1998.
- *Singh, A.*: Review article: Digital change detection techniques using remotely-sensed data. Int. J. Remote Sensing, 10(6): 989–1003, 1989.
- SpaceImaging: IKONOS First Image, 1999. Internet: http://www.spaceimaging.com/ikonos/firstimage.htm.
- Strat, T.: Using context to control computer vision algorithms. In: A. Grün; O. Kuebler und P. Agouris (Hg.), Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, 3–12. Birkhäuser, Basel, 1995.
- *Tönjes, R.*: Wissensbasierte Interpretation und 3D-Rekonstruktion von Landschaftsszenen aus Luftbildern. Dissertation, Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 10 Nr. 575, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.
- Walter, V.: Automated GIS data collection and update. In: D. Fritsch und R. H. Spiller (Hg.), Photogrammetric Week '99, 267–280. Wichmann, Heidelberg, 1999.
- *Wewel, F.; F. Scholten; G. Neukum* und *J. Albertz*: Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. PFG, 6: 337–348, 1998.
- Wiemker, R.; A. Speck; D. Kulbach; H. Spitzer und J. Bienlein: Unsupervised robust change detection on multispectral imagery using spectral and spatial features. In: Proceedings of the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, Bd. I, 640–647. 1997.
- *Zhang, Y.* und *J. Albertz*: Vergleich verschiedener Verfahren zur Kombination multisensoraler Satelliten-Bilddaten. PFG, 5: 261–274, 1998.