

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung
Abteilung Geowissenschaftliche Fernerkundung

**Neue Ansätze zur Auswertung und Klassifizierung von sehr
hochauflösenden Daten: Methoden der Segmentierung, der
hierarchischen Klassifizierung und der per-Parcel-Methode mit
Daten der Digitalen Kamera HRSC-A und ihre Anwendbarkeit
für die Aktualisierung topographischer Karten**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. nat.
im Fach Geographie

eingereicht an der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II
der Humboldt-Universität zu Berlin

von

Dipl.-Ing. (FH) Andrea Hoffmann
geb. 16.05.1961 in Schneverdingen

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin: Prof. Dr. Jürgen Mlynek

Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II: Prof. Dr. sc. nat. Bodo
Krause

Gutachter: 1. Prof. Dr. Endlicher
 2. Prof. Dr. Peyke
 3. Prof. Dr. Neukum

Tag der Abgabe: 18. Dezember 2000

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Mai 2001

Schlagwörter:

Digitale Kamera, Auswertung hochauflösender Daten, automatisierte Kartenaktualisierung, Segmentierung

Zusammenfassung

Auf dem Luftbildsektor vollziehen sich seit einigen Jahren grundsätzliche Veränderungen. Digitale flugzeuggetragene Kamerasysteme und hochauflösende Satellitensysteme bieten neue Potentiale der Datenakquise und -auswertung. Diese digitalen Datensätze werden in absehbarer Zeit das herkömmliche Luftbild ersetzen und Kartographie, Photogrammetrie und Fernerkundung erheblich verändern. Die neue Generation von digitalen Kameras wird zwei zentrale Bereiche der Kartographie einschneidend beeinflussen: Die Orthokartenherstellung und die Kartenaktualisierung. Der Bedarf aktueller Geobasisdaten macht Orthobilder besonders für Geoinformationssysteme interessant. Bisher standen als Basisdaten für Orthobildkarten großer Auflösung ($> 1:10\,000$) lediglich Luftbilder zur Verfügung. Es wird gezeigt, daß die digitalen Daten der neuen Kamerageneration zur Erstellung von Orthobildkarten operationell einsetzbar sind. Durch die automatisierte Prozessierung werden sie den Anforderungen an schnelle aktuelle Kartenprodukte gerecht, mit ihrer hochgenauen Navigation bieten die digitalen Systeme die automatisierte Erstellung geometrisch sehr genauer Datensätze, die mit herkömmlichen Mitteln nur sehr aufwendig erreicht werden könnten. Ein Vergleich mit Luftbildern zeigt und bewertet die Unterschiede beider Aufnahmesysteme.

Untersucht wurden Datensätze der digitalen Kamera HRSC-A des DLR Adlershof. Mit der HRSC-A (High Resolution Stereo Camera – Airborne) und der speziell für die Prozessierung dieser Daten entwickelten Software steht den Geoinformationssystemen erstmals ein operationelles System zur Verfügung, das vollständig digital und vollautomatisch hochauflösende Orthobilddaten produziert. Die Pixelauflösung liegt zwischen 10 und 40 cm (Flughöhe von 2500 bis 10 000 m). Als vorteilhaft für die Analyse erweist sich die gleichzeitige Verfügbarkeit von hochauflösenden panchromatischen und multispektralen Datensätzen, die Verfügbarkeit eines hochauflösenden Geländemodells (x,y: 50 cm bzw. 1m, z: 10 cm) und die hohe Genauigkeit der Datensätze.

Die Arbeit diskutiert die Problematik einer automatisierten Auswertung hochauflösender Daten. Diese Datensätze stellen neue Anforderungen an Auswertungsverfahren. Der Detailreichtum erschwert die Interpretation, größere räumliche Auflösungen glätten die Komplexität innerhalb heterogener Landnutzungen (besonders in urbanen Gebieten) und erleichtern so eine automatische Interpretation. Es wird gezeigt, daß "klassische" Auswertungsmethoden wie pixelbasierte Klassifizierungen (überwacht oder unüberwacht) zur Auswertung der hochauflösenden Daten nur bedingt geeignet sind. Im Rahmen der Arbeit werden zwei neue Ansätze entwickelt und untersucht, die nicht mehr pixelweise, sondern flächenhaft und objektorientiert arbeiten.

Ein per-parcel-Ansatz zeigt gute Ergebnisse bei der Auswertung. Das Verfahren ermittelt zunächst mittels einer unüberwachten Klassifizierung Szenekomponenten in definierten Untereinheiten (parcel), die den Inhalt des Datensatzes repräsentieren. Die klassifizierten Pixel innerhalb der definierten parcel-Einheiten werden anschließend extrahiert und ihr Verhältnis zueinander weiter ausgewertet. Ergebnis ist zunächst die prozentuelle Verteilung der Szenekomponenten in den Einheiten, anschließend werden Zusammenhänge zwischen den vorhandenen Komponenten und der Landoberfläche definiert.

Untersucht wurde ferner ein objektorientierter Ansatz, der die Interpretation von Einzelobjekten erlaubt. Hierbei wird das Bild in homogene Objekte segmentiert, die die Grundlage für die weitere Analyse bilden. Der diskutierte Ansatz besteht aus zwei Strategien: Mittels multiskalarer Segmentierung wird der Bilddatensatz zunächst in Einheiten strukturiert, verschiedene Maßstabsebenen sind gleichzeitig verfügbar. Grundidee ist die Schaffung eines hierarchischen Netzes von Bildobjekten. Diese gefundenen Einheiten werden anschließend spektral mittels Nearest Neighbour oder wissensbasiert mittels Fuzzy Logic Operatoren klassifiziert. Der Ansatz zeigt überzeugende Ergebnisse bei einer automatisierten Hauserkennung und der Aktualisierung bestehender Vektordatensätze. Die Einteilung der Bilddaten in Segmente, also zunächst eine Abstrahierung der Information vom Einzelpixel zu größeren semantischen Einheiten und die weitere Bearbeitung dieser Segmente erwies sich als sinnvoll. Es wurde ferner gezeigt, daß für die Analyse in städtischen Räumen die Einbeziehung von Oberflächeninformation unbedingt erforderlich ist. Durch die spektrale Ähnlichkeit von Bildelementen bietet die Einbeziehung des Oberflächenmodells die Möglichkeit, mittels einer zusätzlich bekannten Information über die Höhe der Objekte, diese Klassen zu trennen.

Keywords:

Digital camera, interpretation of high resolution data, automated map updating, segmentation

Abstract

Remote sensing goes through times of fundamental changes. New digital airborne camera systems offer new potentials for data acquisition and interpretation. These data sets will replace aerial photography in the near future and change photogrammetry, cartography and remote sensing. The new camera generation will influence two central domains of cartography: Orthomaps production and map updating. As a base for in-time updating orthomaps became more and more important. Up to now large scale mapping (scales > 1:10,000) is done nearly exclusively with aerial photographs. It can be shown that the digital data sets of the new camera generation can be used operationally for the production of orthomaps. A fully automated processing line provides the ortho images very shortly after acquisition, due to the used high precision navigation system the accuracy of the data is very high, even very big scales can be realized. A comparison of digital cameras and aerial photos discusses and rates the properties of the different acquisition systems and data sets.

For interpretation data sets of the digital camera HRSC-A were used. The High Resolution Stereo Camera - Airborne (HRSC-A) digital photogrammetric camera and its processing software provides the geoinformation industry for the first time with an entirely digital and fully automatic process to produce highly accurate digital image data. The pixel size ranges between 10 and 40 cm (flight altitude 2500 – 10,000 m). The airborne camera combines high resolution, photogrammetric accuracy and all-digital acquisition and provides both multispectral and elevation information. The pushbroom instrument provides digital ortho-images and digital surface models with an accuracy of 10-20 cm. The use of this wide range of image information showed to be very helpful for data analysis.

This investigation focuses on the problems of automated interpretation of high-resolution data. These data sets make high demands on automated interpretation procedures. The richness of details depicted in the data sets complicates the interpretation, coarser spatial resolutions smooth out spatial complexity within heterogeneous land cover types, such as urban, and make an automated interpretation easier. This report shows that conventional interpretation techniques like pixel-based classification (supervised or unsupervised) do not lead to satisfactory results. Two new object-oriented and region-oriented approaches for the interpretation of high resolution data sets were developed and discussed.

The parcel-based approach showed good results in interpretation of the data. The proposed methodology begins with an unsupervised per-pixel classification to identify spectral clusters which represent the range of scene components present in the pre-defined land parcels. The per-parcel analysis extracts the pixels classified as scene components within the land parcel under examination and calculates the total numbers and fractions for each scene component present. To identify land cover types not represented by scene components at the land parcel level, it is necessary to process the scene component information and infer relationships between the scene components present and land cover type. A set of rules was devised to identify a range of land cover types from the mixtures of scene components found within each land parcel.

Secondly an object-oriented and multi-scale image analysis approach was used for the interpretation of single objects. The procedure contains two basic domains. The strategy is to build up a hierarchical network of image objects which allows to represent the image information content at different resolutions (scales) simultaneously. In a second step the image objects were classified by means of fuzzy logic, either on features of objects and/or on relations between networked objects operating on the semantic network. The procedure showed very good results in detecting houses and updating vector data sets. Segmenting the data in semantic units and performing further analysis on these units showed to be very helpful for interpretation.

It could be shown that for analysis of urban areas the use of a Digital Surface Model is necessary. Due to the spectral similarities of image elements the elevation information offers an important additional tool for analysis.

Danksagung

Die vorliegende Promotion wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, Abteilung Geowissenschaftliche Fernerkundung angefertigt. Dem DLR sei für die finanzielle, strukturelle und inhaltliche Unterstützung gedankt, die diese Arbeit erst möglich machte. Mein besonderer Dank gilt dem Leiter dieser Abteilung, Herrn Frank Lehmann.

Für die Vergabe und Betreuung des Promotionsthemas bin ich Herrn Prof. Dr. Peyke und Herrn Prof. Dr. Neukum zu herzlichem Dank verpflichtet.

Mein Dank gilt auch den zahlreichen Mitarbeitern des DLR, die für Fragen und Diskussionen immer ein offenes Ohr hatten.

Gedankt sei ferner Herrn Geoffrey M. Smith vom Institute of Terrestrial Ecology in Monks Wood, UK für den überaus fruchtbaren Austausch bei der Weiterentwicklung eines per-parcel-Klassifizierungsansatzes, „obwohl Software und Daten nicht immer kooperierten“.

Für die engagierte Unterstützung bei der Aktualisierung der topographischen Karte der Niederlande gilt mein Dank den Mitarbeitern der Amsterdamer Firma geodan geodesie (jetzt terraimaging) und hier ganz besonders dem Direktor Herrn IR J.-W. van der Vegt.

Gedankt sei ferner Herrn Sören Hese, der parallel an einer Promotion über die digitalen Oberflächenmodelle der HRSC-A arbeitete. Sowohl die fachlichen Diskussionen über das Kamerasystem und die Auswertung der Daten wie auch die gegenseitigen Aufmunterungen während der Erstellung dieser Arbeit waren eine überaus große und angenehme Hilfe.

Ich möchte der Firma Definiens (vormals Delphi2), München, für die Bereitstellung der Beta-Version des Softwarepaketes eCognition danken, hierbei gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Martin Baatz für viele hilfreiche Vorschläge. Ein Teil dieser Forschungsarbeit wurde in Zusammenarbeit mit den Topographischen Diensten Hollands durchgeführt. Ich danke insbesondere Herrn Bert Kolk für die Bereitstellung der Datenquellen und für fruchtbare Diskussionen über die Implementation des Ansatzes in den Aktualisierungsprozeß.

Für die Bereitstellung von Daten danke ich dem Landesvermessungsamt Sachsen und der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden, Lehrstuhl Biometrie und forstliche Informatik. Hier seien insbesondere Herrn Prof. Köhl und Herr Dr. Scheuber genannt. Dank gebührt auch dem Gartenbauamt Potsdam für die Begleitung im Gelände bei der Bestimmung der Baumarten und -alter im Park Sanssouci.

Für die Unterstützung in allen Fragen der Photogrammetrie, den ausführlichen Diskussionen und den zahlreichen kritischen Anmerkungen zur Arbeit bin ich Herrn Franz Wewel herzlich verbunden.

Frau Katja Hartwig und Herrn Sascha Perkins danke ich für die vielen Hinweise und Anregungen zur Gestaltung dieser Arbeit.

Danken möchte ich nicht zuletzt meinen Freunden für die Unterstützung, die Geduld und den unbeirrten Glauben an das Gelingen.

Inhalt

1	Einleitung: Veränderungen durch die Verfügbarkeit neuer hochauflösender Daten und die Problematik der Auswertung dieser Daten	1
2	Stand der Forschung	4
2.1	Die visuelle Interpretation hochauflösender Daten	5
2.2	Die visuelle Interpretation von Satellitenbildern	5
2.3	Die automatisierte Auswertung von digitalen Daten	6
2.3.1	Pixelorientierte Klassifizierung von Bilddaten	6
2.3.2	Texturbasierte/objektorientierte Auswertung	8
2.3.3	Kombination verschiedener Datensätze	9
3	Fragestellung	9
3.1	Wahl des Arbeitsgebietes	10
4	Die digitale Kamera HRSC-A	12
4.1	Technische Parameter HRSC-A; HRSC-AX und HRSC-AXW	14
4.1.1	Funktionsweise eines CCD-Sensors	14
4.2	Spektrale Eigenschaften der HRSC-A	17
4.3	Aufnahmeprinzip	22
4.4	Die systematische und photogrammetrische Prozessierung der HRSC-A-Daten	23
4.4.1	Die systematische Prozessierung	23
4.4.2	Die Navigationsdaten (GPS/INS-Meßsystem)	23
4.4.3	Die photogrammetrische Prozessierung der HRSC-A-Daten	24
4.5	Genauigkeiten der Daten	27
4.6	Die Problematik der Blickwinkelunterschiede	31
4.6.1	Faktor Zeit als Auswirkung der Blickwinkelunterschiede	31
5	Die HRSC-A als Nachfolgesystem der Luftbildkamera: Ein Vergleich	39
5.1	Einleitung	39
5.2	Allgemeiner Vergleich der Aufnahmeprinzipien	39
5.3	Technische Parameter	40
5.3.1	<i>Luftbildkamera und digitale Kamera</i>	40
5.3.2	Film und digitaler Sensor	42
5.3.3	Speichermedium	43
5.3.4	Filter	43
5.3.5	Aufnahmeplattform	43
5.3.6	Spektralkanäle	44
5.3.7	Belichtungszeiten, Öffnungswinkel und Brennweiten	44
5.4	Aufnahmeprinzip und Aufnahmetechnik	44
		V

5.5	Flugbedingungen, Aufnahmezeit	46
5.6	Spektrale Auflösung	46
5.7	Radiometrische Auflösung	47
5.8	Räumliche Auflösung	47
5.9	Geometrie der Daten, Projektion	51
5.10	Orthobildgrundlage DGM oder DOM	54
5.11	Radiometrische (physikalische) Eigenschaften	55
5.12	Datenverarbeitung: Prozessierung der Daten	56
5.13	Genauigkeiten	58
5.13.1	Innere Orientierung	58
5.13.2	Äußere Orientierung	59
5.13.3	Bildpunktauflösung und Punktmessung	59
5.13.4	Genauigkeitsuntersuchungen mit der HRSC	59
5.14	Auswertung, Nutzungspotentiale	59
5.15	Zusammenfassung und Diskussion	60
6	Digitale Daten als Grundlage für die Kartenerstellung	66
6.1	Die Bedeutung von Orthobildkarten	66
6.2	Anforderungen an die Eingangsdaten: Genauigkeiten und nötige räumliche Auflösungen für die Kartenproduktion in verschiedenen Maßstäben	67
6.3	Die Orthobildkarte Berlin	78
6.4	Datenaufnahme für das Kartenblatt 423C	78
6.5	Luftbildbefliegungen und -archiv	79
6.6	Der Ablauf der Kartenproduktion	80
6.7	Visueller Vergleich der beiden Orthobildkarten	81
6.8	Zusammenfassung	82
7	Standardverfahren der Fernerkundung	83
7.1	Das Testgebiet Sanssouci	83
7.2	Visuelle Interpretation	83
7.3	Untersuchungsmethodik	85
7.3.1	Fernerkundung	85
7.3.2	Die elektromagnetische Strahlung	86
7.3.3	Auflösung von Rasterdaten	87
7.3.4	Klassifizierung	87
7.4	Statistische Verfahren	89
7.4.1	Korrelationsanalyse	89
7.4.2	Grauwertverteilungen	91
7.4.3	Die Verteilung der Daten	92

7.4.4	Hauptkomponentenanalyse	92
7.4.5	Reduzierung der Pixelauflösung mittels der Point Spread Function	98
7.4.6	Untersuchung des "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI)	98
7.5	Klassifizierungen	103
7.5.1	Unüberwachte Klassifizierung	103
7.6	Überwachte Klassifizierung	108
7.6.1	Definition der Trainingsgebiete: Das Seed-Verfahren	108
7.6.2	Bewertung der Trainingsgebiete	108
7.6.3	Klassifizierungsmethode	109
7.6.4	Diskussion der Ergebnisse	110
7.6.5	Maskierungen zur Verbesserung der Klassifizierung	110
7.7	Zusammenfassung	111
8	Neue Klassifizierungsmethoden für hochauflösende Daten: Ein per parcel-Ansatz	114
8.1	Das Untersuchungsgebiet Tharandter Wald	114
8.2	Verfügbare Daten	115
8.2.1	Fernerkundungsdaten	115
8.2.2	Kartenmaterial	116
8.2.3	Zusätzliche Datenquellen	116
8.2.4	Geländeuntersuchungen	116
8.2.5	Beurteilung der Daten	116
8.2.6	Grundlagen der verwendeten Orthobilder	117
8.2.7	Überlagerung mit Vektordaten	117
8.2.8	Exkurs: Grundsätzliche Anmerkung zum Problem der Projektionen	118
8.2.9	Vorbereitung der Daten, Zielsetzung	120
8.3	Beschreibung der Methode	120
8.4	Bildung der Land-parcel	122
8.5	Training	123
8.6	Anwendung auf gesamtes Gebiet	125
8.7	Diskussion	127
8.8	Ergebnis der erneuten Klassifizierung	127
8.9	Szenekomponenten als Trainingsklassen für eine überwachte Klassifizierung	128
8.10	Untersuchung der Kronenkomponenten	130
8.11	Ausblick: Übertragung der Methode auf städtische Datensätze	132
8.12	Diskussion und Schlußfolgerung	136

9	Objektorientierte Klassifizierung: Multiskalare Segmentation und Klassifizierung mittels fuzzy logic	138
9.1	Motivation, Ansatz	138
9.2	Verfügbare Segmentierungsverfahren	139
9.3	Das Segmentierungsverfahren in eCognition	140
9.4	Klassifizierung mittels fuzzy logic	141
9.5	Untersuchung des „scale parameter“ bei der Segmentierung	143
9.6	Die objektorientierte Analyse von hochauflösenden digitalen Kameradaten: Eine Methode zur automatisierten Aktualisierung topographischer Karten	148
9.7	Das Arbeitsgebiet, verfügbare Daten	148
9.8	Der bisherige Herstellungs- und Aktualisierungsprozeß	148
9.9	Die Verschneidung mit Vektordaten	150
9.10	Die automatisierte Aktualisierung von Karten. Ein Ansatz mit eCognition	152
9.11	Diskussion der Ergebnisse	154
10	Diskussion und Ausblick	156
	Literaturverzeichnis	158
	Abkürzungsverzeichnis	166
	Abbildungsverzeichnis	167
	Tabellenverzeichnis	171
	Anhang	i

1 Einleitung: Veränderungen durch die Verfügbarkeit neuer hochauflösender Daten und die Problematik der Auswertung dieser Daten

Auf dem Luftbildsektor vollziehen sich seit den vergangenen Jahren tiefgreifende Veränderungen. Digitale flugzeuggetragene Kamerasysteme bieten völlig neue Potentiale der Datenakquisition und -auswertung. Diese digitalen Datensätze werden in absehbarer Zeit das herkömmliche Luftbild ersetzen und die Photogrammetrie und Fernerkundung erheblich und grundsätzlich verändern. Die digitalen Systeme verfügen über eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber dem analogen System der Reihenmeßkammer (bessere Geometrie, vollautomatisierte Prozessierung, gleichzeitige Verfügbarkeit von Oberflächenmodellen und multispektralen Daten).

Der erfolgreiche Start von IKONOS macht Daten mit einer Auflösung von einem Meter aus dem All verfügbar, weitere hochauflösende Systeme sind in Entwicklung.

Diese Entwicklung bewirkt eine schnellere und bessere Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten. Durch den beginnenden Aufbau umfangreicher Datenkataloge werden in naher Zukunft multitemporale Daten auch großer Auflösungen zeitnah und preiswert zur Verfügung stehen und somit als Grundlage für Kartenerstellung und GIS eine größere Bedeutung erlangen. Ferner ist zunehmend ein Zusammenwachsen der bisher strikt getrennten Bereiche GIS und Fernerkundung zu beobachten, unter anderem durch die mögliche Bearbeitung der Daten beider Systeme in einer Datenverarbeitungsumgebung.

Die neue Generation von digitalen Kameras wird zwei zentrale Bereiche von Kartographie und GIS einschneidend verändern:

Orthobildkartenherstellung

Durch die automatisierte Prozessierung können Orthokarten den Anforderungen an schnelle aktuelle Kartenprodukte gerecht werden, mit ihrer hochgenauen Navigation bieten die digitalen Systeme die automatisierte Erstellung geometrisch sehr genauer Datensätze, die mit herkömmlichen Mitteln nur sehr aufwendig erreicht werden könnten. Bei der Prozessierung sind weder visuelle Interpretation noch die Verwendung eingemessener Punkte notwendig.

Kartenaktualisierung

Als Grundlage für Aktualisierungen von Kartenwerken dienen zunehmend digitale Daten in Nachfolge von Luftbildern. Für eine angestrebte automatisierte Aktualisierung von Kartenwerken/Vektordatensätzen werden Ansätze zur Interpretation der hochauflösenden Daten benötigt.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit diesen beiden Aspekten. Untersucht wurden Daten der hochauflösenden Digitalkamera HRSC-A (High Resolution Stereo Camera - Airborne). Mit der digitalen Kamera HRSC-A und der speziell für die Prozessierung dieser Daten entwickelten Software stehen den Geoinformations-Nutzern zum ersten Mal gleichzeitig hochgenaue digitale multispektrale Orthobilder und Oberflächenmodelle zur Verfügung, die mittels eines vollständig digitalen und automatisierten Prozesses hergestellt werden.

Die Auswertung der Datensätze stellt völlig neue Anforderungen an den Nutzer: Es gibt bisher keine standardisierten Verfahren für die Interpretation dieser sehr hochauflösenden Scannerdatensätze (15 cm bei der HRSC-A), erforderlich sind neue Ansätze, die über die üblichen per-pixel-Verfahren hinausgehen.

Es gab in den vergangenen zwei Dekaden eine Reihe von Versuchen, hochauflösende Daten automatisiert zu klassifizieren. Dies wurde meist mit simulierten Datensätzen versucht, zum Einsatz kamen aber auch Daten von flugzeuggetragenen Systemen. Limitierend war bislang die mangelnde operationelle Verfügbarkeit hochauflösender Bilddaten. Die Forschung über die Interpretation hochauflösender Daten dürfte mit dem erfolgreichen Start von IKONOS und der Verfügbarkeit hochauflösender flugzeuggetragener Scannerdaten neuen Auftrieb bekommen. Der Schwerpunkt der Forschung lag im städtischen Bereich, ferner liegen Studien über Forstgebiete vor.

Insbesondere für Kartenanwendungen in großen Maßstabsbereichen erscheinen die hohen Auflösungen der neuen Systeme zunächst als ein großer Vorteil gegenüber den bisher verfügbaren

grobe Auflösungen, die von den satellitengestützten Systemen geliefert wurden (größer als 10 m). Es sei jedoch daran erinnert, daß ähnliche Beweggründe und Einschätzungen in den 80er Jahren ausschlaggebend waren für den Start von Landsat 4 (mit dem Thematic Mapper TM, mit einer räumlichen Auflösung von 30 m) und dem Systeme Probatoire de l'Observation de la Terre (SPOT-1, mit dem High Resolution Visible (HRV) - Instrument mit einer räumlichen Auflösung von 20 m) (Toll 1984, Gastellu-Etchegorry 1990). Vergleiche dieser beiden neuen Systeme TM und HRV mit dem damals etablierten Landsat MSS zeigten, daß die höhere räumliche Auflösung stattdessen die Genauigkeit von Klassifizierungen bestimmter Landoberflächen reduzierte. Die grobe räumliche Auflösung des Landsat MSS-Sensors glättete die räumliche Komplexität innerhalb heterogener Landnutzungen, wie beispielsweise in städtischen Gebieten. Szenekomponenten wie Vegetation und Gebäude wurden zusammengefaßt in einem Pixel und gingen so als Einzelkomponenten verloren (Bruniquel-Pinel und Gastellu-Etchegorry, 1998).

Es wurde ferner festgestellt, daß die Anzahl der aufzeigbaren Klassen wuchs und daß diese Klassen spektral schlechter unterscheidbar waren (Markham und Townshend 1981), obwohl die feineren räumlichen Auflösungen die Proportionen der Mischpixel reduzierten (Gastellu-Etchegorry 1990). Manche Klassen, die kartiert werden sollten, verschwanden gänzlich: So wird bei einer höheren räumlichen Auflösung der Daten die Klasse „suburban“ beispielsweise zu Gebäuden und Vegetation. Zahlreiche Untersuchungen zeigten, daß durch die multispektrale Klassifizierung allein keine genaue und konsequente Erfassung der städtischen Flächennutzung bzw. -bedeckung möglich ist (Latty et al. 1984, Dutra & Mascarenhas 1984, Gong & Howarth 1989, Gong & Howarth 1990a, Wang & He 1990, Barber & Ledrew 1991, Gong et al. 1992, Gong & Howarth 1992, Foschi 1994, Johnsson 1994, Fung & Chan 1994, Harris & Ventura 1995), da die wesentlichen Hilfsmittel zur Differenzierung städtischer Objektklassen nicht nur die spektrale Information, sondern auch die räumliche (*spatial*) Information der Bilddaten sind.

Gleiche Farben in den Bilddaten können verschiedene Objektflächen und -zustände abbilden. Sie sind somit in ihrer Aussagekraft mehrdeutig. Erst die Verknüpfung mit der räumlichen Information und den besonderen Lagemerkmalen führt zur eindeutigen Identifizierung (Strathmann 1988).

Die sich abzeichnende Entwicklung hin zu Daten, die noch feiner aufgelöst sind, wirft erneut die Frage auf, wie dieser Datentyp mit Hilfe von automatisierten und halb-automatisierten Techniken auszuwerten ist. Zunächst muß überlegt werden, welche Art von Merkmalen das Signal beeinflusst, das für ein Pixel aufgezeichnet wird. Bei Landsat TM-Daten (Pixelauflösung 30 m) beispielsweise repräsentieren die einzelnen Pixel innerhalb eines vorstädtischen Gebietes eine Mischung aus Gebäuden, Vegetation, Boden usw. Diese Mixel resultieren in einer unterscheidbaren spektralen Signatur, die sich mit konventionellen halbautomatischen per-pixel-Methoden klassifizieren lassen, wie in zahlreichen Projekten und Forschungsarbeiten wiederholt gezeigt.

Mit zunehmend feinerer Auflösung (5m) beginnen die Pixel Komponenten der Vorstadt abzubilden wie Gebäude, Bäume, Gärten, asphaltierte Flächen - oder Kombinationen aus diesen Komponenten. Dies erhöht die zu erfassende Anzahl der Klassen, die Interpretierbarkeit des Ergebnisses ist reduziert. Bei noch feineren Auflösungen wie bei den genutzten Datensätzen des digitalen Kamerasystems HRSC mit einer Auflösung von 15 cm ist dieses Problem noch verstärkt: Pixel repräsentieren Teile der Bildkomponenten wie Gebäudeeinzelheiten (Fenster, Schornsteine etc.), Baumkronen, Autos und sogar Menschen und Fahrbahnmarkierungen (Abbildung 1). Das Problem, das im Zusammenhang mit dem Übergang von Landsat MSS zu Landsat TM beschrieben wurde, ist erneut relevant.

Eine angemessene räumliche Auflösung (ebenso wie der Maßstab) ist verknüpft mit dem zu untersuchenden Gebiet und der zu extrahierenden Information (Woodcock und Strahler 1987). Bei hohen räumlichen Auflösungen wird eine Maßstabsgrenze überschritten, die Information, die für ein einzelnes Pixel aufgenommen wird, ist nicht mehr verknüpft mit dem Charakter von Objekten oder Gebieten als Ganzes, sondern mit einzelnen Komponenten der Objekte. Dies erfordert eine Neudefinition der Information, die extrahiert werden kann. Einfache pixelbasierte Analysen stellen sich als ungeeignet für bestimmte Aufgaben und Gebiete heraus.

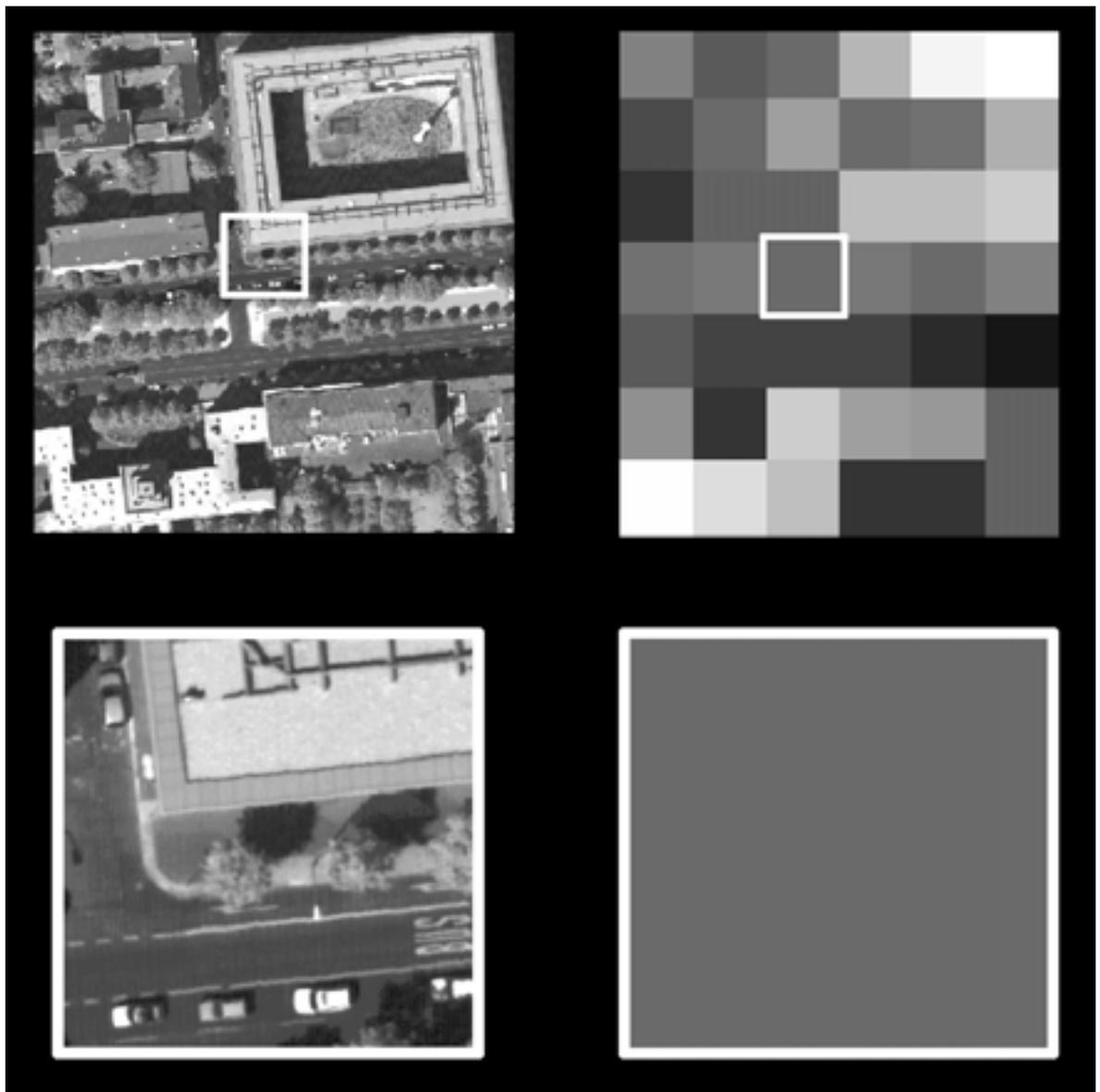


Abb. 1: Ein Vergleich der räumlichen Auflösung von Landsat-TM und HRSC-A-Daten macht das Problem deutlich und zeigt, daß beide Datentypen unterschiedliche Klassifizierungsstrategien erfordern. Das Landsat-TM-Pixel mit einer Größe von 30 m mal 30 m setzt sich zusammen aus den Komponenten einer städtischen Umgebung (Gebäudedach, Straße, Fußweg, parkende Fahrzeuge, Straßenbäume) und kombiniert diese Information zu einem Grauwert. Der entsprechende Ausschnitt als HRSC-A-Datensatz mit 40 000 Pixeln (200 mal 200 Pixel) zeigt die Einzelkomponenten, deutlich erkennbar ist hier die Detailwiedergabe bis hin zur Straßenmarkierung.

Es ergeben sich zwei Fragestellungen:

Wie können räumlich sehr hoch auflösende Daten in sinnvolle Klassen sortiert werden ?

Wie kann die durch die Klassifizierung gewonnene detaillierte Information in nutzbare Klassen und angemessene Maßstäbe überführt werden ?

Zunehmend wird in der Forschung über eine Abkehr von den bisher standardmäßig verwendeten pixelorientierten Verfahren nachgedacht. In neuen Veröffentlichungen wird sogar vor der Verwendung von pixelorientierten Ansätzen gewarnt („Beware of per-pixel characterization of land cover“ lautet der Titel eines Fachbeitrages im International Journal of Remote Sensing zu diesem Thema (Townshend et al. 2000)).

Bisher wurden üblicherweise Fernerkundungsdaten pixelweise bearbeitet. Diese meist quadratischen kleinsten Bildelemente werden nach verschiedenen Vorverarbeitungsschritten und einer Georeferenzierung überwacht oder unüberwacht klassifiziert, ähnliche Pixel im Bild werden hierbei derselben Klasse zugeordnet, egal wo sie sich im Bild befinden. Die erreichten Genauigkeiten bei Anwendung dieses statistischen Verfahrens sind gut (bei Landsat TM Daten meist 85-90%). Ein bisher ungelöstes Problem stellt die Interpretation von Mischpixeln dar, die mehrere thematische Klassen vereinen. Ferner zeigt diese Methode Probleme bei feinauflösenden Daten.

Naheliegender als die statistische Auswertung der Einzelpixel ist ein Vorgehen, das von der Annahme ausgeht, daß das untersuchte Pixel zu derselben Klasse gehört wie sein Nachbar. Diese räumliche Abhängigkeit (bekannt als Tobler's „First law of geography“) findet bei rein pixelorientierten Verfahren keine Berücksichtigung (Blaschke 2000). Für diesen Ansatz werden die Einzelpixel zunächst zu Einheiten zusammengefaßt.

Die Einteilung der Bilddaten in Segmente, also zunächst eine Abstrahierung der Information vom Einzelpixel zu größeren semantischen Einheiten, und die weitere Bearbeitung dieser Segmente zeigt vielversprechende Ergebnisse beim Versuch, die komplexen Datensätze zu bearbeiten. Als vorteilhaft erweist sich die Möglichkeit, Nachbarschaftsverhältnisse der Segmente in die Auswertung einbeziehen zu können, ferner finden Parameter wie z.B. Textur Berücksichtigung.

Diese Arbeit liefert einen Beitrag zur Entwicklung automatisierter Verfahren zur Klassifizierung hochauflösender Daten. Untersucht werden ein per-parcel-Ansatz, der die Anteile von Bildkomponenten innerhalb von Flächenanteilen (parcel) bestimmt und die objektorientierte Klassifikation mittels einer Segmentierung und der anschließenden Klassifikation durch „fuzzy logic Operatoren“.

2 Stand der Forschung

Die Auswertung hochauflösender Daten ist ein junges wissenschaftliches Themengebiet. Bislang standen einer größeren Nutzergemeinde lediglich Satellitenbilddaten mit Auflösungen bis zu 6/23 m (IRS-1 C) bzw. 10/20 m (SPOT 4) zur Auswertung zur Verfügung. Zur Interpretation dieser Daten, deren Pixel grobe Mischungen der verschiedenen Bodenobjekte darstellen, wurden zahlreiche (halb)automatisierte Verfahren (pixelweise Verfahren mit maximum/minimum likelihood Klassifizierungen, unüberwachte/überwachte Klassifizierung) entwickelt, die in vielfältigen Forschungsarbeiten eingesetzt und überprüft wurden.

Heute wird ein großer Teil der Fernerkundungsdaten von digitalen Scannern und digitalen Kameras von flugzeuggetragenen Plattformen aufgenommen. Die räumlichen Auflösungen reichen von zwei Metern bis hinunter zu zehn Zentimetern. Eine Reihe von satellitengetragenen Systemen mit ähnlich hohen Auflösungen ist in Planung (Fritz 1996). Als erster Lieferant hochauflösender Satellitenbilddaten konnte das System Ikonos der Firma Space Imaging mit einer Auflösung von einem und vier Metern (panchromatisch/multispektral) im Oktober 1999 erfolgreich gestartet werden (Aplin et al. 1999).

Ein wichtiges Anwendungsgebiet für die Daten dieser Aufnahmesysteme war und ist die Erstellung von Karten und die thematische Auswertung. Mit den jetzt deutlich höheren Auflösungen der neuen Systeme werden Anwendungen bis in große Kartenmaßstäbe möglich (1:5000 und größer bis zu Katasterkarten) (Konecny 1999). In diesem Zusammenhang sei auf die Bedeutung von Orthobildern und insbesondere von Orthobildkarten zur Aktualisierung von Kartenwerken und als Grundlage für thematische Auswertungen verwiesen.

Die Auswertung der Daten beinhaltet das Identifizieren und Lokalisieren von Objekten und Gebieten auf der Erdoberfläche. Konventionell wurden Daten hoher Auflösung bisher mit manuellen/visuellen Methoden der Luftbildinterpretation analysiert und interpretiert. Diese visuelle Interpretation beruht auf einer Reihe von subjektiven Entscheidungen des Auswerters, berücksichtigt werden Farbeindruck, Textur, Form, Größe und Kontext. Dieser Ansatz ist gegenüber automatisierten Verfahren zeitintensiv, subjektiv und teuer. Die Verfügbarkeit von Luftbilddaten für Aktualisierungszwecke stellte jedoch zunächst eine erhebliche Verbesserung dar gegenüber den vorher praktizierten Geländeerhebungen.

2.1 Die visuelle Interpretation hochauflösender Daten

Die terrestrische Datenerfassung setzt die Verwendung geeigneter Kartengrundlagen (z.B. Katasterplan im Maßstab 1 : 2.000) voraus und erlaubt eine sehr differenzierte, genaue Erfassung der Flächennutzung. Sie ist in Deutschland für die Bestandsaufnahme im Rahmen der Bebauungsplanung das übliche Verfahren (Achen 1993). Eine sinnvolle und zeitgemäße Stadtplanung setzt eine flächendeckende, aktuelle Kenntnis des Flächennutzungsinventars im Planungsgebiet voraus. Mit terrestrischen Kartierungen lassen sich diese Forderungen nur unzureichend erfüllen, weil der Kosten- und Zeitaufwand für die erforderlichen Geländebegehungen zu hoch ist (Gahn 1994).

Bereits in den 80er Jahren kam man zu dem Ergebnis, daß Flächennutzungskartierungen mit Farbinfrarot-Luftbildern nur ein Viertel bis ein Fünftel der Zeit in Anspruch nehmen, die für eine reine Geländekartierung benötigt wird (Gahn 1994). Zur Zeit ist die visuelle Interpretation von Luftbildern die am häufigsten benutzte Methode zur Gewinnung flächendeckender Informationen. Die Ergebnisse der Interpretation werden entweder direkt im Bild vermerkt oder auf eine parallel mitgeführte Karte übertragen (Bill 1992).

Einige Beispiele der praktischen Anwendungen in städtischen Räumen geben eine Übersicht über den heutigen Stand der heute benutzten Erfassungsverfahren.

Die niederländische nationale Kartenbehörde Topographische Dienste (TDN) erstellt ihre Kartenprodukte auf der Grundlage von Luftbildern. Die Produktpalette der Behörde umfaßt die topographischen Karten in den Maßstäben 1 : 10 000 bis 1 : 500 000, ein Basisprodukt ist die Vektorkarte TOP10Vector, die für zahlreiche Anwendungen als Grundlage dient. Dieses Kartenprodukt wird auf der Basis von Schwarzweiß-Luftbildern erstellt, die im Maßstab 1 : 18 000 aufgenommen werden. Die Auswertung der Daten kombiniert Geländearbeit und visuelle Interpretation am Schreibtisch. Die Bilder werden zunächst visuell interpretiert, aufgrund dieser Ergebnisse findet eine ausgedehnte Feldarbeit statt, um die Änderungen vor Ort aufzunehmen (Asperen 1996).

Seit 1978 läßt die Stadt Kiel im Abstand von etwa fünf Jahren Farbinfrarot-Luftbilder im Maßstab 1:5.000 aufnehmen, um die Vitalität der Stadtbäume regelmäßig zu überwachen. Für die Landschaftsplanung wurde eine Stadtbiotopkartierung erstmals durch visuelle Interpretation der Farbinfrarot-Luftbilder von 1992 erfüllt. Das Saarland hat als erstes Bundesland im Jahre 1989 die Landschaftsplanung mit Hilfe einer Farbinfrarot-Luftbild-gestützten (1: 12 500) Biotoptypenkartierung durchgeführt (Gahn 1994).

Als Pilotstudie für die Datenerhebung eines statistischen Bodeninformationssystems hat das Statistische Bundesamt Luftbilder der Stadt Wiesbaden benutzt. Die Flächennutzung der Stadt wurde durch visuelle Interpretation von Luftbildern im Maßstab 1:32 000 erfaßt. Die Grundlage der Interpretation waren topographische Karten 1:25 000 (Radermacher 1989). Beim Aufbau eines Grünrauminformationssystems der Stadt Wien wurden Interpretationen von Luftaufnahmen als eine kostengünstige und wiederholbare Erfassungsmethode zur Beobachtung der städtischen Grünflächen durchgeführt. Grundlage für die Interpretation war die digitale Karte im Maßstab 1: 1000. Die interpretierten Vegetationsflächen wurden abgegrenzt, durch einen Grünflächencode eindeutig bezeichnet und schließlich in ein Informationssystem importiert (Pillmann & Klar 1995).

2.2 Die visuelle Interpretation von Satellitenbildern

Da die Bodenauflösung der zur Zeit verfügbaren Satellitenbilddaten für die städtischen Verhältnisse noch zu grob ist, ist es sehr schwierig, die Flächennutzung innerhalb einer Stadt zu interpretieren, Anwendungsbeispiele sind daher selten. Erfahrungen mit Ikonos-Daten sind aufgrund der kurzen Verfügbarkeit des Systems noch nicht vorhanden. Einschränkend ist ferner die große Heterogenität städtischer Bereiche. Zhang (1998) beschreibt in seiner Forschungsarbeit über die Interpretation von Fernerkundungsdaten der Stadt Shanghai die Problematik der großen Heterogenität städtischer Bereiche. Wegen der großen Bebauungsdichte (43% bis 52%) und der starken Mischung großer und kleiner Häuser in der Innenstadt Shanghais sind die Flächen verschiedener Nutzungsklassen sehr kleinflächig und bruchstückhaft, die spektrale Information ist daher auf den bisher verfügbaren Satellitenbilddaten sehr heterogen und der Anteil von Mischpixeln sehr groß. Es ist deshalb äußerst schwierig, die Nutzungsflächen der Innenstadt Shanghais auf Satellitendaten klar zu differenzieren. Da die Nutzflächen für Wohnungen, Handel und Industrie in der Zentralstadt Shanghai stark ineinander verzahnt sind und sich viele für

Handels- und Industriezwecke genutzte Häuser kaum von Wohnhäusern unterscheiden lassen, ist es kaum möglich, die Flächennutzung aus den zur Zeit verfügbaren Satellitendaten detailliert zu klassifizieren. Bereits die visuelle Interpretation von großmaßstäbigen Luftbildern bereitet große Schwierigkeiten (Zhang 1998).

Eine der wenigen visuellen Interpretationen von Satellitenbildern im Stadtbereich ist das Beispiel der Auswertung von Russischen KFA-1000-Farbfotos mit einer Bodenauflösung von 5 bis 10 m für die Stadt Soest (Strathmann 1988). Die festgestellten Fehlerquoten bei der Kartierung linearer Strukturen verdeutlichen, daß eine Kartenneuerstellung im Maßstabsbereich 1:25.000 bis 1:100.000 nicht sinnvoll ist. Dagegen ist die Kartennachführung mittels KFA-Bildinhalten für wesentliche Karteninhalten möglich.

2.3 Die automatisierte Auswertung von digitalen Daten

Seitdem die ersten Satellitenbilddaten in den 70er Jahren für die zivile Nutzung verfügbar waren, gab es eine Vielzahl von Versuchen, diese Daten automatisiert zu klassifizieren. Vergleichende Untersuchungen mit später verfügbaren Daten höher auflösender Systeme (SPOT, TM) ergaben, daß durch eine spektrale Klassifizierung höher auflösender Daten (TM, SPOT) nicht selbstverständlich höhere Genauigkeiten erzielt werden können als durch Klassifizierungen niedriger auflösender Daten (MSS) (Johnson 1994, Gong & Howarth 1992, Latty et al. 1985, Toll 1984), denn die erhöhte geometrische Auflösung vergrößert meist die innere Varianz einer Klasse, so daß die Spektren innerhalb einer Klasse bzw. zwischen mehreren Klassen verwechselt werden können. Die Zunahme der räumlichen (spatial) Information wird bei den spektralen Klassifizierungen aber nicht beachtet. Um aus Satellitendaten möglichst viele und genaue städtische Informationen zu erfassen, wurde in den letzten Jahren in zunehmendem Maße untersucht, wie man durch Einbeziehung räumlicher Informationen der Objektklassen bessere Klassifizierungsergebnisse erzielen kann. Gegenüber der digitalen spektralen Klassifizierung ist die digitale Erkennung bzw. Differenzierung räumlicher Informationen (z.B. Texturen oder Strukturen unterschiedlicher Objekte) äußerst schwierig. Bislang konnten deshalb nur in einfacheren Testgebieten beschränkte Erfolge erzielt werden. Dies soll anhand von Studienergebnissen gezeigt werden.

Generell können die Forschungsanstrengungen in zwei Bereiche unterteilt werden: Zum einen die Ansätze, die die reine spektrale Information der Pixel zur Analyse heranziehen und gegebenenfalls die Ergebnisse durch Filterungen optimieren, und zum anderen Verfahren, die neben den spektralen Eigenschaften der Einzelpixel auch Texturen nutzen und/oder objektorientiert arbeiten. Dies geschieht zumeist durch eine Segmentierung des Bilddatensatzes und die weitere Bearbeitung dieser Segmente, die je nach Aufgabenstellung und Auflösung der Daten entweder Einzelobjekte (Häuser, Bäume) oder Nutzungseinheiten (Bebauungsgebiete, Waldgebiete) abbilden. Ein Forschungsschwerpunkt liegt in der Erfassung verschiedener Nutzungen im städtischen Bereich (Azimi-Sadjadi et al. 1993, Wharton 1987, Moissinac et al., 1994, Bessettes et al. 1996, Baudouin et al., 1995, Baraldi & Parmiggiani 1990, Paola & Schowengerdt 1995, Khorram et al., 1987, Barnsley & Barr 1996, Harris & Ventura 1995, Anys et al. 1994, Gong & Howarth 1990).

Versuche, gescannte Luftbilder automatisiert zu klassifizieren, ergaben nicht die erwünschten Ergebnisse. Als limitierender Faktor erwies sich der Helligkeitsabfall der Daten zum Bildrand, durch den gleiche Objekte unterschiedliche spektrale Eigenschaften haben. Dies macht eine spektrale Klassifizierung praktisch unmöglich. Probleme bereiten ferner die schwierige Mosaikierung der Bilder und die unterschiedlichen Aufnahmebedingungen jedes einzelnen Bildes.

2.3.1 Pixelorientierte Klassifizierung von Bilddaten

Die automatisierte pixelorientierte Auswertung von Satellitenbilddaten geschieht mittels multispektraler Klassifizierungsverfahren. Diese zeigten sich beim Einsatz für großflächige Untersuchungen - z.B. Überwachung von Naturkatastrophen, Waldflächeninventur usw. - als sehr erfolgreich.

Zur Ermittlung aktueller Informationen über die städtische Umweltsituation durch multispektrale Klassifizierungen von Satellitenbilddaten wurden in den letzten Jahren zahlreiche Untersuchungen bzw. Forschungsarbeiten durchgeführt. Es sind jedoch nur bescheidene Erfolge erzielt worden, weil die Bodenobjekte in städtischen Räumen überwiegend kleinflächig und heterogen sind, sowie stärker durch ihre Struktur als durch ihre Spektralreflexion geprägt werden. Die räumliche (*spatial*)

Information in den Bilddaten, die für die Differenzierung städtischer Objektklassen sehr wichtig ist, wird bei den konventionellen pixelbasierten multispektralen Klassifizierungen nicht genutzt.

Zu den bedeutendsten multispektralen Klassifizierungsergebnissen für die praktische Nutzung können bislang die digitale Erfassung von Stadtwärmeinseln, die Überwachung der dynamischen Stadtausdehnung sowie die digitale Erfassung von Grünflächen- und Versiegelungsanteilen gezählt werden. Städtische Wärmeinseln können mittels der spektralen Klassifizierung des TM-Thermalkanals (räumliche Auflösung 120 m x 120 m) erkannt werden (Schmidt-Falkenberg 1989). Die dynamische Ausdehnung einer Stadt wird durch spektrale Klassifizierung multitemporaler Multispektraldaten (z.B. TM-Daten, SPOT-XS-Daten) ermittelt (Su et al. 1992, Meinel et al. 1996). Bei der Erfassung des Grünflächen- bzw. Versiegelungsanteils einer Stadt wird zuerst der Grün-Index durch algebraische Operation des Kanals, der reich an Vegetationsinformationen ist, und der Kanäle, die reich an Bodeninformationen sind, berechnet. (Ratio Vegetation Index: RVI-Index = $TM4/TM3$ oder Normalized Difference Vegetation-Index: NDVI-Index = $(TM4-TM3)/(TM3+TM4)$). Dann wird das Grün-Index-Bild spektral klassifiziert (Achen 1993).

Von Gong & Howarth (1990) wurden zur Klassifizierung der Flächenbedeckung des Land-Stadt-Gebietes der Stadt Toronto die SPOT-XS-Daten verwendet. Testgebiet war ein Ausschnitt der SPOT-XS-Daten mit 512 x 512 Pixeln (ca. 10x10 km²) mit je zur Hälfte Felder und Wohn- und Wirtschaftsgebieten, klassifiziert wurden Flächenbedeckungsklassen. Drei Klassen (Dächer der Wohnhäuser, gepflasterte Oberflächen sowie industrielle und kommerzielle Dächer) sind relativ heterogen, während die anderen 9 Klassen (Wasserfläche, Rasen, Weideland, kultivierte Weide, Nadelwald, Laubwald, bebaute Felder, Brachland) großflächig und homogen sind. Die räumliche Information der Bilddaten wurde in die Klassifizierung einbezogen, indem man zuerst ein Kanten-Dichte-Bild (edge density) durch die Laplace-Filterung und die Mittelwert-Berechnung im 25 x 25-Operationsfenster herstellte. Dann wurde das Kanten-Dichte-Bild als ein zusätzlicher Kanal gemeinsam mit den 3 SPOT-XS-Kanälen überwacht klassifiziert. Die Gesamtgenauigkeit (overall accuracy) des Ergebnisses lag bei 86,1%, während die Gesamtgenauigkeit durch konventionelle Klassifizierung aus den 3 SPOT-XS-Kanälen 67,6% betrug.

Munehika et al. (1993) haben mit TM-Daten und SPOT-Pan-Daten einen kleinen Ausschnitt (ca. 50x50 TM-Pixel) von Rochester, New York, getestet, um die Klassifizierungsgenauigkeit durch Erhöhung der geometrischen Auflösung der TM-Daten zu erhöhen. Die Auflösungsverbesserung der TM-Daten wurde durch Kombination der TM-Daten mit den SPOT-Pan-Daten unter Benutzung des SVR-Verfahrens (Synthetic Variable Ratio) erzielt. Durch die visuelle Interpretation und die digitale überwachte Klassifizierung der räumlich verbesserten TM-Daten und der originalen TM-Daten wurden 5 Klassen erfaßt: städtische Nutzung, Boden, Wasser, Bäume und Rasen. Aus diesen Klassifizierungen ergab sich, daß die Klassifizierungsgenauigkeit durch Kombination der TM-Daten mit den SPOT-Pan-Daten unter Benutzung des SVR-Verfahrens erhöht werden kann. Die Genauigkeit der visuellen Interpretation wurde von 82,2% (aus originalen TM-Daten) auf 95,7% (aus räumlich verbesserten TM-Daten) erhöht. Die Genauigkeit der digitalen spektralen Klassifizierung stieg von 74,2% auf 80,8%. Die verbesserten TM-Daten trugen jedoch nur bei der visuellen Interpretation zur bedeutenden Erhöhung der Genauigkeit bei.

Gong et al. (1994) klassifizierten gescannte Luftbilder mit einer konventionellen maximum-likelihood-Klassifizierungsstrategie. Die Resultate waren einigermaßen erfolgreich, einschränkend sei jedoch vermerkt, daß das Untersuchungsgebiet mit spärlich verteilten dunklen Kiefern auf hellem Untergrund sehr einfach strukturiert war. Dies vereinfachte die Auswahl geeigneter Trainingsgebiete für die spektral eindeutig unterscheidbaren Klassen erheblich.

Aplin et al. (1999) analysierten stellvertretend für die neue Generation hochauflösender Satellitensysteme Daten eines flugzeuggetragenen Scanners mit einer Auflösung von 4 m. Die Daten wurden mittels einer überwachten maximum-likelihood-Klassifizierung in konventionelle Landnutzungsklassen (städtische Gebiete, Ackerland, Weiden etc.) klassifiziert, hierfür wurden Trainingsgebiete verwendet. Wie zu erwarten waren die Ackerflächen am eindeutigsten zu erkennen, als problematisch erwiesen sich die städtischen Bereiche. Als Ursache für die schwierige eindeutige Klassifizierung urbaner Bereiche wird die hohe Komplexität in diesen Regionen genannt, die bereits bei Auflösungen von 4 m zum Tragen kommt. Zur Verbesserung der per-pixel-Klassifizierung insbesondere in den städtischen Regionen wurden Tiefpass- und Texturfilter eingesetzt. Dies jedoch hatte den Nachteil, daß das gesamte Bild gefiltert wurde.

Barr und Barnsley (1999) nutzten für ihre Analyse städtischer Bereiche ebenfalls Daten eines flugzeuggetragenen Systems mit einer Auflösung von 2m. Der Datensatz wurde mittels einer

konventionellen maximum-likelihood-Klassifizierung in zehn Klassen unterteilt. Die Klassifizierungsgenauigkeit erwies sich als akzeptabel, aber es gab Gebiete mit sehr uneinheitlicher Klassenverteilung aufgrund von Klassifikationsfehlern und der wirklichen Komplexität urbaner Gebiete. Um diese heterogenen Bereiche zu reduzieren, wurde ein struktureller Filter eingesetzt.

2.3.2 Texturbasierte/objektorientierte Auswertung

Smits & Annoni (1999) führen neun methodische Ansätze für die Klassifizierung städtischer Bereiche auf, die seit 1987 entwickelt wurden. Hierbei handelt es sich um die Detektion verschiedener Nutzungen im städtischen Bereich. Ferner wurden Versuche gemacht, mittels automatisierter Verfahren Landnutzungsveränderungen (change detection) festzustellen (Wang 1993), die Detektion von Strassen beschreiben Moissinac et al. (1994). Die Autoren nutzten verschiedene Segmentierungsmethoden und Texturparameter zur Interpretation der Daten. Besonderes Augenmerk wird auf die grey-level Co-Occurrence-Matrix (GLCM) gelegt, die nach Aussage verschiedener Autoren besonders gut für die Unterscheidung von Klassen in städtischer Umgebung geeignet ist. Zhang (1998) verweist auf die Problematik der Heterogenität urbaner Flächen und die dadurch erschwerte Interpretierbarkeit der Daten und prüft verschiedene Verfahren sowohl zur Verbesserung der Daten selbst wie auch zur Auswertung. Der Autor betont die große Schwierigkeit der digitalen Erkennung und Differenzierung von räumlicher Information (Texturen und Strukturen unterschiedlicher Objekte).

Die Eignung verschiedener Texturparameter und Segmentierungsansätze wurde auch für Anwendungen im Forstbereich getestet. Ryherd & Woodcook (1996) beschreiben einen kombinierten Ansatz zur Segmentierung von Bildern, sie nutzen zur Auswertung sowohl die textuelle als auch die spektrale Information der Daten. Mittels eines „adaptive-window texture programme“ wird ein zusätzlicher Texturkanal kreiert, der bei der Segmentierung des Bildes Verwendung findet. Generell stellen die Autoren fest, daß die Hinzunahme von Textur in keinem der untersuchten Fälle die Klassifizierungsergebnisse verschlechtert, sie konnte vielmehr bei der Weiterentwicklung der Klassifizierung mehr helfen als zunächst angenommen. Textur kann jedoch auch nur dann helfen, wenn die verschiedenen Klassen im Bild verschiedene Texturmerkmale aufweisen, diese Unterschiede müssen zudem auch groß genug sein. Dies ist je nach Datensatz und zu untersuchender Fläche sehr unterschiedlich. Bei forstwirtschaftlichen Anwendungen ergaben Untersuchungen mit räumlich hochauflösenden Flugzeugdaten, daß der Verzicht auf das Einbeziehen von Texturinformationen gravierende Auswertungsfehler nach sich ziehen kann. Hingewiesen sei demgegenüber auf die Schwierigkeit, sinnvolle Texturinformation zu extrahieren. Bisher konnte die Genauigkeit von Klassifizierungen oder Segmentierungen kaum gesteigert werden (St-Onge & Cavayas, 1997; Ryherd & Woodcook, 1996; Bruniquel-Pinel & Gastellu-Etchegorry, 1998, Fung & Chan, 1994).

Johnsson (1994) hat eine Segment-Based-Klassifizierung zur Erhöhung der Klassifizierungsgenauigkeit in städtischen Regionen durchgeführt. Bei der Untersuchung wurde eine Subszene der SPOT-XS-Daten mit 512 x 512 Pixeln benutzt. Das Testgebiet lag im Umland der Stadt Stockholm, in dem der Anteil der Siedlungsfläche 25% betrug. Zuerst wurden durch eine überwachte Klassifizierung acht Flächennutzungsklassen erfaßt (Städtische Nutzungen 1, 2 und 3, Weide, Brachland, Laubwald, Nadelwald und Wasser). Dann wurden die Größe, der Umfang und verschiedene Nachbarschaftsverhältnisse jedes klassifizierten Segmentes ermittelt. Diese Daten wurden zusammen mit dem spektral klassifizierten Ergebnis in ein Expertensystem importiert. Durch die logischen Operationen des Systems bekam Johnsson als Endergebnis sieben Flächennutzungsklassen (Siedlung, Weide, Brachland, Laubwald, Nadelwald, Wasser und andere Nutzung). Nach den segment-basierten Operationen wurde die Klassifizierungsgenauigkeit der Klasse Siedlungsfläche von 40% auf 72% erhöht, eine Verbesserungsrate von 80%. Allerdings verringerten sich die Genauigkeiten der fünf anderen Klassen.

Fung und Chan (1994) haben ein Spatial-Composition-Verfahren entwickelt, um die heterogenen Flächennutzungen und Flächenbedeckungen in städtischen Räumen genauer klassifizieren zu können. Bei ihm werden die spektral klassifizierten Klassen nach ihrer Spatial-Composition erneut sortiert. Die benutzten Satellitendaten waren die SPOT-XS-Daten mit 512x512 Pixeln. Testgebiet war die Kowloon Halbinsel in Hongkong, wo der Anteil der Wasser-, Siedlungs- und Waldfläche jeweils ein Drittel beträgt. Zuerst wurden durch eine unüberwachte Klassifizierung 8 Spektralklassen erfaßt: Wasser, hoch verdichtete Siedlung, gering verdichtete Siedlung, Freifläche, Gras, Wald 1, 2 und 3. Durch Messung auf der vorhandenen Flächennutzungskarte und auf Luftbildern wurde für jede Flächennutzung ein bestimmtes Kompositionsverhältnis der 8

Spektralklassen festgelegt. Wenn z.B. in einer Flächeneinheit (7 x 7 Pixel) der Anteil der Grünflächen (Gras + Wald1 + Wald2 + Wald3) kleiner als 50% und die gering verdichtete Siedlungsfläche mehr als doppelt so groß wie die hoch verdichtete Siedlungsfläche ist, wird die Flächeneinheit als hochwertiges Siedlungsgebiet betrachtet. Wenn der Anteil der Grünflächen gleich 0, der Anteil der gering verdichteten Siedlungsfläche zwischen 40% bis 80% und der Anteil der Freifläche kleiner als 70% sind, wird die Flächeneinheit als Industriegebiet angesprochen. Nach den festgelegten Kompositionsverhältnissen wurden die Spektralklassen erneut sortiert. Endergebnis waren zehn Flächennutzungsklassen: Wasser, hoch verdichtete Mischsiedlung/Wirtschaftsgebiet, hochwertiges Siedlungsgebiet, öffentliches Gebäudegebiet, Industriegebiet, Freifläche, Grasland und drei Waldklassen. Die Gesamtgenauigkeit der Flächennutzungsklassen betrug 74,8%.

Harris und Ventura (1995) haben für die Erfassung der Flächennutzung der Stadt Beaver Dam in Wisconsin versucht, das Klassifizierungsergebnis und die Klassifizierungsgenauigkeit durch Integration geographischer Daten zu verbessern. Die Stadt Beaver Dam, die ca. 20 km² groß ist und rund 15.000 Einwohner hat, ist eine kleine, typische Gemeinde in Wisconsin. Bei der Klassifizierung wurden zuerst die fünf Nutzungsklassen Wohngebiet, Handelsgebiet, Industriegebiet, Freiflächen und Autobahn durch eine überwachte Klassifizierung aus den TM-Daten erfaßt. Unter Benutzung des GIS-Modelings des Programms ERDAS wurden die Vektordaten der vorhandenen Zonenkarte (zoning map) und Hausdichtekarte importiert. Nach den Vektordaten wurden die spektral klassifizierten fünf Klassen in sechs Grundklassen korrigiert und weiter in 15 Detailklassen untergliedert. Durch die Korrektur wurde die Gesamtgenauigkeit der sechs Grundklassen auf 86,8% erhöht, während die Gesamtgenauigkeit der spektral klassifizierten fünf Klassen 76,6% betrug. Die Gesamtgenauigkeit der untergliederten 15 Detailklassen war 73,8%.

Einen per-field-Ansatz zur Kartierung von Landnutzungseinheiten stellen Aplin et al. (1999) vor, sie verwenden eine Kombination aus simulierten hochauflösenden Satellitenbilddaten und Vektordaten zur Klassifizierung. Ein Vergleich mit pixelweisen Klassifizierungsmethoden zeigt, daß der per-field-Ansatz überlegen ist.

2.3.3. Kombination verschiedener Datensätze

Durch die Verfügbarkeit von hochauflösenden Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) sind neue Interpretationsverfahren durch ein Kombination von Höheninformation und spektraler Information möglich. Bisher waren lediglich Oberflächen- bzw. Höhenmodelle geringer Auflösung (Maschenweite > 20 m) verfügbar, durch den Einsatz von Lasertechnologien oder Stereokameras (HRSC-A) können erstmals großflächig hochgenaue Oberflächenmodelle gewonnen werden (Punktdichte bis unter einem Meter). Die Nutzung dieser kombinierten Information liefert verbesserte Ergebnisse bei der Klassifizierung, kann jedoch auch zu neuen Problemen bei der Kombination dieser Daten führen, da diese meist aus unterschiedlichen Quellen stammen (verschiedene Aufnahmesysteme und -zeitpunkte, schwierige Georeferenzierung aufeinander).

Haala (1999) beschreibt einen Ansatz zur Kombination verschiedener Datensätze, Aufgabe war die Klassifizierung von urbanen Gebieten. Genutzt wurden die durch ein Lasersystem aufgenommenen Höheninformationen und Luftbilder. Die Daten wurden unter Nutzung von Trainingsgebieten pixelweise überwacht klassifiziert, das DOM wurde als zusätzlicher Kanal mit einbezogen. Die Verwendung von Höheninformation zeigte sich als effektives Mittel zur Verbesserung der Klassifizierung, die Ergebnisse sind vielversprechend (absolute Zahlen sind nicht genannt). Limitierend ist die Nutzung verschiedener Datenquellen (Problem der unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte/-verhältnisse, Geometrien etc).

3 Fragestellung

Die Auswertung der neuartigen hochauflösenden Datensätze stellt neue Anforderungen an den Nutzer. Es gibt bisher keine standardisierten Verfahren für die Interpretation dieser sehr hochauflösenden Scannerdatensätze (15 cm bei der HRSC-A), erforderlich sind neue Ansätze, die über die üblichen per-pixel-Verfahren hinausgehen.

Ziel dieser Arbeit ist es, das Potential dieser Daten herauszuarbeiten und Interpretationsmethoden zu entwickeln. Die Anwendung verschiedener Standardmethoden der Bildverarbeitung und neuer Methoden sollen aufzeigen, welche Informationen für die Auswertung/Nachführung automatisiert gewonnen werden können.

Die Arbeit gliedert sich in zwei Bereiche. Zunächst wird das Potential des neuen Datentyps für die Kartenerstellung untersucht, neben den möglichen Maßstabbereichen, die verwirklicht werden können, sind die Eigenschaften und die Prozessierung dieser Daten zu diskutieren.

Orthobildkarten in Maßstäben $> 1 : 5000$ wurden bisher nahezu ausschließlich mit Luftbildern hergestellt. Da die HRSC-A die Nachfolge der Reihenmeßkammer antritt, sollen die Daten und Aufnahmeparameter beider Systeme einem kritischen Vergleich unterzogen werden. Von Bedeutung ist hier insbesondere die Genauigkeit beider Systeme und das Nutzungspotential der neuartigen digitalen Daten, die gleichzeitig hochauflösende Multispektralinformation und Geländeoberflächeninformationen liefern.

Die Daten der digitalen Systeme unterscheiden sich insbesondere durch ein völlig anderes Aufnahmeprinzip von den analogen Systemen. Für den Auswertungsprozeß ist es essentiell, die daraus resultierenden besonderen Eigenschaften der digitalen Kameradaten einzubeziehen. Insbesondere die Blickwinkelunterschiede der verschiedenen Kanäle und ihre Auswirkungen, der Zeitverzug während der Aufnahme und die Kenntnis der Schritte der Datenprozessierung sind für die weitere Interpretation unverzichtbar. Die Diskussion der Eigenschaften der digitalen Kameradaten ist Bestandteil der Arbeit.

Folgende Fragenstellungen werden untersucht: Welche Möglichkeiten bieten die digitalen Daten für kartographische Anwendungen? Was macht ihre Vorteile gegenüber den analogen Luftbildern aus?

Inwieweit sind digitale Kameradaten besser geeignet als Luftbilder, hochgenaue Orthobildkarten zu erstellen?

Welche Methoden zur Kartenerstellung erweisen sich als umsetzbar?

Der zweite Teil diskutiert Interpretationsansätze für die Daten.

Der Schwerpunkt liegt auf der spektralen und texturellen Information der Daten und den Problemen der (automatisierten) Auswertung.

In der Fernerkundung wurde eine Anzahl von Standardverfahren für die Auswertung von Fernerkundungsdaten entwickelt. Diese Verfahren sind angepaßt an die Auflösungen der verfügbaren Satellitenbildsysteme von 10 bis 30 m. Es wird untersucht, inwieweit diese Untersuchungsmethoden bei der Auswertung hochauflösender Daten sinnvoll eingesetzt werden können. Von Interesse sind statistische Methoden, konventionelle pixelweise Klassifizierungsansätze und Kanalratiobildungen.

Folgende Fragen sollen diskutiert und beantwortet werden:

Wie sind die hochauflösenden Daten der neuen digitalen Kamerasysteme auszuwerten? Welche Methoden sind geeignet, um die Informationen automatisiert zu extrahieren? Erweisen sich die bewährten Methoden der Fernerkundung (pixelweise Klassifizierungen, cluster-Verfahren, statistische Vorgehensweise) als adäquate Mittel zur Interpretation und Auswertung der Daten? Welche Vorteile/Ergebnisse bringen neue Ansätze, die sich auf hierarchische Netzwerke und gebietsweise Klassifizierungen stützen? Inwieweit erweitern die besseren Eigenschaften von Scannerdaten (gegen Luftbilder) die Auswertemöglichkeiten? Inwieweit können die neuen digitalen Daten die Aktualisierung von topographischen Karten erleichtern/präzisieren/beschleunigen? Inwieweit sind hier die neuen Methoden der Klassifizierung einsetzbar?

Es werden zwei neue Ansätze entwickelt und getestet, ihre Anwendbarkeit diskutiert und ihre Genauigkeiten geprüft. Zielsetzung war ferner die automatisierte Aktualisierung von topographischen Karten (im Raster- und/oder Vektorformat).

3.1 Wahl des Arbeitsgebietes

Als Testgebiete wurden vier Regionen ausgewählt, zum einen ein Waldgebiet in Sachsen, ein Parkgebiet in Potsdam und ein städtisches Gebiet in Holland und ein Teil des Zentrums von Berlin. Bei diesen Datensätzen waren aktuelle Zusatzinformationen (Vektordatensätze mit Kartierungen, Geländeaufnahmen etc.) vorhanden.

Wichtig war das Vorhandensein von Geländeinformation, um den Umfang der Geländearbeit zu minimieren und die Überprüfbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Neu- und Andersartigkeit der Daten, die digitale Kamerasysteme wie die HRSC-A liefern, wird im vierten Kapitel beschrieben und diskutiert. Die genaue Kenntnis der Besonderheiten der Datenaufnahme, der Prozessierung und der Datensätze selbst ist unabdingbar für die weitere erfolgreiche Auswertung der Daten. Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit der Kamera, der vollautomatisierten Prozessierung und den unterschiedlichen Datenprodukten und diskutiert die Besonderheiten der digitalen Daten und die Folgen für die Auswertung.

Es ist absehbar, daß die neuen Kamerasysteme mittelfristig das herkömmliche Luftbild ersetzen werden. Ein Vergleich beider Aufnahmesysteme beleuchtet im fünften Kapitel die Unterschiede in Geometrie, Technologie, Aufnahmeprinzip und Prozessierung. Vor- und Nachteile beider Systeme und die Folgen für die Auswertung der Daten werden diskutiert

Orthobildkarten sind wertvolle zeitnahe Hilfsmittel für Planung und Kartennachführung, der Bedarf an aktuellen Geobasisdaten macht sie insbesondere für Geoinformationssysteme interessant. Bisher standen für die Erstellung von Orthobildkarten großer Maßstäbe (> 1:10 000) lediglich Luftbilder zur Verfügung. Die Eignung von Scannerdaten für die Erstellung von hochgenauen Orthobildkarten wird im sechsten Kapitel diskutiert, ein Verfahren zur Orthokartenerstellung wird vorgestellt und an einem Kartenblatt im Zentrum Berlins getestet. Ferner wird die Eignung verschiedener räumlicher Auflösungen für die Kartenerstellung in unterschiedlichen Maßstäben untersucht.

Neben der bloßen Abbildung der Welt mittels Orthobildkarten verschiedener Maßstäbe ist die (automatisierte) Auswertung der hochauflösenden Daten von Interesse. Im siebten Kapitel geht es um die Standardverfahren der Fernerkundung. Anhand des Testgebietes Sanssouci in Potsdam werden statistische Verfahren und Standardklassifizierungen auf ihre Eignung zur Auswertung hochauflösender Daten geprüft. Ferner werden verschiedene Maßstäbe simuliert und Maskierungen mit Hilfe der Höheninformation vorgestellt, um die Klassifizierungsergebnisse zu verbessern.

Im achten Kapitel werden neue Verfahren vorgestellt und getestet. Testdatensatz ist ein Waldgebiet nahe Dresden (Tharandter Wald), zur Anwendung kommt ein kombiniertes Vektor-Raster-Verfahren zur Klassifizierung der Daten (per-parcel-Ansatz).

Ein kombinierter Ansatz aus Segmentierung, objektorientierter Analyse und hierarchischer Klassifizierung wird im neunten Kapitel vorgestellt. Mit Hilfe des Softwarepaketes eCognition wird eine Methode entwickelt, um die hochauflösenden Daten zu interpretieren. Untersucht wird ferner die Möglichkeit, topographische Karten mit Hilfe der digitalen Daten zu aktualisieren.

Das zehnte und letzte Kapitel schließlich faßt die Untersuchungsergebnisse zusammen und beschreibt in einem Ausblick die weiteren Entwicklungen.

4 Die digitale Kamera HRSC-A

Die HRSC-A (High Resolution Stereo Camera - Airborne) ist ein digitaler multispektraler Stereoscanner für photogrammetrische und allgemeine Fernerkundungsanwendungen. Die Kameratechnologie wurde für die russische Mission Mars96 am Institut für Planetenerkundung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt (Neukum et al. 1990, 1995, Neukum & Lehmann 1998, Neukum 1999, Wewel et al. 1998, Albertz et al. 1992). Für flugzeuggetragene Fernerkundungsanwendungen wurde das System modifiziert. Vor allem wegen der Auslegung für den „Deep Space“-Einsatz weist die Kamera kleine Abmessungen, ein geringes Gewicht, geringen Stromverbrauch und ein robustes Design auf, Eigenschaften, die die Grundlage für die Einsatzfähigkeit im Flugzeug bilden. Wesentliches Merkmal ist ferner die Kombination aus hochauflösenden multispektralen und Stereo-Bilddaten mit einem vollautomatischen photogrammetrischen Verarbeitungssystem.

Die HRSC ist eine Weiterentwicklung des Pushbroom-Dreizeilenprinzips (Hofmann et al. 1982). Der Stereomodus in Flugrichtung (along track) mit den drei panchromatischen Stereokanälen (Nadir, vorwärtsblickend, rückwärtsblickend) wurde um zwei ebenfalls panchromatische, sogenannte Photometriekanäle erweitert, die ursprünglich für photometrische Untersuchungen der Mars-Oberfläche entwickelt worden waren. Neben diesen fünf hochauflösenden Stereokanälen besitzt die Kamera vier Farbkanäle, die die gleichzeitige multispektrale Erfassung der Erdoberfläche gewährleisten. Alle neun CCD-Zeilen sind in der Fokalebene lediglich eines Objektivs angeordnet und geometrisch kalibriert. Die radiometrische Auflösung der Daten liegt bei acht Bit.

Die vier Multispektralkanäle erfassen einen Spektralbereich von 395 nm bis 1020 nm, die panchromatischen Sensoren Nadir, Stereo und Photometrie nehmen mit einer Bandbreite von 585 nm bis 765 nm das gesamte sichtbare Licht bis in den nahen infraroten Bereich auf. Die Wellenlängenbereiche der vier Multispektralkanäle können der Tabelle 1 entnommen werden.

Durch die moderne Steuerungselektronik sind verschiedene Betriebsmodi möglich (siehe Tabelle 3), die flexible Einsätze je nach Nutzungsanforderung ermöglichen. Durch Variation der Integrationszeiten in Flugrichtung können verschiedene Auflösungen erzielt werden (vgl. Kap. 4.1.1.). Die Daten werden an Bord des Flugzeugs über vier parallele Signalketten unkomprimiert auf einem SONY-Hochgeschwindigkeits-Bandrecorder aufgezeichnet. Die Kamera liefert eine Datenrate von zehn Mbyte pro Sekunde.



Abb. 2: Die digitale Kamera HRSC-A (links) und die spin-off-Entwicklung HRSC-AX (rechts), die seit Herbst 2000 verfügbar ist

Die photogrammetrische Genauigkeit beträgt 15-20 cm lateral und vertikal in bezug auf die absolute äußere Orientierung. Die räumliche Auflösung liegt im Dezimeterbereich (10 cm aus einer Flughöhe von 2 500 m).

Von der HRSC-A sind für Flugzeuganwendungen zwei Versionen verfügbar: die HRSC-A/QM und die HRSC-A/RMK. Die HRSC-A/QM (Qualifikationsmodell) ist in ihrer grundlegenden Struktur und Elektronik praktisch identisch mit dem für Mars96 entwickelten System mit Originaloptik. Die HRSC-A/RMK besteht im wesentlichen aus der Sensoreinheit der HRSC und einigen zusätzlichen optomechanischen und elektronischen Schnittstellen in Verbindung mit einer Zeiss Reihenmeßkammer RMK TOP 15. Die digitale HRSC-Sensoreinheit ersetzt dann die konventionelle Filmbox (T-MC). Beide Systeme sind in Flugkonfiguration auf der Zeiss T-AS Stabilisierungsplattform montiert (Lehmann et al. 1998).

Das optoelektronische HRSC-A-System bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber konventionellen, auf Film basierenden Kamerasystemen:

- Schneller Zugriff auf digitale Daten
- Hohe radiometrische Auflösung
- Fünf Stereokanäle/photometrische Kanäle
- Vier Multispektrale Kanäle von Blau bis zum nahen Infrarot

Am Institut für Planetenerkundung ist in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin eine vollautomatisierte photogrammetrische und kartographische Verarbeitungsprozedur entwickelt worden, zu der die digitale Bildangleichung, die Generierung von Orthobildern, Bildmosaiken und Digitalen Geländemodellen (DOM) gehören.

4.1 Technische Parameter HRSC-A; HRSC-AX und HRSC-AXW

Tab. 1: Die technischen Daten der Kamerasysteme

	HRSC-A	HRSC-AX	HRSC-AXW
Brennweite (mm)	175	151	47
Gesamtes Blickfeld	38° x 12°	41° x 29°	30° x 79°
Anzahl der CCD-Zeilen	9 (4 Farben)	9 (4 Farben)	5 (2 Farben)
Stereowinkel (°)	± 18,9; ± 12,9	± 20,5; ± 12	± 14,4
Öffnungswinkel (°)	11,8	28,9	78,8
Anzahl der aktiven Pixel pro Zeile	5 184	12 000	12 000
CCD-Pixelgröße (µm)	7	6,5	6,5
20 cm Bodenauflösung bei Flughöhe (m)	5000	4700	1500
Radiometrische Auflösung (Bit)	8 (10)	12	12
Spektrale Auflösung (nm)			
Panchromatisch	585-765	520-760	515-750
Farbe: Blau	395-485	450-510	-
Grün	485-575	530-576	475-579
Rot	730-770	642-682	570-680
Nahes Infrarot	925-1020	770-814	-
Maximale Zeilenfrequenz je Kanal (Zeilen/s)	450	1640	1640
Abmaße BxHxT		390x410x430	390x360x430
Masse: Kamera	32 kg	45 kg	44 kg
Adapter	40 kg	40 kg	40 kg
Stabilisierung	Stabilisierte Zeiss T-AS- Plattform		
Datenaufzeichnung	SONY Hochgeschwindigkeits-Bandrekorder		

Eine Modifizierung der Kamera ist bereits umgesetzt, seit Herbst 2000 ist die HRSC-AX im Einsatz. Mit dem verbesserten Modell können erheblich breitere Aufnahmestreifen aufgenommen werden (mit 12 000 gibt es mehr als doppelt so viele aktive Pixel pro Zeile). Ferner ist eine Reduzierung der Blickwinkel der Farbkanäle vorgesehen, diese werden dann nur noch bis zu $\pm 6^\circ$ auseinander liegen. Für die modifizierte Kamera sind ferner andere Farbfilter vorgesehen, die auf die Interpretation von Vegetation ausgerichtet sind.

4.1.1 Funktionsweise eines CCD-Sensors

Die HRSC ist eine Digitalkamera. Zur Bildaufnahme dienen CCDs, wie sie ähnlich auch in modernen Videokameras, Scannern und Telefaxgeräten eingesetzt werden. Ein CCD (Charge Coupled Device) besteht aus einreihigen (Linien-CCD) oder mehrreihigen (Flächen-CCD) lichtempfindlichen Sensoren. Diese Sensoren arbeiten in drei Stufen:

In den fotoempfindlichen Elementen wird die einfallende Strahlung in eine zur Beleuchtungsstärke proportionale Ladungsmenge umgewandelt. Die während der Integrationsdauer angesammelte Ladung wird in einem räumlich begrenzten Potentialtopf gespeichert.

Während der sehr kurzen Auslesephase (< 1ms) erfolgt der sequentielle Transfer der angesammelten Ladungspakete längs einer Kette vom MOS-Kondensatoren (CCD als analoges Schieberegister) zu einer Ausleststufe.

In der Ausleststufe wird jedes ankommende Ladungspaket in ein zur Ladungsmenge und damit zur Beleuchtungsstärke proportionales Spannungssignal umgewandelt. Das Spannungssignal wird anschließend durch einen Analog/Digitalwandler in einen Digitalwert umgewandelt. Bei der HRSC-A handelt es sich dabei um einen 8 bit Analag/Digitalwandler, der Werte zwischen 0 (schwarz) und 255 (weiß) bildet.

CCDs können lediglich verschiedene Helligkeitswerte aufnehmen, mit Hilfe verschiedener Filter werden Objekte in den unterschiedlichen Spektralbereichen aufgenommen und später im Computer durch Farbaddition wieder zu einem Farbbild zusammengefügt. Die drei Stereo- und zwei Photometrikanäle haben einen Clear-Filter, der den gesamten Spektralbereich durchläßt, die vier Spektralkanäle sind jeweils mit einem Rot-, Grün-, Blau- und Nah-Infrarot-Filter versehen.

Das einfallende Licht bewirkt eine Aufladung der „Potentialtöpfe“ in den CCD-Sensoren. Die über einen Zeitraum von 2,24 ms integrierten Ladungen werden in ein Schieberegister übertragen, und zwar alle geraden (even) zur linken Seite des CCD und alle ungeraden (odd) zur rechten Seite. Die Inhalte der Schieberegister werden nun durch einen Vorverstärker um den Faktor 10 verstärkt und danach über einen Multiplexer wieder in die richtige Reihenfolge gebracht. Die Signale liegen nun nicht mehr nach odd und even getrennt vor, sondern der Reihe nach. Jedes Sensor-Modul überträgt seine Signale zu jeder der vier Signalketten. In den Signalketten entscheidet ein Multiplexer, welches CCD-Signal verarbeitet wird. Das zu verarbeitende Signal wird nun in einem Verstärker (gain control) in 19 einzustellenden Stufen verstärkt. Nach einer Filterung des Analogsignals wird aus dem ausgelesenen CCD-Signal ein lineares, dem Helligkeitswert entsprechendes Signal erzeugt. Dieses Signal wird schließlich in einen digitalen 8bit-Wert umgewandelt.

Tab. 2: Mögliche Befliegungsmodi

Modus Anzahl CCDs	Stereo 1	Stereo 2 (ohne Farbe)	Stereo ohne Photometrie	Photo- metrie	Colo r 1	Color 2	Color 3
1 Nadir	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	. / .
2 Stereo	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 2	1 x 2	1 x 4	. / .
2 Photometrie	1 x 4	1 x 2	. / .	1 x 2	. / .	1 x 4	. / .
4 Color	1 x 8	. / .	1 x 4	1 x 4	1 x 2	1 x 2	1 x 1

Beispiel für die entstehenden Makropixel beim Stereo-Mode 1:

Unterschiedliche Integrationszeiten für die verschiedenen Befliegungsmodi, Pixelgröße 12 cm, Flughöhe 3000 m. Entscheidend ist die kleinste Integrationszeit und die Fluggeschwindigkeit.

1x1 = 12 cm (x 12 cm)

1x2 = 12 cm (x 24 cm)

1x4 = 12 cm (x 48 cm)

1x8 = 12 cm (x 96 cm)

Das heißt, Nadir und Stereokanäle werden in der vollen Auflösung von 12 cm aufgenommen, die übrigen Kanäle habe eine reduzierte Auflösung von 48 cm (Photometrie) bzw. 96 cm (Farbe). Im Rahmen der späteren Prozessierung werden die Pixelgrößen der verschiedenen Kanäle über ein Resampling auf ein einheitliches Format gebracht.

Auflösung der Pixel in x- und y-Richtung

Die Pixelauflösung in Flugrichtung ist eine Funktion aus Fluggeschwindigkeit und Integrationszeit. Üblicherweise wird mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h geflogen, es ergibt sich eine Pixelgröße von rund 15 cm. Bei größeren Geschwindigkeiten verringert sie sich proportional, bei einer Geschwindigkeit von 500 km/h beträgt sie nur noch 30 cm. Senkrecht zur Flugrichtung bestimmt die Flughöhe die Pixelgröße. Quadratische Pixel mit einer Auflösung von 15 cm entstehen bei einer Fluggeschwindigkeit von 250 km und einer Flughöhe von 3750 m.

Im Rahmen der späteren Prozessierung (von Level 2 zu Level 3) werden auch nicht quadratische Pixel angeglichen. Nachfolgend die Formeln zur Berechnung der Pixelauflösung in Flugrichtung und senkrecht dazu.

Pixelauflösung in Flugrichtung:

$$\begin{aligned} P_x &= V_{\text{Flug}} \times \Delta t \\ &= V_{\text{Flug}} \times 0,00224 \text{ sec} \\ &= 70 \text{ m/s} \times 0,00224 \text{ s} = 15,68 \text{ cm} \end{aligned}$$

mit Fluggeschwindigkeit über Grund $V_{\text{Flug}} = 252 \text{ km/h} = 70 \text{ m/s}$

und Integrationszeit $\Delta t = 0,00224 \text{ s}$

(gilt für den vollaauflösenden Nadir, für Makropixel gilt jeweils das Vielfache)

Pixelauflösung senkrecht zur Flugrichtung:

$$P_y = \frac{h \cdot c}{f}$$

mit Größe des CCD-Elements $c = 0,007 \text{ mm}$, Brennweite $f = 175 \text{ mm}$ und Flughöhe h über Grund

Beispiel für eine Flughöhe von 10 000 m:

$$P_y = \frac{h \cdot c}{f}$$

$$P_y = \frac{h \cdot 0,007 \text{ mm}}{175 \text{ mm}} = 40 \text{ cm} \quad (h = 10\,000 \text{ m})$$

Streifenbreite L_S (Flughöhe: 3500 m, Pixelgröße 14 cm)

$$\begin{aligned} L_S &= P_y \times P_n \\ &= P_y \times 5184 \text{ Pixel} \\ &= 14 \text{ cm} \times 5184 \\ &= 725,76 \text{ m} \end{aligned}$$

mit P_y = Pixelgröße, P_n = Anzahl der Pixel pro CCD-Zeile

Mit der neuen Kamerageneration steht mit 1640 Zeilen pro Sekunde eine erheblich höhere Auslesefrequenz als bisher (450 Zeilen/s) zur Verfügung. Diese höhere Auslesefrequenz ermöglicht auch bei niedrigen Flughöhen (bis 1000 m) quadratische Pixel, d.h., die Auflösung in Flugrichtung ist um den Faktor 4 erhöht worden.

4.2 Spektrale Eigenschaften der HRSC-A

Zu den wichtigen radiometrischen Eigenschaften von Sensordaten gehört ihre spektrale Auflösung. Das spektrale Auflösungsvermögen wird durch die Anzahl und Breite der vom Sensor erfaßten Wellenlängen, d.h. der Spektralkanäle, bestimmt. Da die Vegetation in bestimmten Wellenlängenbereichen des sichtbaren Lichts und des Nahen Infrarot charakteristische Reflexionseigenschaften aufweist, ist die Lage der Spektralkanäle für Vegetationsklassifizierungen maßgebend. Auch die Breite der Kanäle bestimmt die spektrale Qualität der Bilddaten. Der Wechsel von erhöhter Absorption und erhöhter Reflexion wird bei einer engen Bandbreite mit höherer Genauigkeit erfaßt als bei einer großen Bandbreite, da der vom System aufgezeichnete Reflexionswert immer der Mittelwert der Rückstrahlung innerhalb eines Spektralkanals ist.

Bei der HRSC-A entstehen bei erdorientierten Nutzungen Probleme durch die Definition der Multispektralkanäle. Die ursprüngliche Kamera wurde für die Erforschung der Mars-Oberfläche konzipiert. Dementsprechend wurden geologische Schwerpunkte bei der Festlegung der Spektralkanäle gesetzt, die Erforschung von Vegetation spielte bei der Wahl der Bänder folgerichtig keine Rolle. Zur Erkennung und Unterscheidung von Vegetation sind die Multispektralkanäle der HRSC-A daher nur bedingt geeignet. Abbildung 3 zeigt beispielhaft Vegetationsspektren und die Bandbreiten der Multispektralkanäle.

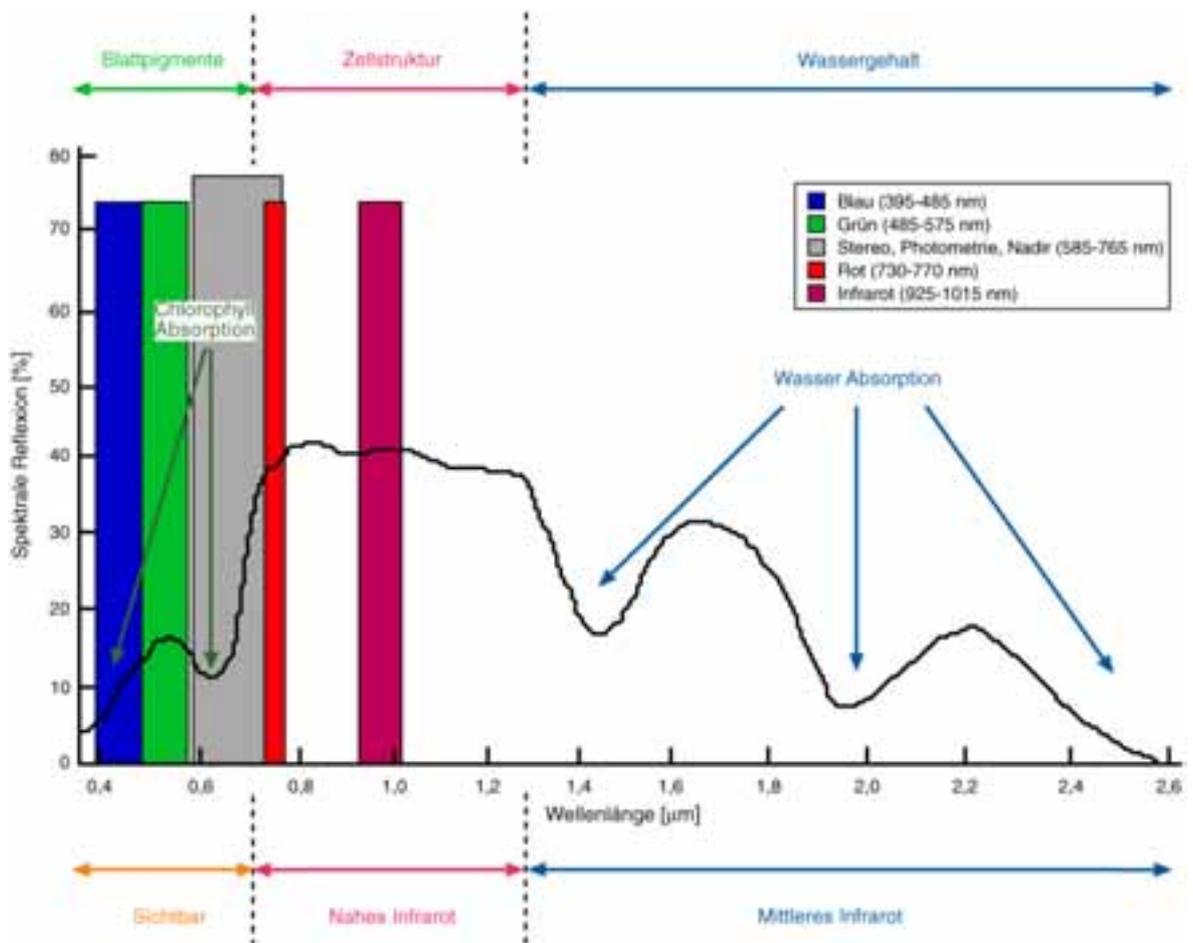


Abb. 3: Vegetationsspektren und die Bandbreiten der HRSC-A-Multispektralkanäle.

Dies wird sich in den modifizierten Weiterentwicklungen der Kamera ändern: Für die HRSC-AX wurden Multispektralkanäle in Anlehnung an die Spektralkanäle der MOMS-Kamera definiert, die besser an Anwendungen im Vegetationsbereich angepaßt sind. Tabelle 2 zeigt die Spektralbereiche der verschiedenen Systeme im Überblick.

Tab. 3: Die Spektralbereiche der verschiedenen Systeme im Überblick

	HRSC-A (nm)	HRSC-AX (nm)	MOMS (nm)
Rot	730-770	642-682	645 - 677
Grün	485-575	530-576	532 - 576
Nadir	585-765	520-760	512 - 765
Blau	395-485	450-510	449 - 511
Infrarot	925-1015	770-814	772 - 815

Problematisch für die Auswertung der HRSC-A-Daten ist ferner eine fehlende radiometrische Kalibrierung, d.h. die Bestimmung der Abhängigkeit der Meßwerte von der Intensität der ankommenden Strahlung. Diese fehlende Kalibrierung erschwert die Entwicklung von einheitlichen Klassifizierungsstrategien. Die radiometrische Qualität der Bilddaten wird jeweils wesentlich beeinflusst durch die sich während des Fluges ändernde Witterung (Wolken, Windböen), durch späte oder sehr frühe Aufnahmezeiten, Sonnenstand (Aufnahmezeiten in Abhängigkeit von Jahreszeit und geographischer Breite) oder durch starke Intensitätsunterschiede, die durch variable Wasserdampf-/Aerosolgehalte hervorgerufen werden. Durch elektronische Verstärkung des Signales kann während der Aufnahme Einfluß genommen werden: Über einen Kontrollmonitor werden die Einstellungen kontrolliert und korrigiert. Die Daten haben eine Auflösung von 6-8 Bit.

Tab. 4: Wellenlängenbereiche und Blickwinkel der verschiedenen Kanäle

Sensorzeile	Kanal	Farbe des Filters	Wellenlänge [nm]	Bandbreite [nm]	Blickwinkel [Grad]
5 F (SF)	Stereo	panchromatisch	675 ± 90 (585-765)	180	18,9°
4 F (Rd)	Rot	fernes Rot	750± 20 (730-770)	40	15,9°
3 F (PF)	Photometrie	panchromatisch	675 ± 90 (585-765)	180	12,8°
2 F (Bl)	Blau	blau	440 ± 45 (395-485)	90	3,3°
1 N (Nd)	Nadir	panchromatisch	675 ± 90 (585-765)	180	0°
2 A (Gr)	Grün	grün	530 ± 45 (485-575)	90	3,3°
3 A (PA)	Photometrie	panchromatisch	675 ± 90 (585-765)	180	12,8°
4 A (IR)	Infrarot	infrarot	970 ± 45 (925-1015)	90	15,9°
5 A (SA)	Stereo	panchromatisch	675 ± 90 (585-765)	180	18,9°

Die Pixel der neun Kanäle haben aufgrund der verschiedenen Makropixelformate jeweils verschiedene Größen. Im Rahmen der späteren Prozessierung werden diese unterschiedlichen Pixelgrößen über ein Resampling auf eine einheitliche Größe gebracht. Hierfür stehen die Transformationsverfahren nearest neighbour, bilinear and cubic convolution zur Verfügung. Standardmäßig wird mittels der bilinearen Interpolationsmethode resampelt. Vorteil dieser Methode ist die größere geometrische Genauigkeit des Verfahrens im Vergleich zu nearest neighbour, ferner sind die Übergänge weicher, Treppen-Effekte wie bei der nearest neighbour-Methode sind nicht zu beobachten (ERDAS 1997). Verschiedene Testreihen haben gezeigt, daß das Ergebnis dieser Resamplingmethode sehr gut ist. Nachteil des Verfahrens ist, daß die Originalpixelwerte verändert werden, die bilineare Interpolation hat den Effekt einer niederfrequenten Filterung. Vorteil dieser Filterung ist die Dämpfung von Bildrauschen. Pixelwerte werden gemittelt und Kanten geglättet, manche Extreme der Grauwerte gehen verloren. Dies führt zu Unsicherheiten bei der

spektralen Auswertung der Daten. Auch bei der cubic convolution werden die Eingangsgrauwerte verändert, ferner ist diese Methode sehr rechenintensiv (Albertz 1991).

Das Verfahren der Wahl für spektrale Klassifizierungen ist das nearest neighbour-Verfahren, das die Originalgrauwerte der Daten erhält (ERDAS 1997). Bei dieser Resampling-Methode verändert sich jedoch die geometrische Qualität der Scannerdaten erheblich, die Objekte zeichnen sich durch eine für das Verfahren typische treppenartige Struktur an den Rändern aus (Abb. 4). Im Rahmen der Untersuchung von Standardverfahren der Fernerkundung wird diese Einschränkung der spektralen Auswertemöglichkeiten weiter diskutiert.

Eine weitere Veränderung der Grauwerte findet während der Mosaikbildung aus den verschiedenen Flugstreifen statt. Bei der Histogrammanpassung zwischen den Flugstreifen werden die Bilddaten der Einzelstreifen verändert. Es werden Grauwertkorrekturtabellen für jeden Streifen berechnet und angewendet. Dadurch wird eine homogene Grauwertverteilung zwischen den einzelnen Streifen erreicht. Für die Überlappungsbereiche wird ein gewichtetes Mittel aus den verschiedenen Grauwerten bestimmt und dem Ergebnismosaik zugewiesen.

Die Orthobilddaten, die zur Klassifizierung zur Verfügung stehen, sind durch die verschiedenen Prozessierungsschritte spektral erheblich verändert worden. Somit sind Klassifizierungsstrategien zur Interpretation der Datensätze erforderlich, die nicht ausschließlich auf den spektralen Eigenschaften von Objekten beruhen. Die Blickwinkelunterschiede erfordern ferner ein Klassifizierungsverfahren, das robust gegen Farbsäume an den Rändern von Objekten ist.

Auswirkungen der Blickwinkelunterschiede der HRSC-A

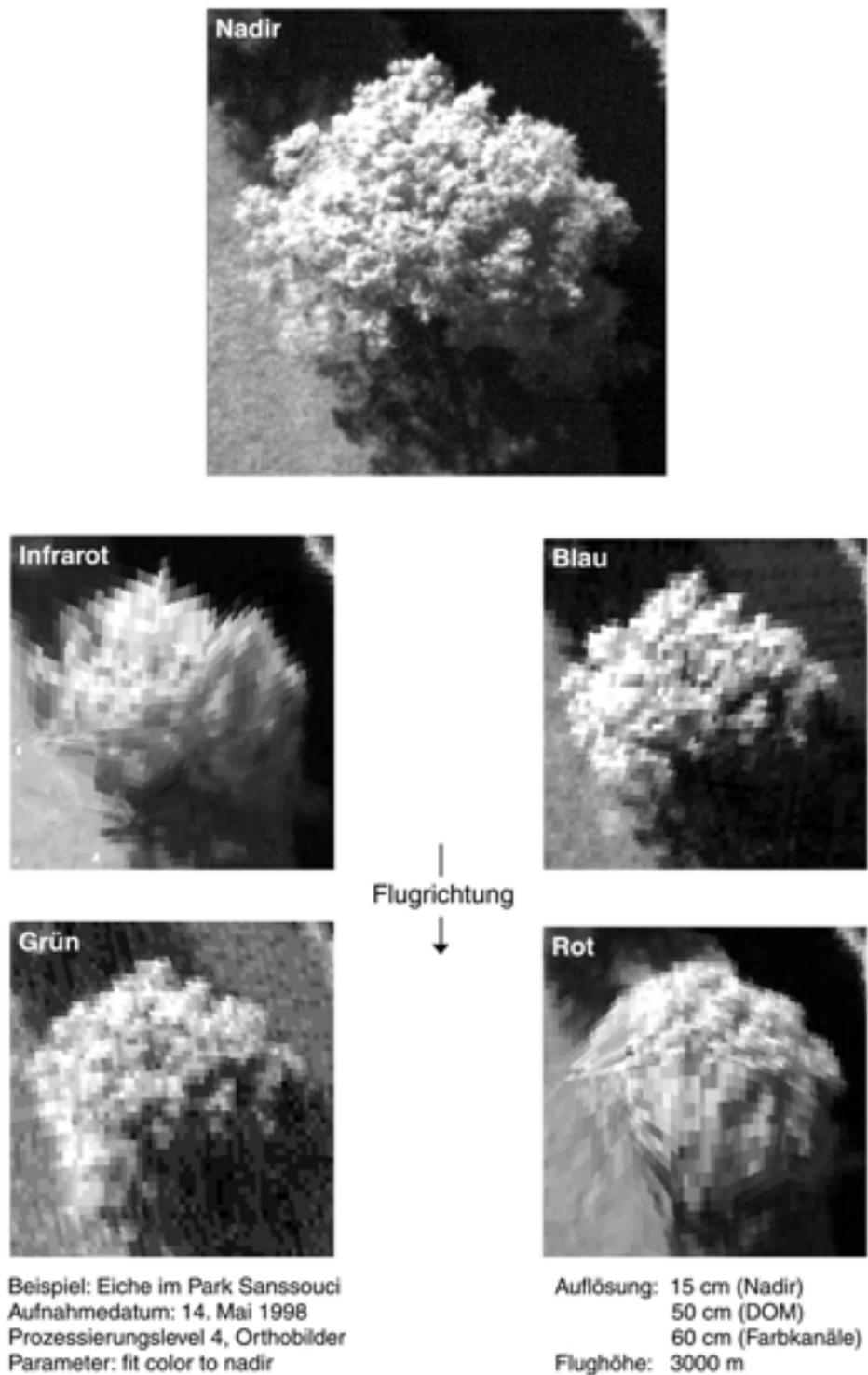
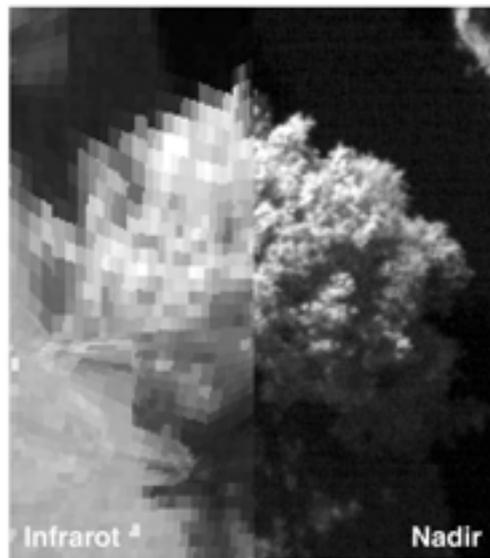
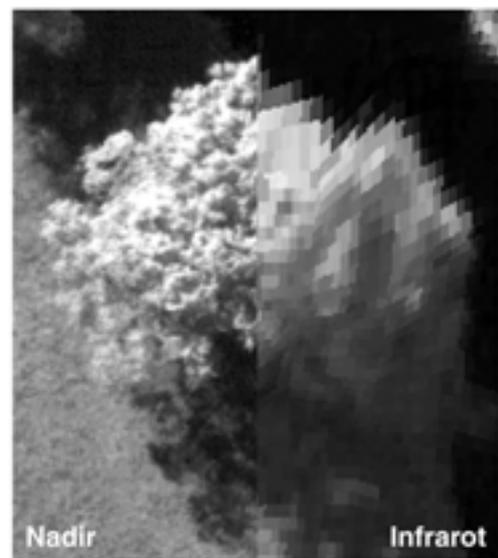


Abb. 4: Auswirkungen des Resamplings mittels Nearest neighbour

Auswirkungen der Blickwinkelunterschiede der HRSC-A



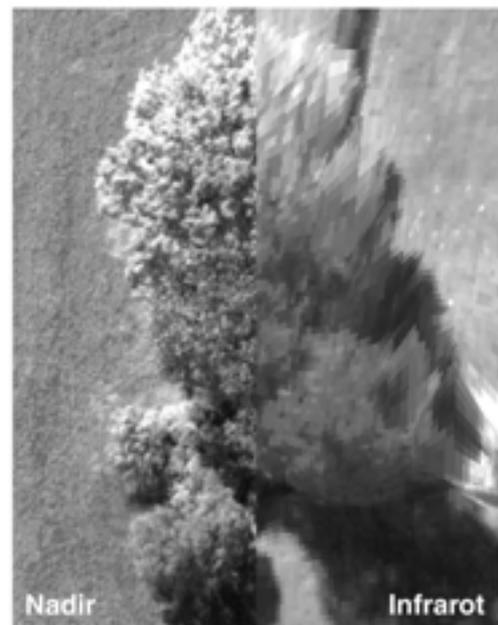
Beispiel: Eiche im Park Sanssouci
 Aufnahme datum: 14. Mai 1998
 Prozessierungslevel 4, Orthobilder
 Parameter: fit color to nadir



Auflösung: 15 cm (Nadir)
 50 cm (DOM)
 60 cm (Farbkanäle)
 Flughöhe: 3000 m



Beispiel: Baumgruppe im Park Sanssouci
 Aufnahme datum: 14. Mai 1998
 Prozessierungslevel 4, Orthobilder
 Parameter: fit color to nadir



Auflösung: 15 cm (Nadir)
 50 cm (DOM)
 60 cm (Farbkanäle)
 Flughöhe: 3000 m

Abb. 5: Auswirkungen des Resamplings mittels Nearest neighbour: Die Abbildung zeigt jeweils denselben Baum, dargestellt in verschiedenen Kanälen.

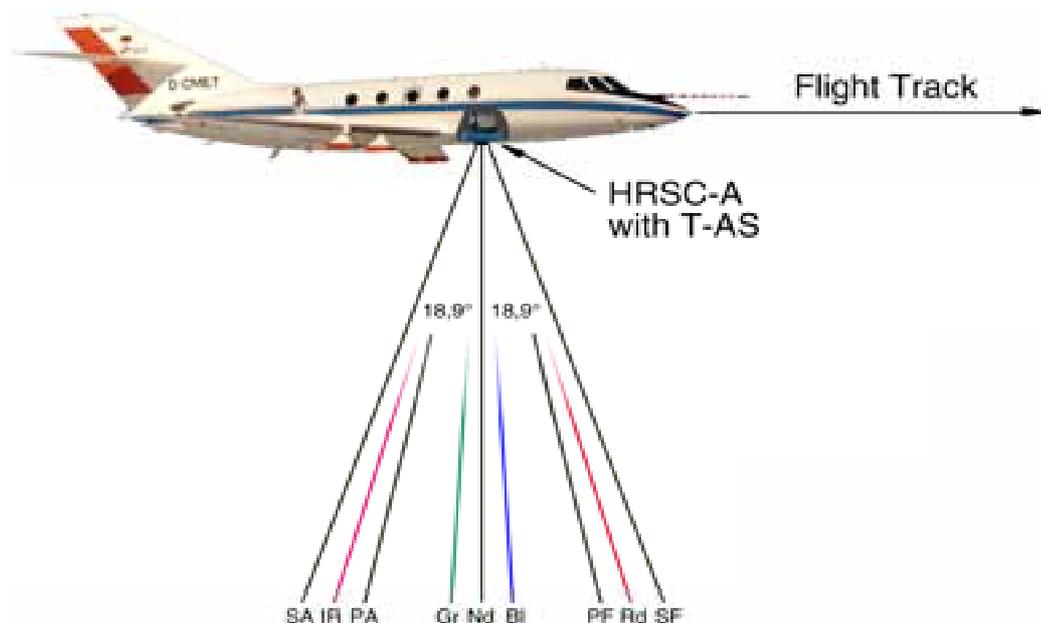


Abb. 6: Aufnahmeprinzip des multispektralen Stereo-Zeilenscanners HRSC-A (SA: Stereo rückwärts, panchromatisch, IR : Infrarot; PA: Photometrie rückwärts, panchromatisch; Gr: Grün; Nd: Nadir, panchromatisch; Bl: Blau; PF: Photometrie vorwärts, panchromatisch; Rd: Rot; SF: Stereo vorwärts, panchromatisch)

4.3 Aufnahmeprinzip

Die HRSC-A arbeitet nach dem „Pushbroom“-Prinzip. Neun CCD-Zeilen sind parallel auf der Fokalebene des Instruments hinter einer Optik montiert. So werden durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs über den Boden neun sich überlagernde Bildstreifen simultan gewonnen.

Die Streifenbreite der Kamera ist abhängig von der Anzahl der aktiven Pixel pro Zeile. Bei der üblichen Flughöhe von 3000 m beträgt die Streifenbreite 622 m. Da mit einer Überlappung geflogen werden muß (üblicherweise 30-50%) reduziert der Abstand der Flugstreifen bei einer 30%igen Überlappung auf 422 m. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die verschiedenen Parameter bei der Datenaufnahme und zeigt die Pixelgrößen und Streifenbreiten, jeweils abhängig von der Flughöhe.

Die Pixelgröße in x-Richtung (in Flugrichtung) beträgt 15 cm bei einer Fluggeschwindigkeit von 250 km/h, dies gilt für alle Höhen. Als ideale Flugparameter gelten eine Flughöhe von 3500 m und eine Fluggeschwindigkeit von 250 km/h (typisch für Cessna 208 Caravan). Üblicherweise wird - je nach Anwendung - mit einer Überlappung von 30 bis 50 % geflogen. Mit der neuen Kamera (HRSC-AX) wird die Streifenbreite mehr als verdoppelt, bei einer Flughöhe von 4600 m (20 cm Bodenauflösung) bedeutet dies bei 40%er Überlappung einen Abstand der Flugstreifen von 1440 m (HRSC-A: 625 m).

Tab. 5: Die Bodenpixelgröße bei verschiedenen Flughöhen

Flughöhe	Pixelgröße (y) (bei Mode 1 x 1)	Abstand der Flugstreifen (bei 30% Überlappung)
1000 m	4 cm	207 (138) m
1500 m	6 cm	311 (207) m
2000 m	8 cm	414 (276) m
2500 m	10 cm	517 (344) m
3000 m	12 cm	622 (414) m
3500 m	14 cm	725 (483) m
4000 m	16 cm	829 (552) m
10000 m	40 cm	2070 (690) m

4.4 Die systematische und photogrammetrische Prozessierung der HRSC-A-Daten

Die Prozessierung der Kameradaten erfolgt in einem vollständig automatisierten Prozeß. Die Software für die photogrammetrische und kartographische Verarbeitungsprozedur der Daten wurde in Kooperation von DLR und TU Berlin entwickelt. Die Prozessierung beinhaltet die digitale Bildangleichung und die Generierung von Orthobildern, Bildmosaiken und Oberflächenmodellen.

4.4.1 Die systematische Prozessierung

Im Rahmen der systematischen Verarbeitung werden die Ausgangsdaten für die nachfolgende photogrammetrische Prozessierung vorbereitet. Die systematische Verarbeitung umfaßt das Auslesen der Originaldaten (Bild- und GPS/INS-Daten), das Zusammenfassen von Bilddaten zu vollständigen Datensätzen je Kanal und Flugstreifen sowie die radiometrische Kalibrierung der Bilddaten. Diese Prozesse laufen vollautomatisiert.

Zunächst werden die Rohdaten demultiplext zu Bilddaten der einzelnen HRSC-A-Sensoren (Level 1) und relativ radiometrisch kalibriert (Level 2). Diese Kalibration beinhaltet eine Korrektur unter Berücksichtigung der Sensortemperatur und der bei der Aufnahme verwendeten Gainfaktoren sowie eine Flat-Field-Korrektur. Die für die Kalibration notwendigen Korrektortabellen werden aus den Daten von Wolkenbefliegungen berechnet (Dornier 1999).

4.4.2 Die Navigationsdaten (GPS/INS-Meßsystem)

Die geometrisch sehr hochaufgelösten Bilddaten (IFOV=0,0023°) sollen im Rahmen der Prozessierung mindestens pixelgenau geometrisch verarbeitet werden. Dies erfordert eine sehr genaue Kenntnis der Daten der äußeren Orientierung. Im Gegensatz zu analogen Meßkameras genügt es nicht, die Orientierung lediglich einiger Aufnahmezeitpunkte zu kennen. Aufnahme- und Orientierung im Raum ändern sich durch die Flugbewegung ständig und müssen kontinuierlich mit hoher Genauigkeit gemessen bzw. bestimmt werden. Diese Aufgabe übernimmt bei den HRSC-A-Befliegungen ein GPS/INS-System der Firma APPLANIX. Systemkomponenten des inertialen Navigationssystems sind drei Kreisel und drei Beschleunigungssensoren. Die Positionsbestimmung erfolgt mittels eines GPS-Empfängers. Die Genauigkeit liegt bei ± 2 - 3 cm bei der Positionsbestimmung, die Lagedaten werden mit einer Toleranz von ± 12" für den Roll- und Nickwinkel bestimmt, beim Driftwinkel beträgt die Genauigkeit ± 30" (Wewel et al. 1998).

Die Positions- und Lagedaten liegen in einer Frequenz von 200 Hz vor. Höhere Meßfrequenzen sind nicht notwendig, da das gesamte Aufnahmesystem auf einer gedämpften und kreiselstabilisierten Plattform montiert ist. Diese Plattform hat die Aufgabe, die Nadirblickwinkelrichtung zu gewährleisten, eine automatische Driftwinkelkorrektur vorzunehmen

und Vibrationen zu dämpfen. Die maximale Auslenkung beträgt für den Roll- und Nickwinkel $\pm 5^\circ$, für den Driftwinkel $\pm 30^\circ$ (Wewel & Brand 1999).

Die Navigationsdaten (Position und Lage) werden mit Hilfe der APPLANIX POSpac Software ausgewertet. Dabei werden die innerhalb kurzer Zeiträume hochgenauen Daten des INS (d.h. des Kreiselsystems) mit den langzeitstabilen differentiellen GPS-Daten mittels einer Kalmanfilterung miteinander verknüpft. Resultat ist die Lage des INS-Koordinatensystems und die Position des Kameraprojektionszentrums im erdfesten WGS84 System in einer Frequenz von 200 Hz (Dornier 1999).

Für die Vorab-Berechnung der Flugtrajektorie werden die GPS-Daten des Navigationssystems mit den Daten einer Bodenreferenzstation im 1-Sekundentakt verwendet. Bei Befliegungen in Deutschland werden für die differentielle GPS-Berechnung des Flugweges die Daten von den nächstgelegenen GPS-Stationen der jeweiligen Landesvermessungsämter (SAPOS) genutzt (Dornier 1999), falls diese Daten nicht zur Verfügung stehen, muß eine zusätzliche Bodenstation betrieben werden. Die Genauigkeit der Bahn- und Lagedaten ist abhängig von der Entfernung der GPS-Basisstation zum Befliegungsgebiet, sie sollte nicht weiter als 30 km entfernt sein. Befindet sich die Station innerhalb dieses Radius, können durch direkte Georeferenzierung ohne Verwendung von Paßpunkten absolute Punktgenauigkeiten von 20-30 cm (Flughöhe 3000 m) erzielt werden (Dornier 1999).

4.4.3 Die photogrammetrische Prozessierung der HRSC-A-Daten

Mit Hilfe des von DLR und TU Berlin entwickelten vollautomatischen photogrammetrischen Auswertesystems werden digitale Oberflächenmodelle (DOM) aus Mehrzeilenstereodaten und kartenprojizierte Orthobildern und Mosaike von Multispektral-Daten berechnet.

Grundlage für die Prozessierung sind:

- radiometrisch kalibrierte Bilddaten
- geometrische Kalibrationsdaten
- Informationen zu Position und Lage aus der APPLANIX-Datenverarbeitung
- Paßpunkt-Koordinaten (optional)
- Datumstransformationskoeffizienten (optional)

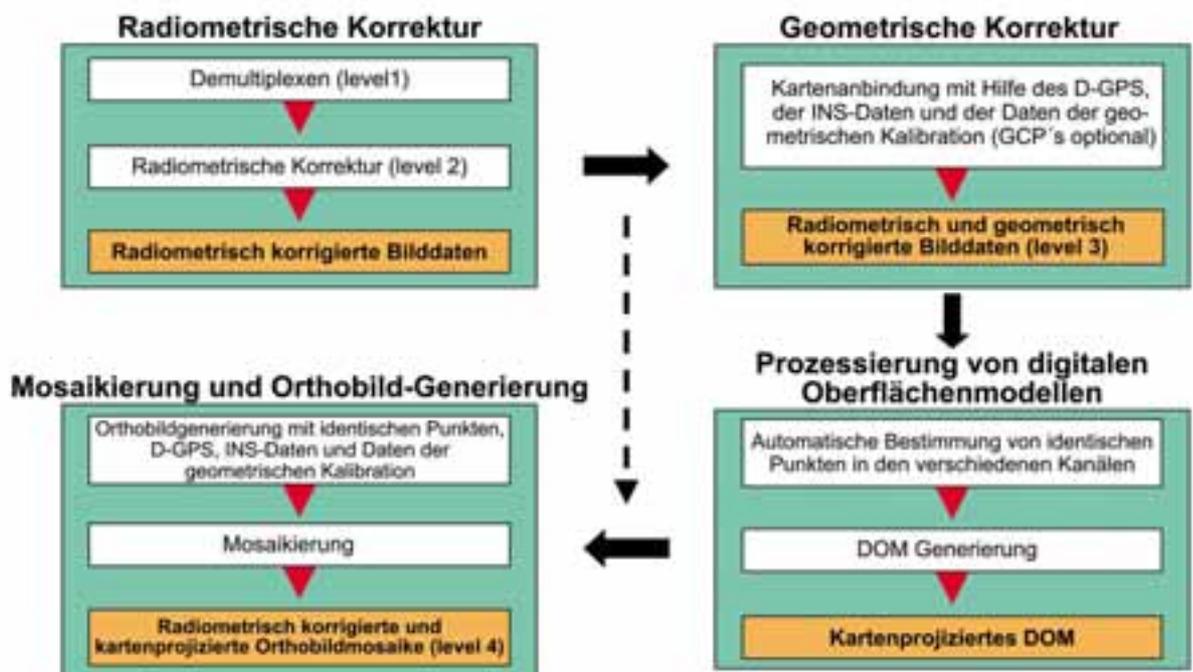


Abb. 7: Photogrammetrische Prozessierungslinie für die HRSC-A-Daten

Die Bestimmung der endgültigen äußeren Orientierung ist die Voraussetzung für die eigentliche stereophotogrammetrische Verarbeitung, bei der neben den fünf Stereokanälen auch die Farbkanäle prozessiert werden.

Erster Schritt der photogrammetrischen Datenprozessierung ist die geometrische Verknüpfung der Bilddaten mit den Positions- und Lagedaten. Die Lagedaten sind in Bezug auf die Achsen des INS bekannt. Die gemessenen Lagedaten definieren nicht die Lage der Kamera-Achsen im Raum, sondern die Drehwinkel bezüglich der Kreisachsen. Da die Achsen des INS-Systems und die des Kamerakoordinatensystems nicht exakt parallel montiert und auch nicht genau vermessen werden können, werden diese Winkeloffsets mittels eines iterativen Verfahrens photogrammetrisch ermittelt. Dies geschieht mit Hilfe von identischen Punkten, die in den Stereodaten eines Flugstreifens und einem jeweils benachbarten Flugstreifen gemessen werden (Wewel et al. 1998, Dornier 1999).

Untersuchungen haben gezeigt (Wewel et al. 1998), daß die so verbesserten Positions- und Lagedaten relative Punktgenauigkeiten liefern, wie sie bisher nur bei der Luftbildverarbeitung mit erheblich höherem Aufwand erreicht werden konnten.

Der nächste Schritt ist die Generierung fluglagekorrigierter Bilddaten je Flugstreifen. Diese Vorkorrektur der Bilddaten für die Berechnung des Digitalen Oberflächenmodells (DOM) ist aufgrund der hochfrequenten Bildstörungen notwendig (siehe Abb. 8), welche die Bildpunktzuordnung in den Stereobilddaten für die DOM-Berechnung nachhaltig negativ beeinflussen. Ergebnis der Korrektur sind nahezu y-parallaxenfreie Stereobilddaten. Die Bilddaten weisen nur noch geländehöhenbedingte Einflüsse in Flugrichtung auf (Dornier 1999).

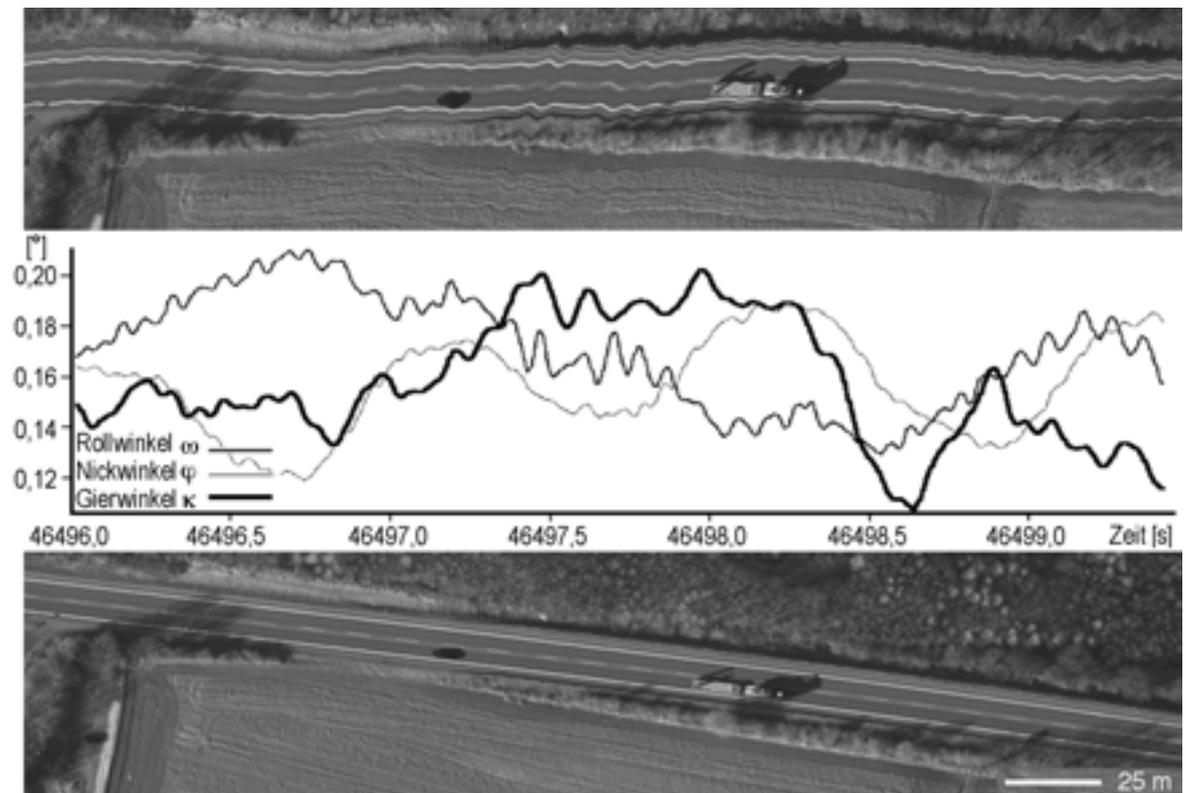


Abb. 8: Unkorrigiertes und lagekorrigiertes HRSC-A Bild mit dazugehörigen Fluglagedaten (Wewel & Brandt 1998)

Eine Überlagerung der einzelnen entzerrten Farbkanäle ist zwar jetzt schon möglich, in Gebieten mit einer Abweichung der noch nicht modellierten Topographie von der Höhenbezugsfläche treten jedoch noch Farbsäume auf, da die Farbkanäle aus verschiedenen Beobachtungsrichtungen aufgezeichnet wurden. Diese Blickwinkelunterschiede haben Auswirkungen auf die spätere Auswertung der Daten und werden noch eingehend diskutiert. Die fluglagekorrigierten Daten dienen als Ausgangsdaten für die anschließende flächenhafte Bildzuordnung.

Für die dreidimensionale Modellierung des Geländes wird ein Digitales Oberflächenmodell (DOM), d.h. eine flächendeckende Beschreibung der in den Bilddaten abgebildeten Oberfläche benötigt. Erster Schritt für die Generierung eines DOM ist ein weiterentwickeltes Bildzuordnungsverfahren, das Multi-Image-Matching (Wewel 1996). Unter Verwendung aller fünf Stereokanäle werden dabei in einem mehrstufigen Pyramidenverfahren flächenhaft homologe Bildpunkte bestimmt. Bei sehr steilen Geländekanten erweisen sich die mit einem kleinen Stereowinkel aufgenommenen Photometrikanäle als besonders hilfreich. In den unteren, gröberen Pyramidenstufen werden mit Hilfe der Kreuzkorrelation Näherungswerte für die nächsthöhere Stufe bestimmt, bis in der obersten feinsten Stufe das Verfahren der Kleinste-Quadrate-Korrelation die endgültigen Bildkoordinaten mit Subpixelgenauigkeit liefert. Als Objektpunkte der anschließenden DOM-Berechnung werden nur solche Punkte akzeptiert, die in mindestens drei der fünf Stereobilder gefunden wurden und deren Fehler bei der Schnittpunktberechnung kleiner als 50 cm ist. Da für die Bildzuordnung fluglagekorrigierte Bilddaten verwendet werden, werden die ermittelten Bildkoordinaten der homologen Punkte anschließend in die Originalbilddaten zurückgerechnet (Wewel & Scholten 1999).

Die auf die Originaldaten bezogenen Koordinaten homologer Punkte definieren mit der bekannten inneren und äußeren Orientierung jeweils Sichtstrahlen im Raum. Da bei der Bildzuordnung fünf Stereokanäle verwendet werden, ergeben sich somit mehrfach kontrollierte Schnittpunkte im Raum, dies ermöglicht das Eliminieren von Fehlkorrelationen und eine Abschätzung der relativen Genauigkeit der Schnittpunkte. Weiterverarbeitet werden nur die Objektpunkte, die sämtlichen definierten Qualitäts- und Plausibilitätskriterien genügen. Die Pixelauflösung der vorkorrigierten Stereobilddaten beträgt 25 cm. In diesen so vorkorrigierten Bilddaten der fünf Stereosensoren werden massenhaft identische Punkte für die DOM-Berechnung einander zugeordnet (Dornier 1999).

Bei der DOM-Berechnung wird anschließend aus diesem unregelmäßigen Objektpunkthaufen im Raum in ein regelmäßiges Grundrißraster von Höhenpunkten umgerechnet, das in der gewünschten Kartenprojektion mit gegebenem Bezugsellipsoid definiert ist. Bei diesem Übergang auf eine nicht auf dem WGS84-System basierenden Kartenprojektion erfolgt ein Datumsübergang auf das jeweilige geodätische Datum des Zielbezugsellipsoids mit Hilfe von Datumstransformationskoeffizienten (Dornier 1999). Das flächendeckende Digitale Oberflächenmodell liegt somit in einer grauwertkodierten Form als geokodiertes 16-bit-Bildfile mit einer z-Auflösung von 10 cm vor. Dieses DOM ist sowohl ein Endprodukt wie auch Grundlage für die Generierung von Orthobildern.

Bei der Orthobilderstellung werden unter Kenntnis der Oberflächenform Orthobildstreifen sämtlicher Spektralkanäle erzeugt. Die Sichtstrahlen, die durch die einzelnen Originalpixel unter Berücksichtigung der Daten der inneren (Kalibrationsdaten) und äußeren Orientierung definiert sind, werden mit dem Oberflächenmodell verschnitten (Scholten 1996). Bei diesem Verfahren wird der Schnittpunkt im Raum durch iteratives Verändern der Höhe entlang des Sichtstrahls bestimmt (ray tracing). Diese Schnittpunkte aller Bildpixel werden wiederum in eine Kartenprojektion umgerechnet, die entsprechenden Ergebnisgrauwerte werden mittels eines indirekten resampling aus den Originalgrauwerten ermittelt (Dornier 1999).

Die Genauigkeiten des Gesamtsystems und seine hohe geometrische Auflösung bieten nun zusammen mit der Kenntnis der abgebildeten Oberfläche die Möglichkeit, im Rahmen verschiedener Spektralkombinationen beliebige farbige Orthobilddaten eines Flugstreifens zusammenzustellen. Aufgrund der geringen Streifenbreite der Daten ist das Interessengebiet meist durch mehrere Flugstreifen erfaßt, so daß als letzter Schritt der Prozessierung eine Mosaikbildung notwendig ist. Nach der Orthobildberechnung liegen die Bilddaten in einer Kartenprojektion auf einem frei wählbaren Bezugsellipsoid vor. Da die Farbsensoren der HRSC-A jeweils einen unterschiedlichen Blickwinkel aufweisen und somit nicht in gleichem Maße von der Geländeform beeinflusst sind, ist die Orthobildgenerierung unerlässlich für die Kombination der verschiedenen Farbkanäle (Wewel & Scholten 1999).

Die anschließende Mosaikbildung mehrerer Flugstreifen erfolgt vollautomatisch für jeden Spektralkanal getrennt. Ohne Vorabinformation werden zunächst die Überlappungsbereiche der einzelnen Streifen bestimmt. Die Grauwertinformation dieser Bereiche ist Basis für Grauwertkorrekturtabellen jedes einzelnen Streifens. Die Anwendung dieser Korrekturtabellen führt zu einer homogenen Grauwertverteilung zwischen den einzelnen Streifen (Wewel & Scholten 2000).

Letzter Schritt vor der Generierung des endgültigen Bildmosaiks ist die Eliminierung der Mehrfachinformation in den Überlappungsbereichen. Hierzu werden Trennlinien in den Überlappungsbereichen definiert, ein gewichtetes Mittel wird aus den noch leicht verschiedenen Grauwerten bestimmt und dem Ergebnismosaik zugewiesen. Beliebige großflächige farbige Orthobildmosaike können nun durch Überlagerung der verschiedenen Einzelmosaike generiert werden, die Mosaikbildung erfolgt getrennt für alle Bildkanäle. Entscheidend für eine erfolgreiche Histogrammanpassung ist eine konstante Beleuchtungssituation während der Aufnahme des gesamten Streifens. Veränderungen in der Helligkeit der Bilddaten innerhalb eines Streifens (z.B. durch Wolken) können nicht korrigiert werden, sie führen zu Störungen innerhalb des Bildmosaiks (Dornier 1999).

Mit Hilfe der RGB-IHS-Farbraumtransformation können dabei die meist höher aufgelösten panchromatischen Nadirdaten mit den jeweiligen Farbkanälen kombiniert werden, so daß hochauflösende farbige Bildprodukte entstehen (Wewel & Scholten 2000).

Abb. 10 zeigt die verschiedenen Prozessierungsstadien (Rohdaten, radiometrisch korrigiert; geometrisch korrigierte Daten; digitales Oberflächenmodell; Orthobilder)

Die Nettoprozessierungszeiten schwanken stark, sie sind abhängig von der angestrebten Auflösung der Bildprodukte bzw. der Rasterweite des DOM, aber auch von lokalen Gegebenheiten wie großen Höhenunterschieden im Aufnahmegebiet. Insbesondere eine höhere Auflösung der Datenprodukte (speziell des DOM) geht nahezu quadratisch in die Prozessierungszeit ein.

Tab. 6: Grobe Schätzung des Zeitbedarfs der verschiedenen Prozessierungsschritte der Orthobilder bei der derzeitigen Rechnerkonfiguration

	Allgemein	Einheit von 10 km ²	Einheit von 100 km ²
Befliegung	200 km ² /Tag		
Systematische Prozessierung		3 Stunden	30 Stunden
Navigationsdaten 1. Vermessungsämter (GPS-Referenz) 2. APPLANIX	1 Tag – 2 Wochen 1-2 Tage		
Fluglagekorrektur		2 Stunden	20 Stunden
DOM-Erstellung Kachelauflösung 50 cm Kachelauflösung 100 cm		3 Tage 1 Tag	30 Tage 10 Tage
Orthobilderstellung, Auflösung 25 cm, je Farbkanal		3 Stunden	30 Stunden
Abschließende Arbeiten, Schreiben auf Speichermedium		ca. 1 Tag	ca. 3 Tage

4.5 Genauigkeiten der Daten

Die Genauigkeit der Daten des digitalen Kamerasystems HRSC-A wurde im Rahmen von Testflügen wiederholt validiert. Im Januar/Februar 1998 wurden zwei Testfelder befliegen, in denen jeweils mehr als 100 signalisierte Punkte ausgelegt waren. Die Testfelder wurden mit Aufnahmehöhen von 3000 m und Fluggeschwindigkeiten von 250 bis 270 km/h befliegen, die Bodenpixelauflösung beträgt bei dieser Konstellation rund 12 cm. Die Testfelder wurden mit einer 50 %igen Überdeckung geflogen.

Für die Punktbestimmung an 120 Kontrollpunkten ergab sich ein mittlerer Lagefehler von +/- 12 cm und ein mittlerer Höhenfehler von +/- 20 cm (Wewel & Brand 1999). Eine weitere Validierung (Testfeld Vaihingen) ergab einen mittleren Lagefehler von +/- 11 cm und einen mittleren Höhenfehler von +/- 17 cm.

Anhand von unabhängigen Kontrollpunkten wurden bei verschiedenen Befliegungen bei Flughöhen von 3000 m folgende Genauigkeiten erzielt:

- relativ: Punktgenauigkeit: ± 20 cm
- absolut: Punktgenauigkeit: ± 25 cm
- Lagegenauigkeit: ± 15 cm
- Höhengenaugigkeit: ± 20 cm

Diese Genauigkeiten bestätigten sich für eine Projektbefliegung in Berlin vom Mai 1998: Die mittlere absolute Lage-Genauigkeit der Bilddaten beträgt hier +/- 10-15 cm. Paßpunkt-Kontrollmessungen in den Bilddaten zeigten maximale Abweichungen von der Soll-Lage von +/- 1 Pixel (1 Pixel = 15 cm). Die mittlere absolute Höhengenaugigkeit beträgt +/- 20-30 cm.

Die Genauigkeit von Datenprodukten flugzeuggetragener Scanner ist entscheidend abhängig von der Qualität des verwendeten Navigationssystems. Das eingesetzte Applanix System liefert die notwendigen Positions- und Lagedaten mit einer großen Genauigkeit. Somit können aus den HRSC-Stereodaten Objektpunkte mit einer Lagegenauigkeit von ± 15 cm und einer Höhengenaugigkeit von ± 20 cm georeferenziert werden. Die daraus abgeleiteten Genauigkeiten für die HRSC-Datenprodukte (Orthobild und DOM) hängen besonders von der Topographie des aufgenommenen Geländes ab. Die genannten Genauigkeiten für das DOM von ± 20 cm können in Bereichen mit stetigen geschlossenen Geländeoberflächen mit genügend ausgeprägter Textur erreicht werden. An Bruchkanten (Gebäudekanten o.ä.) ist mit Interpolationsfehlern zu rechnen. Sichtschatten und nicht geschlossene Flächen wie beispielsweise unbelaubte Bäume führen zu fehlerhaften Bildzuordnungen und somit zu Interpolationsfehlern im DOM.

Neben der Güte der Bahn- und Lagedaten und der Qualität des DOM ist die Qualität und Genauigkeit der prozessierten Orthobilder auch vom Beobachtungswinkel abhängig. Während die Daten des Nadirkanals nahezu invariant gegenüber Fehlern im DOM sind, gilt für die beiden in der Bildebene der HRSC außen liegenden Farbsensoren (Rot und Infrarot) daß ein Fehler von einem Meter im DOM einen Versatz von $\pm 0,3$ m in Flugrichtung bewirkt. Der maximale Lagefehler senkrecht zur Scanrichtung beträgt aufgrund des kleinen Öffnungswinkels der HRSC von $11,8^\circ$ für die äußeren Punkte der Sensoren $0,1$ m pro Meter Höhenfehler. Mit diesen Genauigkeiten ist die Qualität von HRSC-Orthobildaten gegenüber konventionellen Kameras mit großen Öffnungswinkeln deutlich besser (Dornier 1999).

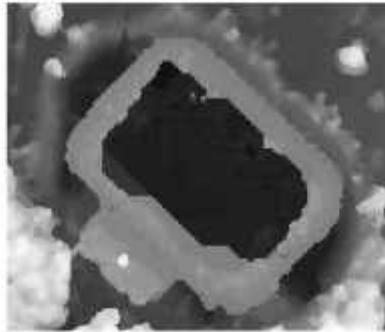
Verschiedene Produkte aus einer Befliegung



Hochauflösender Nadir
(panchromatisch)



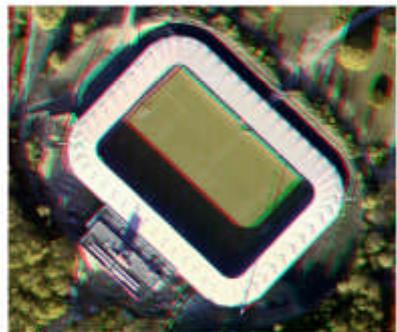
Echtfarbenbild



Digitales Oberflächenmodell



Infrarotbild



Anaglyphenbild

Abb. 9: Die verschiedenen Datenprodukte aus einer Befliegung: hochauflösendes panchromatisches Bild, Echtfarbenbild, Color-Infrarot, Oberflächenmodell und Anaglyphe

Vergleich unterschiedlicher Prozessierungslevel Berlin - Unter den Linden



Rohdaten



Geometrisch korrigierte Daten



Digitales Oberflächenmodell



Orthoimage

Abb. 10: Die verschiedenen Prozessierungsstadien: Rohdaten, geometrisch korrigierte Daten, Digitales Oberflächenmodell als Grundlage für die Generierung von Orthobildern, multispektrales Orthobild.

4.6 Die Problematik der Blickwinkelunterschiede

Die neun CCD-Zeilen der Kamera sind in drei identischen Modulen parallel nebeneinander in der Fokalebene hinter einer Optik angeordnet. Durch diese Bauart eines Mehrzeilenscanners mit einer einzigen Optik ergeben sich verschiedene Blickwinkel für die einzelnen Sensoren. Gleiche Objekte auf der Erdoberfläche werden zu unterschiedlichen Zeiten und von unterschiedlichen Standpunkten aufgenommen. Je nach Art der aufzunehmenden Objekte führen diese Blickwinkelunterschiede zu Problemen bei der Datenverarbeitung und –auswertung.

Die Blickwinkelunterschiede zwischen den Kanälen sind erheblich, der maximale Unterschied beträgt 32° (zwischen Rot und Infrarot). Dieser Versatz erzeugt Versätze zwischen den Kanälen, es werden unterschiedliche Ansichten desselben Objektes abgebildet. Dies führt dazu, daß Pixel, die zu demselben Objekt gehören, nicht aufeinander abgebildet werden, beim Übereinanderlagern der kartenprojizierten Farbkanäle entstehen Farbsäume. Besonders bei hohen Gebäuden kommt es zu Problemen, da jeder Kanal eine unterschiedliche Ansicht desselben Objektes liefert. Abbildung 11 zeigt dies beispielhaft an zwei verschiedenen Gebäuden, deutlich wird hier auch das Problem bei Bäumen: Die Krone wird insbesondere bei Laubbäumen in allen Kanälen unterschiedlich abgebildet.

Die spätere Orthobildprozessierung der Daten kann dieses Problem nur teilweise lösen: in Gebieten, für die in dem jeweiligen Kanal keine Information vorliegt, muß interpoliert werden. Die verschiedenen Aufsichten können bei der späteren Verarbeitung nur bedingt vereinheitlicht werden.

4.6.1 Faktor Zeit als Auswirkung der Blickwinkelunterschiede

Die Datenaufnahme basiert auf neun CCD-Zeilen, die parallel auf einer Fokalebene hinter einer einzigen Optik montiert sind, durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs werden neun sich überlagernde Bildstreifen gewonnen. Je nach Flughöhe und Fluggeschwindigkeit entsteht ein Zeitverzug zwischen der Aufnahme der verschiedenen Kanäle. Bei den Standardbedingungen (Flughöhe von 3000 m, Fluggeschwindigkeit 250 km/h) entsteht ein Zeitversatz von rund 25 Sekunden zwischen der Aufnahme der beiden am weitesten auseinanderliegenden Farbkanäle (rot und infrarot), zwischen den beiden Stereokanälen sind es rund 30 Sekunden. Dies macht sich besonders bemerkbar bei beweglichen Objekten (siehe Abbildung 12) und bei windigen Aufnahmebedingungen. Tabelle 8 zeigt die Zeitversätze in den verschiedenen Kanälen. Dieser Zeitversatz hat insbesondere bei windigen Flugbedingungen Auswirkungen auf die Kombination der einzelnen Spektralkanäle und bereitet Probleme bei der Bildkorrelation zwischen den verschiedenen Sensoren für die DOM-Berechnung.

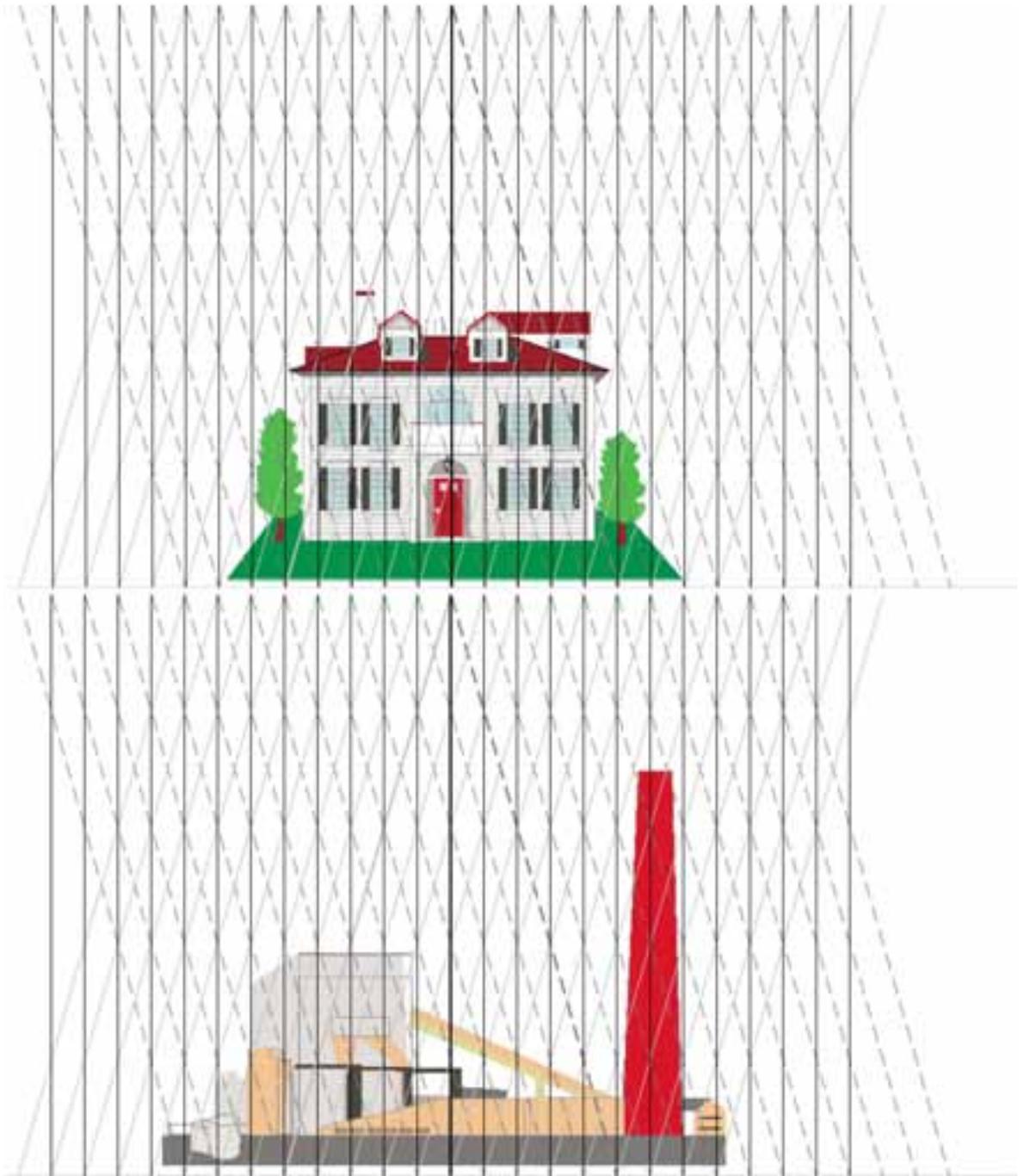
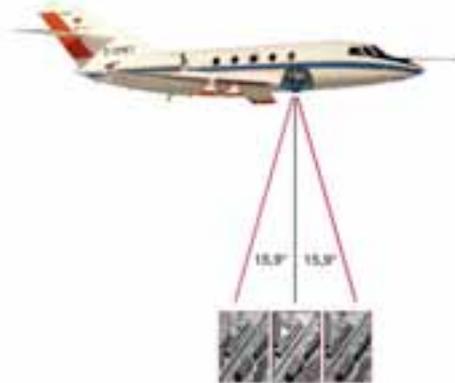


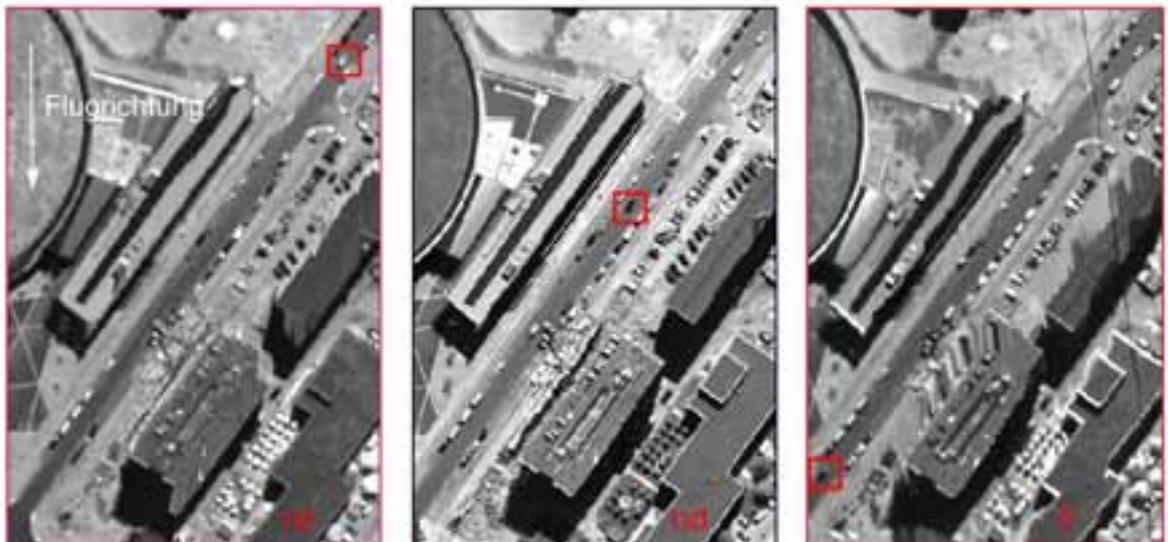
Abb. 11: Auswirkungen der Blickwinkelunterschiede am Beispiel von zwei Gebäuden. Die Abbildung zeigt die Abbildungsstrahlen der beiden äußeren Kanäle rot und infrarot(Blickwinkel +/- 15,9°). Deutlich wird das Problem insbesondere bei hohen Häusern, jeder Kanal liefert eine unterschiedliche Ansicht desselben Objektes.

Faktor Zeit bei der Datenaufnahme der HRSC-A

Bewegliche Objekte: Beispiel fahrendes Auto



Scanzzeitverzug zwischen Infrarot- und Nadirkanal: 12,5 s
 Gesamtscanzeit Farbkanäle: 25 s, Stereokanäle: 30 s



Flughöhe: 3000 m, Fluggeschwindigkeit: 250 km/h (70 m/s)
 Aufnahmedatum: 14. Mai 1998, Berlin-Adlershof



Abb. 12: Der Zeitfaktor bei der Datenaufnahme: Es vergehen 25 Sekunden, bis Infrarot- und Rotkanal desselben Ausschnittes gescannt sind. Das Beispiel zeigt die Bewegung eines Fahrzeuges in dieser Zeitspanne (rotes Viereck) in den Kanälen Rot, Nadir und Infrarot. Probleme bereitet dieser Zeitverzug bei windigen Aufnahmebedingungen (insbesondere bei beweglichen Objekten wie im Forstbereich). Das untere Bild zeigt die Bewegung eines Motorbootes, eingefangen in den Kanälen Stereo, Nadir, Grün.

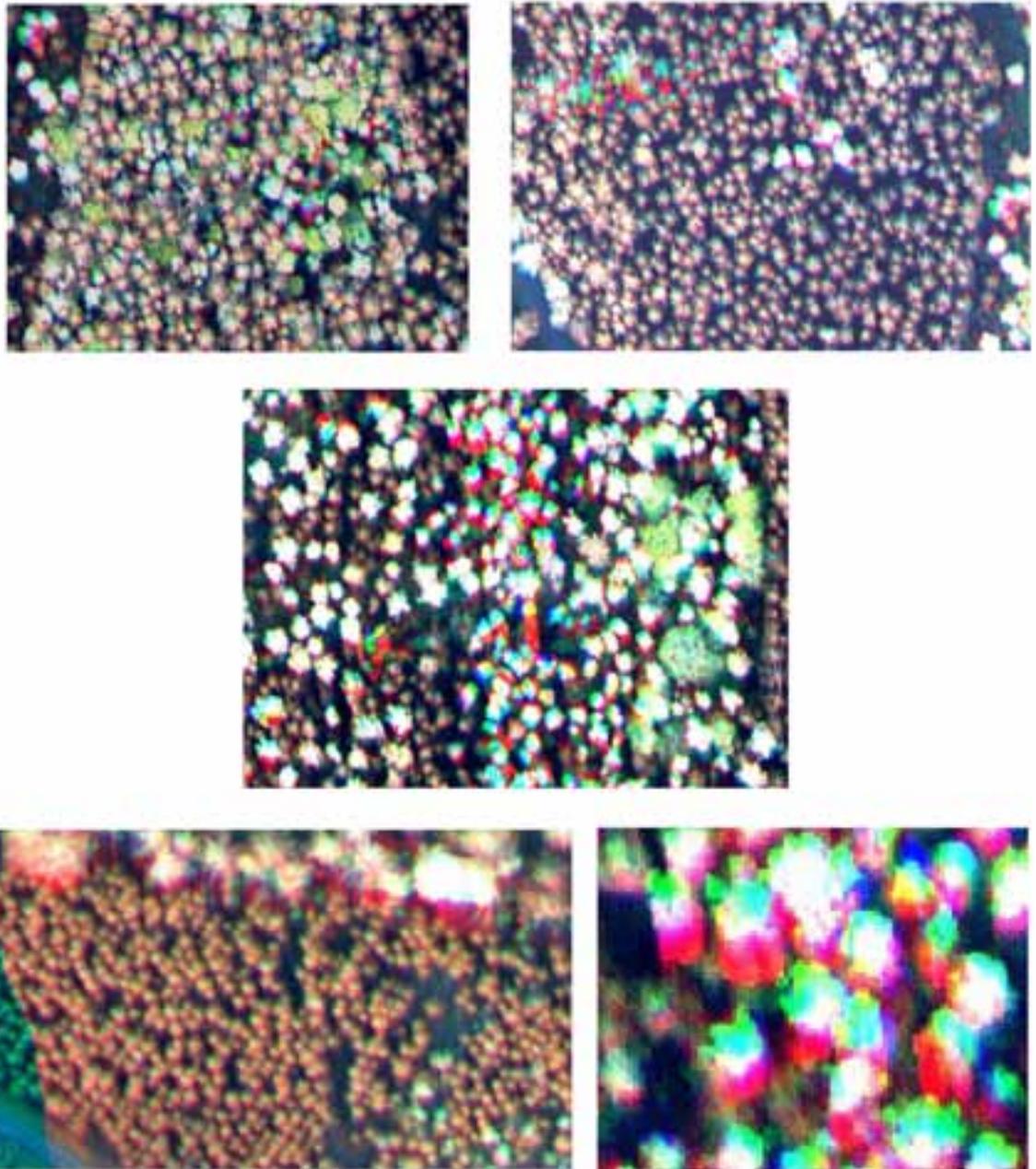


Abb. 13: Befliegung eines Waldgebietes bei windigen Bedingungen, Farbsäume und Unschärfe bei der Kombination der Kanäle durch Bewegung der Bäume in den verschiedenen Kanälen und die Blickwinkelunterschiede der Farbkanäle. Die Unschärfe in den Bildern der einzelnen Sensoren ist abhängig von der Scanrate.

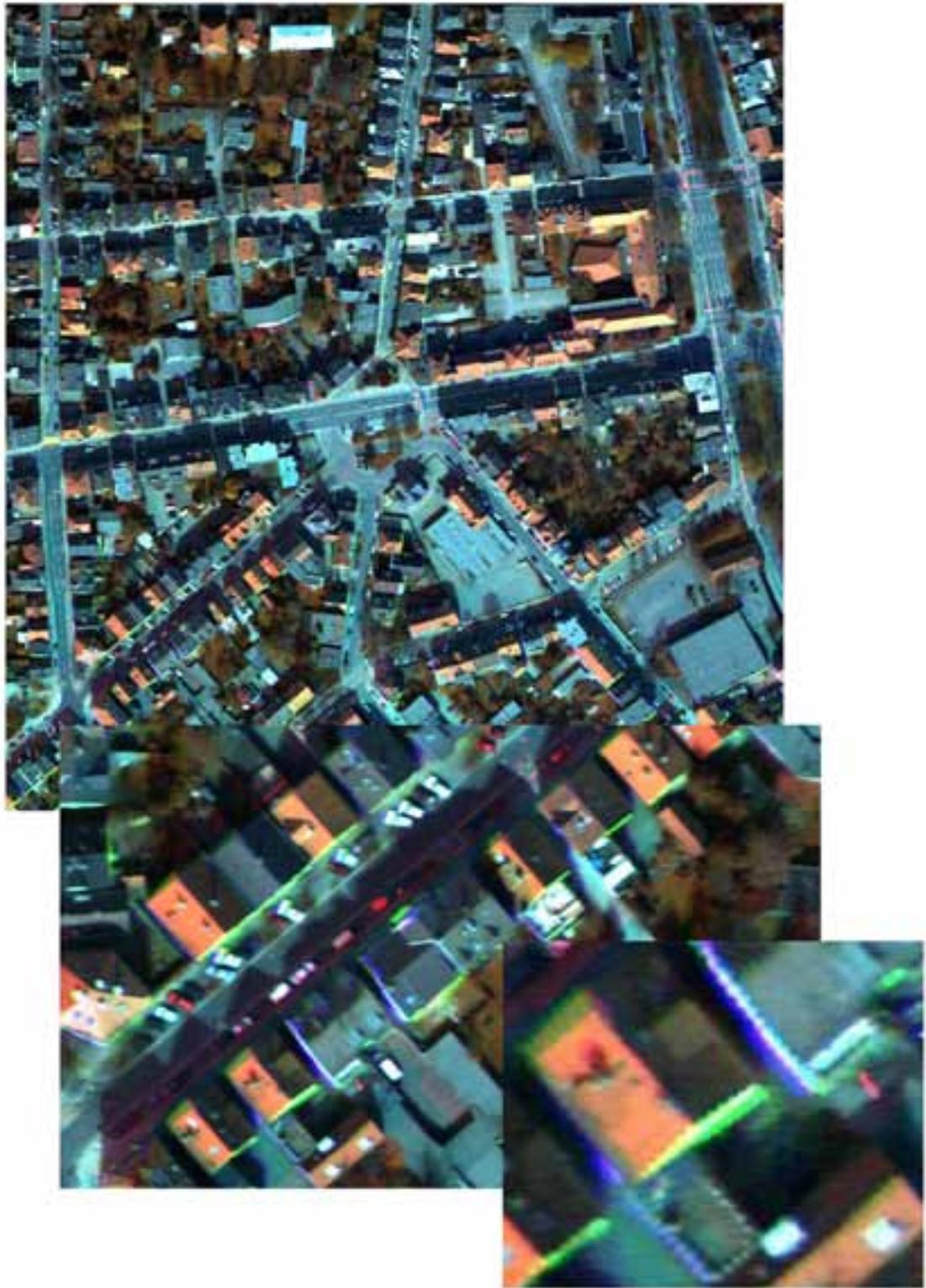
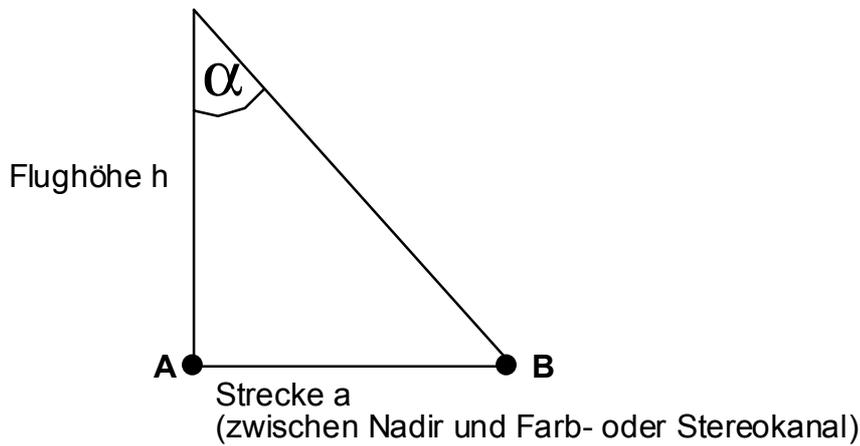


Abb. 14: Farbsäume an Hausrändern durch Blickwinkelunterschiede der Farbkanäle, Kanäle Nadir, Grün, Blau.



α = Blickwinkelunterschied zwischen Nadir und Farb- oder Stereokanal

$\tan \alpha$ = Gegenkathete/Ankathete (Basis/Höhenverhältnis)

$\tan \alpha$ = Strecke a/Flughöhe h

Strecke a = $\tan \alpha$ x Flughöhe h

Zeitverzug t zwischen A und B

mittlere Fluggeschwindigkeit g = 250 km/h, entspricht 70 m/s

Tab. 7: Zeitverzug zwischen der Aufnahme der verschiedenen Kanäle je nach Flughöhe, Meter/Sekundenangaben gelten jeweils für die Differenz zwischen Nadir und Kanal, zur Feststellung des gesamten Zeitversatzes sind die Zahlen jeweils zu verdoppeln

Zeitverzug t= Strecke a/g	$\tan \alpha$	1500 m	2000 m	2500 m	3000 m	10000 m
$\alpha = \pm 3,3^\circ$ (blau, grün)	0,0577	86,49 m	115,32 m	144,15 m	172,98 m	576,60 m
		1,24 s	1,65 s	2,06 s	2,47 s	8,24 s
$\alpha = \pm 12,8^\circ$ (Photometrie 1,2)	0,2272	340,79 m	454,39 m	567,99 m	681,58 m	2271,94 m
		4,87 s	6,49 s	8,11 s	9,74 s	32,46 s
$\alpha = \pm 15,9^\circ$ (Rot und Infrarot)	0,2849	427,29 m	569,71 m	712,14 m	854,57 m	2848 m
		6,10 s	8,14 s	10,17 s	12,21 s	40,69 s
$\alpha = \pm 18,9^\circ$ (Stereo 1 und 2)	0,342	513,56 m	684,75 m	855,94 m	1027,13 m	3423,77 m
		7,34 s	9,78 s	12,22 s	14,67 s	48,91 s

Durch die Zeitparallaxe können bewegte Objekte wie z.B. fahrende Autos, Schiffe oder sich im Wind bewegende Baumgipfel nicht aufeinander registriert werden. Doch auch unbewegte Objekte lassen sich nur unter bestimmten Bedingungen völlig ohne Farbsäume aufeinander registrieren. Die Bedingungen hierfür sind:

- Die aufgenommenen Flächen müssen stetig, geschlossen und ohne Sichtschatten sein. Diese Voraussetzung trifft nur für wenige Flächen zu
- Die Position und Lage der Kamera muß fehlerfrei bekannt sein. Für die Bestimmung der Position und Lage der HRSC wird ein hochqualitatives inertiales Meßsystem verwendet. Eine weitere Steigerung der bisher erreichten Genauigkeiten ist für derartige Systeme in naher Zukunft nicht zu erwarten.
- Für die Orthoprojektion muß ein fehlerfreies hochaufgelöstes DOM zur Verfügung stehen. (Dornier 1999)

Das Problem der Blickwinkelunterschiede hat zwei unterschiedliche Aspekte: Zum einen offenbart sich hier ein generelles Problem der Orthobildgenerierung, zum anderen ist der Blick der Sensoren auf unterschiedliche Teile gleicher Objekte schwer anzugleichen.

Eine perfekte Orthobildgenerierung ist nicht möglich. Voraussetzung hierfür wäre eine fehlerfreie innere und äußere Orientierung des Aufnahmesensors sowie ein lückenloses und fehlerfreies Oberflächenmodell. Das Problem der Blickwinkelunterschiede besteht darin, daß je größer der Abstand eines Bildpunktes vom Nadirpunkt ist, desto größer ist der Einfluß eines Fehlers im Oberflächenmodell auf die Lagegenauigkeit. Dies gilt unabhängig von Sensortyp und Betrachtungsrichtung. Der Nadirpunkt ist invariant gegenüber einer falschen DOM-Höhe. Alle anderen Punkte haben einen Koordinatenfehler m_x und m_y in Abhängigkeit des Aufnahmewinkels ($\tan(\alpha)$) und des Höhenfehlers. Zeilensensoren schneiden hier also im Vergleich zu anderen Systemen sehr gut ab. In Flugrichtung treten für den Nadirsensor kaum fehlerhafte Versätze aufgrund von Höhenfehlern auf. Die auftretenden Lagefehler in den außenliegenden Farbsensoren sind immer noch erheblich kleiner als bei den Daten, die von einer konventionellen zentralperspektivischen Reihenmeßkammer mit großem Öffnungswinkel aufgenommen wurden. Der Lagefehler bei Luftbildern könnte dadurch minimiert werden, indem mit sehr großen Überlappungen geflogen wird und nur die jeweils nadirnahen Bereiche zur Auswertung herangezogen werden. In Richtung der CCD-Zeilen ist der Fehler bei digitalen Kameras aufgrund der ebenfalls zentralperspektivischen Aufnahme wie bei Luftbildaufnahmen.

Die Abweichung des Blickwinkels von der Nadirsicht und Fehler im Oberflächenmodell führen bei der Orthobildgenerierung dazu, daß bei den Farbzeilen, die jeweils der Nadirzeile gegenüberliegen, fehlerhafte Versätze im Orthobild in die jeweils entgegengesetzte Richtung weisen. Dies führt zu deutlich sichtbaren Farbsäumen. Bei Aufnahmen von Kameras, bei denen die Farbsensoren die gleiche Blickrichtung haben, ist somit der Lagefehler für die einzelnen Farbsensoren gleich und nicht augenfällig.

Eine verbesserte Koregistrierung der Kanäle ist bei der bestehenden Kamerakonfiguration durch die Verbesserung des Oberflächenmodells zu erreichen. Denkbar ist eine Qualitätssteigerung durch eine interaktive Nachbesserung der aus den HRSC-A-Stereobildern vollautomatisch abgeleiteten Oberflächenmodellen an einer Stereoauswertestation. Bei dieser Nachbearbeitung wären insbesondere Bruchkanten, also z.B. Gebäudekanten, festzulegen. Stereoauswertestationen, die den speziellen geometrischen Anforderungen der Stereoscannerdaten genügen, sind jedoch z.Zt. noch nicht verfügbar.

Die Koregistrierung kann ferner durch eine pixelweise Zuordnung der Farbkanäle zum Nadirkanal durch eine spezielle Bildkorrelation für multispektrale Bilddaten verbessert werden. Konventionelle Verfahren wie das Least Squares-Matching zeigen sich wegen der großen spektralen Unterschiede zwischen den einzelnen Kanälen als nicht geeignet (Dornier 1999).

Gemindert werden können die durch fehlerhafte Koregistrierung verursachten Effekte durch eine IHS-Transformation (Intensity, Hue, Saturation). Durch das Überführen von RGB-Bildern in den IHS-Farbraum werden die hochfrequenten Intensitätsdaten vom Farbton und von der Farbsättigung getrennt. Ersetzt man den Intensitätskanal anschließend durch den Nadirkanal und transformiert die Daten wieder in den RGB-Farbraum, führt dies zu einer Reduzierung der Farbsäume.

Ein Teil der Probleme, die durch die Zeitparallaxe entstehen, kann im Vorfeld durch die strenge Definition von Anforderungen an die Flugbedingungen verhindert werden. So sollte die Datenaufnahme von Waldgebieten nur bei weitestgehend windstillen Bedingungen erfolgen. Andernfalls bereitet die Orthobildgenerierung der Daten Probleme, da in den verschiedenen Stereokanälen unterschiedliche Ansichten der Objekte abgebildet sind und der Zuordnungsprozess nicht funktioniert (das Auffinden von homologen Punkten in den verschiedenen Kanälen).

Die Verringerung der Blickwinkelunterschiede, also kleinere Winkel der Farbkanäle und somit auch ein kürzeres Zeitintervall zwischen den Aufnahmen in den Kanälen, wäre schließlich eine weitere Möglichkeit, die Effekte der fehlerhaften Koregistrierung zu minimieren bzw. zu vermeiden. Das Problem der Blickwinkelunterschiede ist mit der Weiterentwicklung der Kamera entschärft worden: Die HRSC-AX, das Nachfolgemodell der jetzigen Kamera, hat zwar auch Blickwinkelunterschiede zwischen den verschiedenen Kanälen, diese wurden jedoch erheblich minimiert. So liegen die Multispektralkanäle nur noch $\pm 4,6^\circ$ auseinander statt wie jetzt $\pm 15,9^\circ$. Tabelle 8 zeigt die Veränderungen des neuen Systems im Überblick.

Andere digitale Kamerasysteme haben andere Designs und umgehen so das Problem der Blickwinkelunterschiede, z.B. durch den Einsatz mehrerer Optiken oder von Strahlteilern. Nachteil dieser technischen Lösungen sind die hohen Kosten und das hohe Gewicht der Kameras, was den operationellen Betrieb erschwert.

Tab. 8: Die Blickwinkelunterschiede des alten und des neuen Systems im Überblick.

	HRSC-A	HRSC-AX
Stereo 1, 2	± 18,9°	± 20,5°
Photometrie 1, 2	± 12,8°	± 12°
Rot	15,9°	2,3°
Blau	3,3°	-4,6°
Nadir	0°	0°
Grün	- 3,3°	- 2,3°
Infrarot	- 15,9°	4,6°

Für die weitere Auswertung der Daten ist ferner die Generierung von geraden Linien im Orthobild bedeutend. Dies spielt besonders bei Anwendungen wie Objekterkennung eine Rolle (z.B. Häuserkennung). Wie zuvor ausgeführt, kommt es - abhängig vom Aufnahmewinkel, den Fehlern der Orientierung und den Fehlern im Oberflächenmodell - zu Versätzen in den Bildern. Diese Versätze bewirken, daß gerade Linien des Objektraumes nicht gradlinig im Orthobild abgebildet werden. Diese Ungradlinigkeit ist insbesondere abhängig von der Auflösung des Oberflächenmodelles. Bei einem gegenüber dem zu berechnenden Orthobild grob aufgelösten DOM werden benachbarte Bildpunkte relativ zueinander kaum verschoben, d.h. gerade Objektlinien bleiben auch im Orthobild gradlinig. Bei einem hochaufgelösten DOM kann es dagegen auch zu größeren Verschiebungen benachbarter Bildpunkte kommen, die dazu führen das die Objektlinien ungerade im Orthobild dargestellt werden. Dies tritt bei Höhengsprüngen wie z.B. an Häuserkanten auf.

Damit kommt es bei der Generierung des Orthobildes zu dem Zielkonflikt: Einerseits ein möglichst detailreiches DOM zu verwenden, um die Bildparallaxen vollständig herauszurechnen und andererseits möglichst gerade Linien zu erhalten. In der photogrammetrischen Praxis wird dies dadurch gelöst, daß für die Orthobildgenerierung spezielle Oberflächenmodelle mit einer Auflösung von 1 bis 1,5 m verwendet werden, die mittels eines Medianfilters Tiefpass gefiltert wurden. Orthobilder von Luftbildern werden demgegenüber mit Höhenmodellen (bzw. DOM) von 5, 10, 30 oder 50 m generiert. Dies führt zu einer geringeren Lagegenauigkeit, aber die Linien werden gerade abgebildet.

Die Folgen der Blickwinkelunterschiede, also der fehlerhaften Koregistrierung der Farbkanäle, haben erhebliche Auswirkungen auf die Auswertung der multispektralen Daten der HRSC-A. Besonders an den Rändern von Objekten entstehen Farbsäume, die aus den unterschiedlichen Informationen der Farbkanäle gebildet werden. Dies erschwert eine automatisierte Auswertung: Es entstehen Farbsaum-Artefakte, die keiner Klasse zugehören und zahlreiche eigene Klassen bilden. Diese Auswirkungen werden in den folgenden Kapiteln wiederholt Thema sein.

5 Die HRSC-A als Nachfolgesystem der Luftbildkamera: Ein Vergleich

5.1 Einleitung

Digitale Daten ersetzen in zahlreichen Bereichen bereits jetzt die bisher standardmäßig eingesetzten Luftbilder. Die analogen Luftbildkameras und die vollständig digitalen Zeilenkameras beruhen auf grundsätzlich unterschiedlichen Prinzipien der Aufnahme und Prozessierung. Die Kenntnis dieser Unterschiede und der daraus resultierenden Eigenschaften der Daten dieser Systeme ist wichtig für die weitere Verarbeitung und Auswertung. Dieser Gedanke gab die Motivation zu dem nachfolgenden Vergleich.

Es soll beispielhaft auf das digitale Aufnahmesystem HRSC-A eingegangen werden. Als Grundlage des Vergleichs dienen ein Orthobildmosaik und Digitaldaten des Testgebietes Tharandter Wald, die zum nahezu gleichen Zeitpunkt aufgenommen wurden (21. und 23. Oktober 1998). Manche Parameter der beiden Aufnahmesysteme sind nicht direkt vergleichbar (beispielsweise das jeweilige Auflösungsvermögen). Hier wurde versucht, Annäherungen zu finden. Die Datensätze werden in Tabelle 9 spezifiziert. Neue digitale Kamerasysteme werden im Detail von der zum Vergleich herangezogenen HRSC-A abweichen, die grundsätzlichen Unterschiede zwischen digitalem und analogem Prinzip jedoch bleiben erhalten und machen einen Vergleich sinnvoll. Andere Fernerkundungssysteme werden im folgenden nicht berücksichtigt, an verschiedenen Stellen wird lediglich verwiesen auf weitere Aufnahmeverfahren.

Tab. 9: Eigenschaften der Datensätze, die zum Vergleich dienen

	HRSC	Luftbildkarte
	multispektral	s/w
Aufnahmedatum	21. Oktober 1998	23. Oktober 1998
Flughöhe	3000 m	2500 m
geom. Auflösung	25 cm	40 cm (gescannt)
	Mosaik aus 2 Bildstreifen	Mosaik aus 4 (2) Luftbildern
Projektion	Gauss-Krüger	Gauss-Krüger
Bezugsellipsoid	Bessel	Bessel
Höhenbezug	NN	HN
Geländemodell	DOM	DGM
Genauigkeit		
Höhe	15 - 20 cm	< 2m
Lage	15 - 20 cm	< 1m

5.2 Allgemeiner Vergleich der Aufnahmeprinzipien

Die fotografische Aufnahme von Luft- und Satellitenbildern beruht auf dem Prinzip der Fotografie: Durch ein Objektiv wird das aufzunehmende Objekt für meist nur kurze Zeit auf eine lichtempfindliche fotografische Schicht projiziert, die dadurch so verändert wird, daß durch den fotografischen Prozeß ein dauerhaftes Bild entsteht (siehe z.B. Solf 1986).

Die Fotografie ist ein passives Verfahren, das die Strahlung im sichtbaren Licht und im nahen Infrarot (von etwa 0,4 bis 1,0 μm) aufnimmt. Unter den Aufnahmeverfahren der Fernerkundung nimmt sie eine Sonderstellung ein, da das strahlungsempfindliche Material - die fotografische Schicht - zugleich als Speichermedium dient und somit die gleichzeitige flächenhafte Aufnahme sowie die Speicherung riesiger Datenmengen auf kleinem Raum bei geringen Kosten erlaubt. Nachteilig ist die schwierige und unsichere radiometrische Kalibrierung fotografischer Systeme, der fotografisch erfaßbare Spektralbereich ist eng und der fotografische Prozeß stellt einen

unzweckmäßigen Zwischenschritt dar, wenn die aufgenommenen Daten rechnerisch verarbeitet werden sollen.

Opto-elektronische Zeilenabtaster wie die HRSC-A nehmen das überflogene Gelände streifenweise auf. Die Aufnahmen können von Flugzeugen oder Weltraumflugkörpern aus mono- und/oder multispektral erfolgen. Im Gegensatz zu opto-mechanischen Scannern (DAIS, Hymap, etc., die mit rotierenden Spiegeln arbeiten) werden die Bildelemente im Bildstreifen nicht nacheinander, sondern zeitgleich aufgenommen. Hierfür sorgen Zeilensensoren (linear detector arrays), die aus einer Vielzahl kleinster Photoelemente bestehen und nach dem CCD-Prinzip (CCD = charge coupled device) funktionieren (zur Funktionsweise siehe auch Kap. 4.3.1.). Für jeden Spektralkanal eines multispektralen Pushbroom-Scanners wird ein solcher Zeilensensor eingesetzt.

5.3 Technische Parameter

5.3.1 Luftbildkammer und digitale Kamera

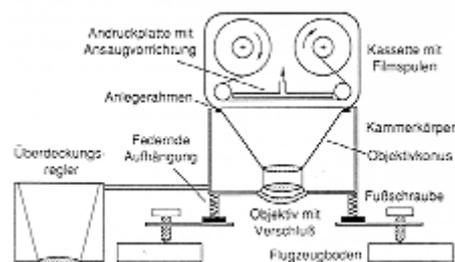


Abb. 15: Schematischer Querschnitt durch eine Reihenmeßkammer (RMK) (aus Albertz 1991)

Zum Fotografieren vom Flugzeug aus eignet sich im Prinzip jede gewöhnliche Kamera. Luftbilder werden im allgemeinen mit speziell zu diesem Zweck gebauten sogenannten Kammern aufgenommen. Zur Aufnahme von Senkrechtbildern aus Flugzeugen werden Reihenmeßkammern eingesetzt, die sich aus dem eigentlichen Kammerkörper, der Filmkassette, der Kammeraufhängung und Zusatzgeräten zusammensetzen.

Ein Objektiv mit Verschluss, Objektivkonus, Anlegerahmen sowie Bauteile, die den Funktionsablauf der Kammer bewirken, bilden den Kammerkörper. Der Objektivkonus verbindet das Objektiv starr mit dem Anlegerahmen, der die Ebene der fotografischen Schicht im Augenblick der Belichtung definiert. Eine Fokussierung ist nicht vorgesehen und für photogrammetrische Zwecke auch nicht erwünscht. Über den Kammerkörper ist das Objektiv fest mit dem Anlegerahmen verbunden. Dies gewährleistet eine feste innere Orientierung (räumliche Lage des Projektionszentrums relativ zur Bildebene). Über dem Anlegerahmen wird auf den Kammerkörper die auswechselbare Filmkassette aufgesetzt, die Filme von mindestens 120 m aufnimmt. Zusatzgeräte überwachen die Längsüberdeckung der Bilder und die Einhaltung einer gewählten Flugtrasse bzw. die geforderte Querüberdeckung.

An das Objektiv werden bei der Luftbildaufnahme hohe Anforderungen bezüglich der Bildqualität, der Lichtstärke und der Verzeichnung gestellt. Die Bildqualität des Objektivs bestimmt zusammen mit dem Film das Auflösungsvermögen des ganzen Systems und damit die Möglichkeit zur Wiedergabe kleiner Details. Die Luftbildaufnahme verlangt sehr kurze Belichtungszeiten, da sonst die während des Belichtens auftretenden Bewegungen (Bildwanderung) zu Unschärfen führen würden. Dies setzt eine hohe Lichtstärke und damit ein großes Öffnungsverhältnis des Objektivs voraus.

Die Reihenmeßkammern weisen heute überwiegend das einheitliche Bildformat 23 x 23 cm² auf. Sie werden mit verschiedenen Objektiven ausgestattet, um unterschiedlichen Aufnahmeanforderungen gerecht werden zu können (Albertz 1991).

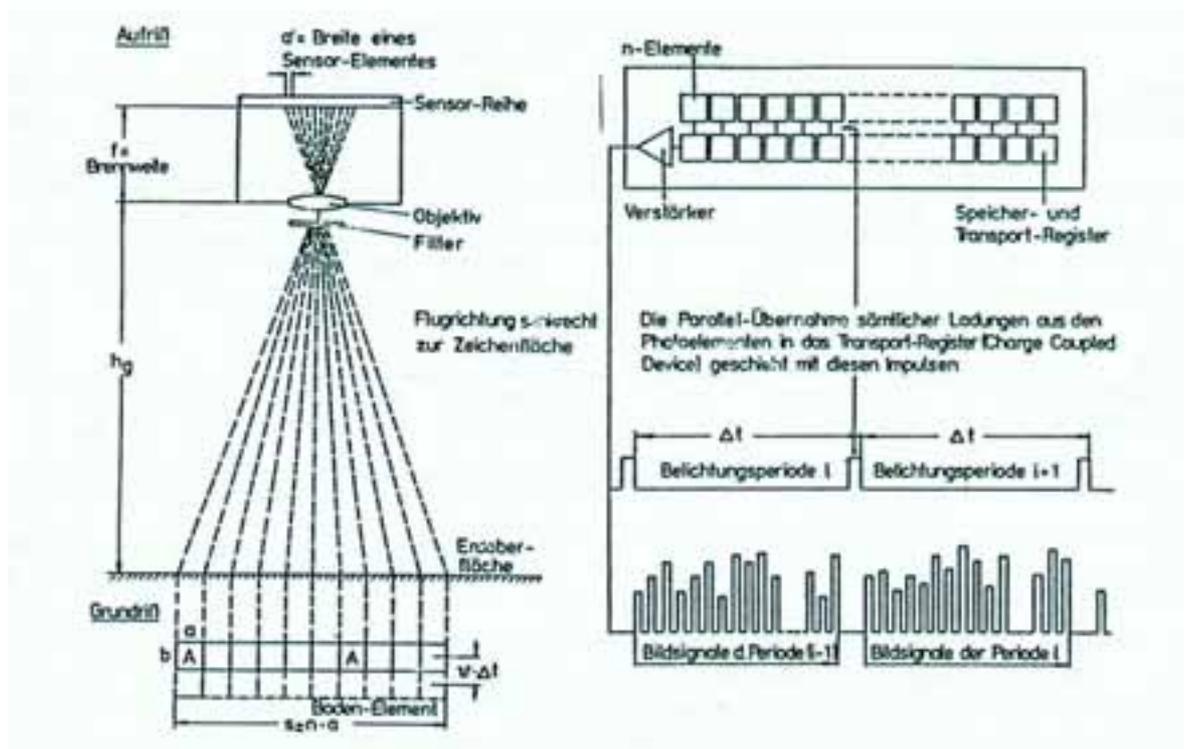


Abb. 16: Aufbau und Funktionsweise eines opto-elektronischen Zeilenabtasters (nach Hofmann 1976, aus: Hildebrandt 1996)

Die digitale Kamera HRSC-A nimmt mittels CCD-Zeilen auf, die in der Bildebene eines Objektivs angeordnet sind. Die vom Gelände reflektierte Strahlung wird über ein Objektiv aufgenommen und zu den Detektoren des Zeilen-scanners bzw. des Detektorfeldes geleitet. Die spektrale Zerlegung erfolgt durch vor dem Sensor befindliche Filter. Durch die in elektronisch gesteuerten zeitlichen Abständen Δt erfolgenden Belichtungen bauen sich in kleinsten Sekundenbruchteilen in den Photoelementen proportional zur eintreffenden Strahlungsenergie elektrische Spannungen auf. In gleichen Zeitintervallen Δt werden sämtliche Ladungen mit einem einzigen Impuls auf parallel zu den Photoelementen angeordnete Speicherelemente übertragen, von dort abgelesen und über einen Verstärker in Form elektrischer Signale ausgegeben (siehe auch Kap. 4.1.1.).

Als Detektoren fungieren dabei Photoelemente bzw. Halbleiter oder Halbleiterschichten. Die von diesen empfangene Energie wird proportional zu den in einer gegebenen Integrationszeit eingetroffenen Energiequanten in elektrische Signale gewandelt. Sie werden nach analog-digitaler Wandlung als ganze Zahlen (Grauwerte, digital numbers (DNs)) ausgegeben bzw. als binäre Zahlen digital weiter verarbeitet. Die Registrierung der Signale erfolgt in hochverdichteter Form auf einem Magnetband.

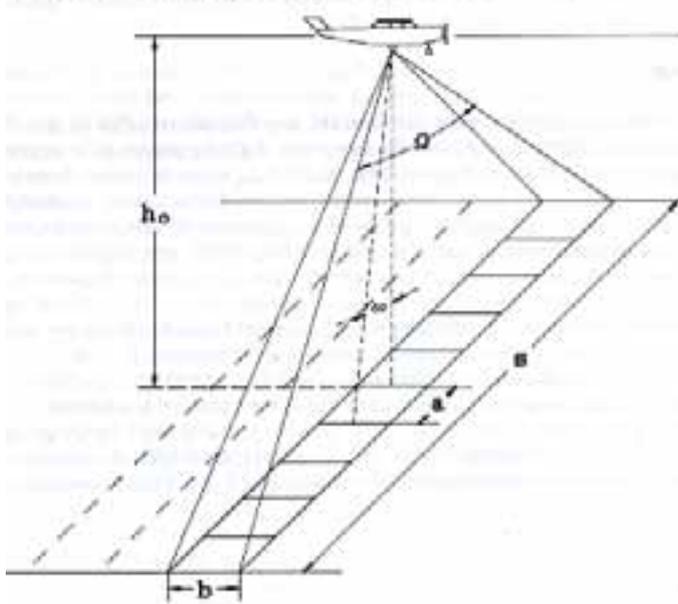


Abb. 17: Aufnahmemodus eines opto-elektronischen Zeilenabtasters. Die zeitliche Aufnahmezeit Δt für die Streifen wird vom Verhältnis der Fluggeschwindigkeit zur Flughöhe und dem Aufnahmewinkel für das einzelne Bildelement bestimmt. ω ist dabei vom Verhältnis der Seitenlänge der Detektorfläche zur Brennweite der Aufnahmeoptik abhängig (Hildebrandt 1996).

5.3.2 Film und digitaler Sensor

Das Luftbild ist sowohl Speichermedium als auch strahlungsempfindliches Material und somit Teil des Sensorsystems. Bei Luftbildaufnahmen wird die spektrale Bandbreite der Daten durch die Filmart bestimmt. An die Filme zur Aufnahme von Luftbildern werden sehr hohe Anforderungen gestellt. Sie müssen eine hohe Empfindlichkeit aufweisen, die Eigenbewegung des Flugzeugs läßt nur kurze Belichtungszeiten zu (in der Regel zwischen 1/100 und 1/1000 s). Um möglichst viele Details im Bild wiedergegeben zu können, ist andererseits ein hohes Auflösungsvermögen erforderlich. Da sich diese beiden Forderungen direkt widersprechen, muß bei der Filmherstellung ein Kompromiß eingegangen werden. Ferner ist eine steile Gradation erforderlich, um trotz der geringen Helligkeitskontraste des Geländes eine gute Bildwiedergabe zu erzielen. Die spektrale Empfindlichkeit der fotografischen Schicht soll bei der Luftbildaufnahme aus physikalischen Gründen vor allem im roten Bereich hoch sein, gegebenenfalls auch im Infrarot. Schließlich wird für die Photogrammetrie auch eine hohe Maßhaltigkeit der Schichtträger verlangt.

Für weitere automatisierte photogrammetrische Verarbeitungsschritte und digitale Auswertungen müssen die analog vorliegenden Daten gescannt werden. In großen Bereichen der photogrammetrischen Praxis wie für die Aerotriangulation (AT) und die DTM-Berechnung werden Luftbilder mit 25-30 μm gescannt. Sie haben somit bei gleicher Flughöhe eine drei- bis vierfach schlechtere Auflösung wie die HRSC-A (7 μm). Für interpretatorische Zwecke und zur Messung von diskreten Punkten werden die Filme im allgemeinen mit 10-15 μm gescannt. Um sowohl den vollen Informationsgehalt wie auch das volle Auflösungsvermögen von Luftbildern in digitaler Form zu erhalten (von 20-50 lp/mm), müßten die Bilder mit ca. 6-12 μm gescannt werden (Berücksichtigung des Kell-Faktors 2.8).

Beim Scannen ergibt sich zudem nicht nur ein Informations- sondern auch ein Genauigkeitsverlust, da Scanner nicht geometrisch beliebig genau arbeiten. Der Fehler beim Scannvorgang ist abhängig von der Qualität des Scanners und beträgt 2-5 μm in x und y-Richtung (Baltsavias 1999).

Die digitale Kamera HRSC-A nimmt parallel in neun Kanälen verschiedene spektrale Bereiche auf. Dies hat Vorteile für die weitere Nutzung der Daten: Im Gegensatz zu den Aufnahmen mit der Reihenmeßkammer, bei der sich der Nutzer vorher auf eine Filmart festlegen muß, liefert eine Befliegung mit dem digitalen Kamerasystem sowohl Farb-Colorinfrarot-Aufnahmen wie hochauflösende Nadir-Schwarzweiß-Aufnahmen und Echtfarbenbilder oder frei wählbare

Farbkomposite aus den vier Spektralkanälen und dem Nadirkanal, zudem Daten für die Berechnung hochauflösender Oberflächenmodelle. Die Daten liegen bereits in digitaler Form vor.

5.3.3 Speichermedium

Das Primärprodukt bei der Luftbildbefliegung ist die Fotografie/das Negativ, also ein analoges Produkt. Bei der digitalen Kamera handelt es sich um digitale Daten auf Band. Bei der Fotografie wird die aufgenommene Energie als latentes Bild auf einem unentwickelten Film gespeichert. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den digitalen Daten um eine zeilenweise Speicherung der aufgenommenen Energie als elektrischer Impuls. Die Bildaufnahme erfolgt mittels zeilenweise angeordneter Halbleiter-Bildsensoren. Dies sind hochintegrierte Schaltungen auf Silicium-Chips, die für jeden Bildpunkt (Pixel) einen Fotosensor enthalten. Die eingesetzten Charge Couple Devices (CCD) - bestehen aus Ketten von Kondensatoren und erzeugen durch Belichtung Ladung. Durch die Eigenbewegung des Flugzeugs wird bei entsprechender Aufnahmefrequenz ein Geländestreifen zeilenweise abgebildet („gefegt“, engl. Pushbroom).

In der Fotografie dient das strahlungsempfindliche Material - die fotografische Schicht - zugleich als Speichermedium. Zwar können große Datenmengen so erfaßt und archiviert werden, problematisch ist jedoch eine weitere digitale Auswertung, da die Bilder hierfür gescannt werden (s.o.). Die Daten der HRSC-A werden mittels eines Sony-Hochgeschwindigkeitsrecorders auf Magnetband gespeichert. Die Kapazität eines Bandes umfaßt 40 bzw. 100 GB (aufgezeichnet werden 10 MB/s bzw. 36 GB/h, dies entspricht rund einer bzw. drei Stunden Aufnahmezeit). Die Input – Datenmenge für ein Gebiet von 200 km² beläuft sich auf 32 GB, der Output beträgt 3,2 GB (Flughöhe 6000m, 70 m/s, Überlappung 50 %). Pro Sekunde werden knapp 10 MB Daten aufgenommen (450 Linien/s x 4 Signalketten) (Renouard & Lehmann 1999). Alternativ zur Datenspeicherung auf Band sind bei anderen Kamerasystemen auch Festplattenspeichersysteme in Gebrauch (z.B. bei den Kameras ADS, DMC etc.).

5.3.4 Filter

Filtersysteme werden für zwei sehr unterschiedliche Aufgaben eingesetzt:

- Die spektrale Zerlegung von eintreffender Strahlung oder
- Abhalten unerwünschter Strahlungsanteile, so daß diese nicht auf den Strahlungsempfänger wirken können.

Bei der fotografischen Aufnahme werden im allgemeinen Glasfilter vor dem Objektiv verwendet. Eine gewisse Filterwirkung kommt schon durch den Glaskörper eines Objektivs oder andere optische Bauelemente zustande, wobei Strahlung unter 0,4 µm fast vollständig absorbiert wird. Zusätzlich werden bei der panchromatischen Schwarzweißaufnahme meist Gelbfilter, Orangefilter oder sogar Rotfilter verwendet, um die kurzwelligen (insbesondere blauen) Strahlungsanteile des kontrastmindernden Luftlichtes abzuhalten (Albertz 1991). Bei der Aufnahme reiner Infrarot-Bilder werden starke Rotfilter oder Infrarotfilter verwendet, die fast alle sichtbare Strahlung absorbieren. Bei Farbaufnahmen beschränkt man sich auf praktisch farblose Filter, die sehr kurzwellige Strahlung abhalten, da farbige Filter das Bild verfälschen würden. In der Farbinfrarot-Fotografie können dagegen auch Gelb- oder Orangefilter eingesetzt werden. Die Verwendung von Filtern bedeutet immer eine Verlängerung der Belichtungszeit, d.h. es wird mit einem sog. Filterfaktor multipliziert.

Bei der HRSC-A werden keine Filter zur Verbesserung der Bildqualität eingesetzt, hier dienen verschiedene Filter zur Trennung der Strahlung in verschiedene Spektralbereiche (Kanäle). CCDs nehmen lediglich verschiedene Helligkeitswerte auf, die Filter ordnen die aufgenommenen Objekte verschiedenen Spektralbereichen zu. Eingesetzt werden Infrarot-, Rot-, Blau- und Grünfilter für die Erfassung der Farbkanäle, ferner ein Clear-Filter für Stereo-, Photometrie- und Nadirkanal, der den gesamten sichtbaren Spektralbereich durchläßt (siehe auch Kap. 4.2.).

5.3.5 Aufnahmeplattform

Beide Systeme werden flugzeuggetragen eingesetzt. Die mittlere Fluggeschwindigkeit beträgt 250 bis 350 km/h, abhängig vom Flugzeug. Die digitale Kamera ist auf einer stabilisierten Plattform montiert, um Vibrationen abzdämpfen und den Nadirblickwinkel zu gewährleisten. Das Einhalten des Nadirblicks ist für die Daten der HRSC-A von besonderer Bedeutung, da Roll-, und Nickwinkel bis zu +/- 2° betragen können und damit bei dem Öffnungswinkel von 11,8° Abweichungen vom Flugweg von über 15% auftreten. Ferner spielt die Dämpfung der Vibrationen für den Scanner eine

besondere Rolle. Je hochfrequenter die Vibrationen sind, desto höher muss die Abtastrate des INS sein, das die Lage der Kamera im Raum bestimmt. Die auf die Kamera einwirkenden Vibrationen haben aufgrund der Dämpfung durch die Plattform Frequenzen kleiner als 20 Hz. Das verwendete Applixsystem arbeitet mit einer Frequenz von 200 Hz und zeichnet die Störungen damit komplett auf.

5.3.6 Spektralkanäle

Die Farbfotografie ist im Sinne der Fernerkundung ein dreikanaliges Aufnahmesystem, da für jede Gelände­fläche drei Meßwerte in den einzelnen Schichten der Farbe registriert werden. Um die Zahl der Kanäle zu vermehren, müssen Multispektralkammern eingesetzt werden, die mit mehreren Objektiven ausgestattet sind (z.B. MSK 4 Jenaoptik (Kramer 1996)). Die spektrale Bandbreite ist durch die Empfindlichkeit der Filme begrenzt.

Digitale Systeme erweisen sich als weitaus flexibler, unterschiedlichste Spektralbereiche können aufgenommen werden (u.a. Hyperspektralsysteme wie HyMap mit 128 Kanälen (VIS; NIR; SWIR; MIR; TIR). Die digitale Kamera HRSC-A verfügt über vier Multispektralkanäle, einen panchromatischen Nadirkanal und vier Stereokanäle von 395 bis 1015 nm.

5.3.7 Belichtungszeiten, Öffnungswinkel und Brennweiten

Die Belichtungszeiten für Luftbilder sollten aufgrund der Flugzeugbewegung sehr kurz sein, sie betragen im allgemeinen 1/500 bis 1/1000 Sekunde. Aus technischen Gründen beträgt ein Belichtungszyklus bei einer RMK mindestens 1,6 bis 2 Sekunden. Die verwendeten Objektive haben Brennweiten von $f=305$ mm (Normal) oder $f=153$ mm (Weitwinkel). Die Öffnungswinkel rangieren von 30° (Schmalwinkelkammer) bis 100° (Weitwinkelkammer).

Die Belichtungszeit bei Scannersystemen entspricht der Integrationszeit der Daten. Die vom Gelände reflektierte Strahlung wird über ein Objektiv aufgenommen und zu den Detektoren der HRSC-A geleitet. Durch die in elektronisch gesteuerten zeitlichen Abständen Δt (2,24 ms) erfolgenden Belichtungen bauen sich in kleinsten Sekundenbruchteilen in den Photoelementen proportional zur eintreffenden Strahlungsenergie elektrische Spannungen auf. Der Öffnungswinkel ist bei der HRSC-A mit $11,8^\circ$ sehr klein, die Brennweite beträgt $f=175$ mm.

5.4 Aufnahmeprinzip und Aufnahmetechnik

Im Gegensatz zur Luftbild-Fotografie, die Einzelbilder aufnimmt, werden die Daten der digitalen Kamera in langen Streifen aufgenommen. Während es sich bei Luftbildern um Momentaufnahmen handelt (alle Kanäle werden zeitgleich aus derselben Position aufgenommen und haben dieselben geometrischen Eigenschaften/Blickwinkel), werden die HRSC-A-Daten fortlaufend zeilenweise aufgezeichnet, dabei ist jede Zeile von einem anderen Ort und zu einer anderen Zeit aufgenommen als die Nachbarzeile.

Ferner gibt es zeitliche Unterschiede bei der Aufnahme gleicher Objekte in den neun Kanälen: durch die Blickwinkelunterschiede beträgt dieser Zeitverzug zwischen vorausblickendem und zurückblickendem Stereokanal 30 sec. D.h., die Bewegung von Objekten wird in den neun Kanälen festgehalten. Bei Luftbildern handelt es sich dagegen um eine sehr kurz belichtete Momentaufnahme (1/1000 sec). Das Bildformat ist auf 23 mal 23 cm^2 festgelegt. Die Flughöhe ist bei beiden Systemen ausschlaggebend für die räumliche Auflösung, bei Scannersystemen spielt in Flugrichtung neben der Flughöhe auch die Scanrate und Fluggeschwindigkeit eine Rolle (siehe auch Kap. 4.3.1.).

Bei einem Aufnahme­maßstab von 1:40 000 (Flughöhe 6000 m) deckt ein Standardluftbild der Größe 23 x 23 cm^2 eine Fläche von rund 85 km^2 ab (9,22 km x 9,22 km). Bei einer Flughöhe von 6000 m nimmt die HRSC-A einen 1242 m breiten Flugstreifen auf, die Länge dieses Streifens ist (nahezu) beliebig (Angaben jeweils ohne Überlappungen der Flugstreifen).

Wird ein Luftbild der Standardgröße 23 x 23 cm^2 mit einer Auflösung von 7 μm gescannt, entsteht eine Datenmenge von 1 GB pro Kanal, d.h. 11 MB pro km^2 , die Auflösung beträgt dann 28 cm (ebenfalls für die oben genannte Flughöhe von 6000 m).

Bei digitalen Daten der HRSC-A entsteht pro km^2 eine Datenmenge von 17 MB pro Kanal (Auflösung 24 cm, Flughöhe 6000 m, Datenmenge abhängig von Flughöhe, Geschwindigkeit etc.).

Beide Systeme können für Anwendungen bis in große Maßstabsbereiche (> 1: 500) eingesetzt werden. Für die Wahl des Bildmaßstabes zur topographischen Kartierung gilt als Faustregel

m_b = Bildmaßstabszahl

$$m_b = 250 * \sqrt{m_k}$$

m_k = Kartenmaßstabszahl

Für die entsprechende Flughöhe h_g gilt:

$$h_g = f \times m_b$$

Demnach ist beispielsweise zur Kartierung im Maßstab 1:25.000 ein Bildmaßstab von 1:40.000 zweckmäßig (siehe auch Tab. 10).

Tab. 10: Bildmaßstäbe bei verschiedenen Kartierungsmaßstäben und Flughöhen

Kartenmaßstab (m_k)	Bildmaßstab (m_b)(gerundet)	Flughöhe [m], gerundet (f=153 mm)	Flughöhe [m], gerundet (f= 305 mm)
1:500	1: 5500	840	1700
1:1000	1: 8 000	1220	2500
1:2500	1: 12 500	1900	3800
1:5000	1: 17 500	2700	5300
1:10 000	1: 25 000	3800	7600
1:12 500	1: 28 000	4300	8500
1:20 000	1: 35 500	5400	10800
1:25 000	1: 40 000	6120	12200
1:50 000	1: 56 000	8600	17 000
1:100 000	1: 80 000	12 250	24 000

Bei beiden Systemen wird mit Überlappungen geflogen. Die Aufnahme von Senkrecht-Luftbildern erfolgt in der Regel in sich überlappenden Parallelstreifen (Abb. 18). Dabei wird in Flugrichtung eine bestimmte Längsüberdeckung s-b eingehalten (s = Bildseite im Gelände, b = Basis). Die Fläche F_n ist somit in zwei aufeinanderfolgenden Bildern wiedergegeben und kann daher stereoskopisch betrachtet werden. Um sicherzustellen, daß jeder Punkt des Geländes in mindestens einem Stereobildpaar enthalten ist, muß mit einer Längsüberdeckung von 60 % (also s - b = 0,6 s) aufgenommen werden. Der Abstand a zwischen den Flugstreifen wird meist so gewählt, daß die Querüberdeckung s - a ungefähr 20 % beträgt. Dies stellt sicher, daß das Gebiet vollständig abgedeckt ist und verhindert Lücken zwischen den Bildern durch Flugbewegungen.

Die Streifen der HRSC-A werden mit einer Überlappung von 30-50% (y) geflogen, auch dies ist eine Sicherheitsmaßnahme aufgrund möglicher Flugzeugrollbewegungen. In Längsrichtung ist bei den Daten der digitalen Kamera eine fünffache Überdeckung gegeben: Derselbe Bildstreifen wird in den fünf Kanälen aus jeweils verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen, diese Information steht bei der Prozessierung zur Verfügung.

Sowohl bei der Luftbildaufnahme als auch bei der Befliegung mit der digitalen Kamera ist es möglich, die Streifen/Bilder grundsätzlich mit 50% Überdeckung zu fliegen und diesen seitlichen Überlappungsbereich als zusätzliche Information zur DOM-Erstellung und Orthobildgenerierung zu nutzen (unterschiedliche Blickwinkel in x und y). Dies bietet eine Möglichkeit für die Luftbildprozessierung und weitwinkliger digitaler Kameras (HRSC-AXW), bei dem kleinen Öffnungswinkel der HRSC-A und bei 50% Überlappung ist der Stereowinkel mit 6° allerdings zu klein.

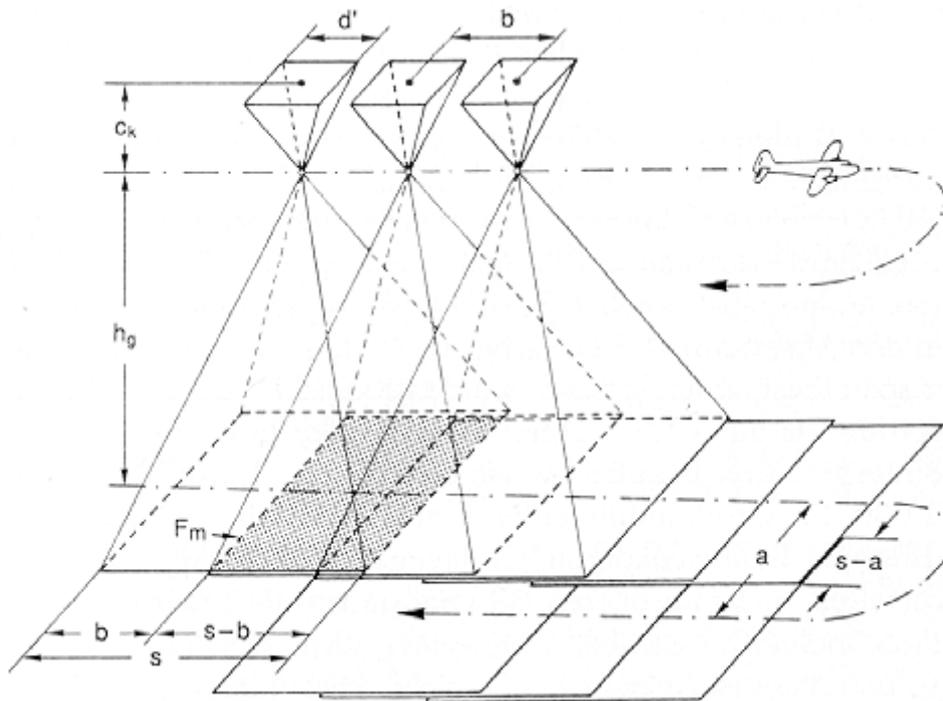


Abb. 18: Prinzip der flächenhaften Luftbildaufnahme mit überdeckenden Längs- und Querstreifen (Albertz 1991)

5.5 Flugbedingungen, Aufnahmezeit

Generell ist die Wahl der Jahreszeit für die Bildaufnahme in erster Linie abhängig von der Aufgabenstellung und regionalen Gegebenheiten. Insbesondere durch die Veränderungen der Vegetation wechselt das Bild der Landschaften im Jahreslauf stark. Für photogrammetrische Zwecke wird in Mitteleuropa wegen der guten Bodensicht das Frühjahr vor dem Laubausbruch bevorzugt. Für die Landnutzungskartierung ist der Frühsommer besser geeignet, zur Beobachtung von Vegetationsschäden sind Farbinfrarotbilder vom Spätsommer besonders günstig. Dies gilt für beide Aufnahmesysteme.

Anforderungen an die Witterungsbedingungen für Befliegungen sind Tageslicht und Wolkenfreiheit. Die Zeitfenster für Befliegungen mit dem digitalen Kamerasystem sind aufgrund der größeren radiometrischen Auflösung größer, günstig wirkt sich hier auch der geringe Öffnungswinkel aus. Schnee- und Wolkenfreiheit (bzw. eine geschlossene Wolkendecke) vorausgesetzt, wird das System ganzjährig eingesetzt, durch den niedrigen Sonnenstand ist jedoch die Anzahl der möglichen Befliegungsstunden im Winter entsprechend verkürzt.

5.6 Spektrale Auflösung

Fotografische Schichten sind zunächst nur für kurzwelliges Licht bis etwa $0,5 \mu\text{m}$ empfindlich (violett bis blaugrün). Durch Sensibilisierung der Schichten wird die Emulsion auch durch die Einwirkung von längerwelligem Licht entwicklungsfähig gemacht. Man unterscheidet mehrere Typen von fotografischen Schichten:

Unsensibilisierte und **orthochromatische** Schichten, die bis etwa $0,5 \mu\text{m}$ bzw. $0,58 \mu\text{m}$ empfindlich sind, zur normalen fotografischen Aufnahme sind sie nicht geeignet.

Panchromatische Schichten sind bis etwa $0,7 \mu\text{m}$ empfindlich, also für den gesamten Bereich des sichtbaren Lichts. Sie geben alle Farben in angemessenen Grautönen wieder und sind daher als Aufnahmematerial weit verbreitet. **Infrarotempfindliche** Schichten sind über $0,7 \mu\text{m}$ hinaus empfindlich. Speziell für die Luftbildinterpretation wurden Farbinfrarotfilme entwickelt, bei denen eine der Schichten für den infraroten Spektralbereich sensibilisiert wird. Ergebnis sind Bilder mit völlig unnatürlicher Farbwirkung („Falschfarbenfilm“), da die Objekte im Infraroten anders

reflektieren als im sichtbaren Licht. Der Effekt wird noch verstärkt, wenn die kurzwellige Strahlung durch Filter abgehalten und deshalb das Bild weitgehend durch infrarote Strahlung erzeugt wird. Diese Filme spielen bei der Luftbildinterpretation eine große Rolle, insbesondere für Vegetationsuntersuchungen (die spezifischen Reflexionseigenschaften der Vegetation im nahen Infrarot stehen in direktem Zusammenhang mit dem Vitalitätszustand der Pflanzen (Kenneweg 1979). Infrarotbilder wirken wegen der kräftigen Schatten besonders kontrastreich. Aufgrund der Unterschiede in den Reflexionseigenschaften der Geländeobjekte und der Luftlichteinflüsse unterscheiden sich panchromatische und infrarote Bilder vor allem durch die in der Tab. 11 aufgeführten Besonderheiten.

Tab. 11: Wiedergabe von Objekten in verschiedenen Bildern (aus Albertz 1991)

Objekt	Panchromatisches Bild	Infrarot-Bild
Wasserflächen	versch. Grautöne	Tiefschwarz
Grüne Blattpflanzen	mittel- bis dunkelgrau	Hellgrau
Schatten	dunkelgrau	Tiefschwarz

Farbfilme müssen - da jede Farbe auf drei Grundfarben zurückgeführt werden kann - aus drei Schichten aufgebaut sein. Bei der üblichen farbfotografischen Umkehrentwicklung entstehen in den Schichten Farbstoffe, die durch subtraktive Farbmischung so zusammenwirken, daß ein positives Abbild des Geländes entsteht.

Zu den wichtigen radiometrischen Eigenschaften von Sensordaten gehört ihre spektrale Auflösung. Sie wird durch die Anzahl der Spektralkanäle und deren jeweilige Bandbreite bestimmt und dient dazu, Unterschiede in der Reflexionscharakteristik verschiedener Oberflächen (spektrale Signaturen) zu erfassen. Dies setzt eine spektrale Kalibrierung voraus, in welcher die Abhängigkeit der Meßwerte von der Wellenlänge der ankommenden Strahlung bestimmt wird.

Die Möglichkeit zur absoluten radiometrischen Kalibrierung ist ein großer Vorteil digitaler Systeme. Eine radiometrische Kalibrierung ist bei Luftbildern nicht möglich. Filme sind abhängig vom chemischen Entwicklungsprozeß, der in radiometrischer Hinsicht nur schwer zu kontrollieren ist.

Die Farbkanäle der HRSC-A decken den Bereich vom sichtbaren Licht bis zum nahen Infrarot ab (395 – 1045 nm) (siehe Kapitel 4.2.).

Da bei der Datenaufnahme sowohl Information aus dem infraroten Spektralbereich wie auch aus dem sichtbaren Licht aufgenommen wird, liegt auch in Schattenbereichen noch auswertbare Information vor, günstig wirkt sich ferner die größere radiometrische Auflösung aus. Somit gelten die in der Tabelle 11 gemachten Beschreibungen sowohl für die panchromatischen als auch für die Infrarotfilme gleichermaßen für die Datensätze der digitalen Kamera.

5.7 Radiometrische Auflösung

Der Grauwertumfang von Luftbildern ist uneinheitlich und von zahlreichen Faktoren (Objektiv, Eigenschaften des Films) abhängig und wird üblicherweise in der Literatur nicht in Grauwerten angegeben. Die Auflösung liegt bei 6 Bit (Schenk 1999).

Die radiometrisch erreichte Auflösung opto-elektronischer Scanner wird durch die A/DWandlung der entstandenen Signale in Grauwerte umgesetzt. Die Quantifizierung in binären Zahlen setzt dabei wiederum das Maß für die Grauwertauflösung. Bei der HRSC-A erfolgt diese Quantifizierung von 10 in 8 bit. Sie führt demzufolge zu 256 Grauwertstufen. Die HRSC-AX hat einen Dynamikbereich von 12 Bit.

5.8 Räumliche Auflösung

Fotografische Schichten können nicht beliebig kleine Details wiedergeben. Das Auflösungsvermögen von Fotos hängt von den Eigenschaften der fotografischen Schicht ab, die immer eine Kornstruktur aufweist. Einfluß nehmen auch Bildfehler des Objektivs, Bewegungsunschärfe, Ebenheit der fotografischen Schicht, Filmbeschaffenheit, Brennweite und Flughöhe des Sensors.

Maß für die Wiedergabe kleiner Details ist das Auflösungsvermögen des Filmmaterials, das üblicherweise über genormte Testtafeln (Abb. 19) ermittelt wird. Diese Tafeln mit parallelen Linien in verschiedener Größe werden fotografiert, ein Vergleich zwischen Foto und Testtafel zeigt, bei welcher Testfigur die Linien noch erkennbar sind. Aufgrund der Maßstabsverhältnisse zwischen der Testvorlage und ihrer Bildwiedergabe ergibt sich, wie vielen Linien pro Millimeter (L/mm) im Bild die noch aufgelöste Testfigur entspricht. Als Maßeinheit hat sich Linienpaar pro mm (lp/mm) eingebürgert. Diese Bezeichnung betont, daß es sich bei den Testlinien um ein Paar aus hellem und benachbartem dunklen Strich handelt.

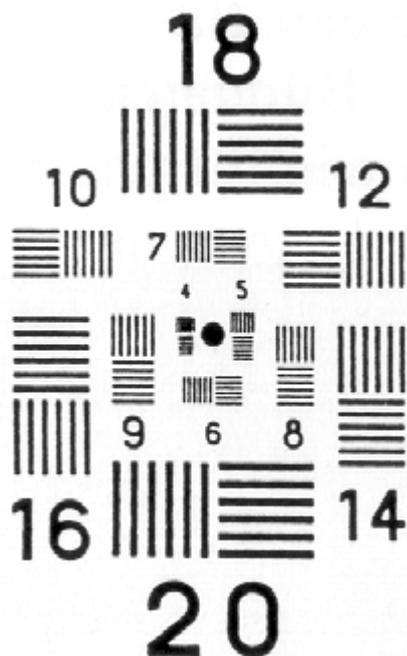


Abb. 19: Testtafel zur Bestimmung des Auflösungsvermögens (aus Albertz, 1991)

Das Auflösungsvermögen wird in erster Linie von der Kornstruktur (Gradation, Lichtempfindlichkeit) der fotografischen Schicht begrenzt. Es nimmt ab zum Rande des Bildes, da hier die Wirkung der Aberrationen der optischen Abbildung zunimmt. Eine Verschlechterung der Auflösung ist ferner zu erwarten, wenn eine kleine Blendenzahl (große Blendenöffnung) gewählt wird, da sich die Beugung am Bildrand dadurch verstärkt. Das Bild verliert dann an Auflösungsvermögen (Tiefenschärfe).

Das Auflösungsvermögen allein ist kein verlässliches Maß für die Erkennbarkeit von Objekten. Diese ist auch abhängig von der Objektform und ihrem Kontrast gegenüber der Umgebung. Bei hohem Kontrast können Objekte jenseits der geometrischen Auflösungsgrenze erkannt werden (z.B. Straßenmarkierungen, Boote auf dem Wasser etc.). Liegt zusätzlich eine auffallende geometrische Form des Objektes vor, wird die Erkennbarkeit zudem erleichtert (Albertz 1991).

Bei Luftbildern liegt die Auflösungsgrenze etwa bei 20 bis 50 Linienpaaren/mm. Das menschliche Auge vermag nur 6 Linienpaare/mm zu trennen. Deshalb sollten Luftbilder bei maximal sechs- bis achtfacher Vergrößerung betrachtet werden.

Werden analoge Luftbilder digitalisiert (gescannt), muß die Scan-Auflösung an die Auflösung des Ursprungsbildes angepaßt werden, damit die erzeugten Rasterdaten des Luftbildes die gewünschte Auflösung erhalten. Üblicherweise werden Scan-Auflösungen von 7, 15 oder 30 µm gewählt.

Probleme bereitet ein Vergleich zwischen dem Auflösungsvermögen von Rasterdaten und dem fotografischer Systeme. Albertz (1991) betont, daß zwischen dem Auflösungsvermögen, mit dem die Leistungsfähigkeit fotografischer Systeme gekennzeichnet wird, und der in Pixelgrößen angegebenen Auflösung digitaler Rasterdaten zunächst kein Zusammenhang besteht, ein unmittelbarer Vergleich beider Aufnahmesysteme ist deshalb nicht möglich, da die Definitionen der Auflösungen verschieden ist. Trotz dieser grundsätzlichen Einwände gibt es Versuche,

Umrechnungsmaße nach pragmatischen Gesichtspunkten zu definieren. Bei Albertz (1991) ist eine Faustregel zur Annäherung nachzulesen. Zunächst muß das im Bild gemessene Auflösungsvermögen [lp/mm] anhand des Bildmaßstabs in die Geländefläche umgerechnet werden. Man erhält dadurch das Auflösungsvermögen in Metern pro Linienpaar [m/lp].

Dann gilt:

$$\text{Auflösung [m/lp]} \approx 2.8 \cdot \text{Auflösung [m/pixel]} \text{ (Kell-Faktor)}$$

Um die Luftbilddaten mit den Auflösungen der HRSC vergleichen zu können, wurden in der folgenden Tabelle verschiedene Auflösungen für Luftbilddaten ermittelt, unterschieden nach Maßstäben und Auflösungsvermögen. Als Grundlage diente die bei Albertz genannte durchschnittliche Auflösungsgrenze von Luftbildern, die bei 20 bis 50 lp/mm liegt. Danach ergibt sich für Luftbildaufnahmen mit dem Maßstab 1:10 000 eine Pixelauflösung zwischen 7 und 18 cm, bei 1: 50 000 eine Bodenauflösung zwischen 35 und 90 cm. In diesen Werten spiegeln sich nicht die Form und Kontraste der aufzunehmenden Objekte wider, die eigentlich das fotografische Auflösungsvermögen bestimmen, deshalb können die Tabellenwerte nur eine Annäherung sein, auf die grundsätzliche Problematik des Vergleichs sei erneut verwiesen.

Tab. 12: Auflösungen für verschiedene Luftbilddaten verschiedener Maßstäbe

	Umrechnung in m/lp	angenäherte Pixelgröße m/pixel	Gemittelt
1 : 10 000 20 lp/mm	0,5 m/lp	0,179	0,125
1 : 10 000 50 lp/mm	0,2 m/lp	0,071	
1 : 12 500 20 lp/mm	0,625 m/lp	0,223	0,155
1 : 12 500 50 lp/mm	0,25 m/lp	0,089	
1 : 25 000 20 lp/mm	1,25 m/lp	0,446	0,31
1 : 25 000 50 lp/mm	0,5 m/lp	0,179	
1 : 50 000 20 lp/mm	2,5 m/lp	0,893	0,625
1 : 50 000 50 lp/mm	1,0 m/lp	0,357	

Tab. 13: Gegenüberstellung der Zeichengenauigkeit und der Auflösung von Luftbildern in verschiedenen Maßstäben

Kartenmaßstab	Aufnahmemaßstab (gerundet)	2/10 mm entspricht	Angenäherte Pixelgröße m/pixel
1 : 100 000	1 : 80 000	20 m	0,56 – 1,44
1 : 50 000	1 : 56 000	10 m	0,39 – 1,00
1 : 25 000	1 : 40 000	5 m	0,28-0,72
1 : 12 500	1 : 28 500	2,5 m	0,196-0,5
1 : 10 000	1 : 25 000	2 m	0,18-0,44
1 : 5 000	1 : 18 000	1 m	0,126-0,324
1 : 2 500	1 : 12 500	50 cm	0,9-22
1 : 1 000	1 : 8 000	20 cm	0,145-0,56
1 : 500	1 : 5 500	10 cm	0,35-0,9

Tab. 14: Zeichengenauigkeit und Auflösungen der digitalen Kamera

Kartenmaßstab	2/10 mm entspricht	Pixelgröße (m)	Aufnahmehöhe (m)
1 : 100 000	20 m		
1 : 50 000	10 m		
1 : 25 000	5 m		
1 : 12 500	2,5 m		
1 : 10 000	2 m		
1 : 5 000	1 m	0,5	10 000
1 : 2 500	50 cm	0,25	6000
1 : 1 000	20 cm	0,10	2500
1 : 500	10 cm	0,05	1250

5.9 Geometrie der Daten, Projektion

Fotografische Systeme bilden die Erdoberfläche in Zentralperspektive ab. Dies hat zur Folge, daß Objektpunkte, welche über der Bezugsfläche liegen, vom Bildnadirpunkt (Mittelpunkt) radial nach außen versetzt werden; darunter liegende nach innen. Dieser Effekt ist umso stärker, je größer der Achsenwinkel vom Nadirpunkt ist; in der Bildmitte verschwindet er ganz (Albertz 1991). Als Folge der radialen Versätze von Objekten entstehen sichttote Räume. Die Nachteile für die Auswertung der Daten durch diese radialen Versätze werden später diskutiert. In einer Karte ist das Gelände senkrecht auf eine horizontale Bezugsfläche projiziert (Abb. 21). Luftbilder sind geometrisch nicht kartengleich, sondern allenfalls kartenähnlich.

Im folgenden soll auf Eigenschaften der zentralperspektivischen Aufnahme eingegangen werden, die maßgeblich die Auswertung von Luftbildern bestimmen:

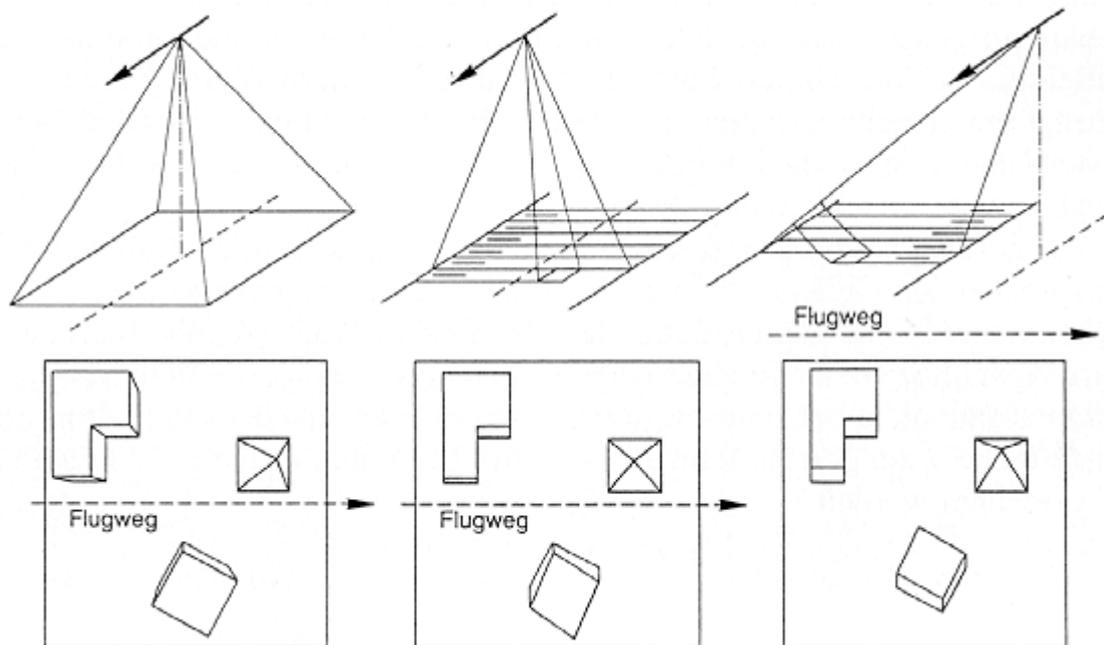


Abb. 20: Schematische Darstellung der Abbildungsgeometrie der wichtigsten Fernerkundungssysteme: Links: Fotografische Systeme, Mitte: Scanner-Systeme, Rechts: Radar-Systeme. Der untere Teil der Abbildung zeigt die Wirkung der verschiedenen Geometrien bei der Aufnahme einer ebenen Geländefläche mit zwei Hochhäusern und einer Pyramide. (aus Albertz 1991)

In der Orthogonalprojektion der Karte gleichlange Strecken werden im Luftbild ungleich lang abgebildet. Anders als die Karte stellt somit ein Luftbild das Gelände nicht maßstabsgleich in Bezug auf Horizontalentfernungen dar, für jeden Abbildungsort ergibt sich somit ein anderer Maßstab. Höhergelegene Geländeorte werden in größerem Maßstab als tieferliegende abgebildet. Lediglich in Geländehöhe der Bezugsebene gilt der gewählte Maßstab (Hildebrandt 1996). Als Bildmaßstab m_b bezeichnet man hierbei das Verhältnis einer Bildstrecke zur entsprechenden Geländestrecke. Der durch Aufnahmeneigung und Geländehöhenunterschiede uneinheitliche Bildmaßstab wird als abgerundeter Zahlenwert angegeben. Er kann aus dem Verhältnis einer Bildstrecke s' zu einer Kartenstrecke s oder von Kammerkonstante c zu Flughöhe h_g errechnet werden:

$$M_b = 1 : m_b = s' : s = c_k : h_g$$

Bei genauen Kartierungen müssen auch die Verzerrungen korrigiert werden, die aus der Abweichung von der Lotlinie der Senkrechtaufnahme abzuleiten sind. In einem idealen Nadirbild ist der Bildmaßstab überall gleich; bei Abweichungen ergibt sich daraus eine Verzerrung des Maßstabes innerhalb derselben Aufnahme.

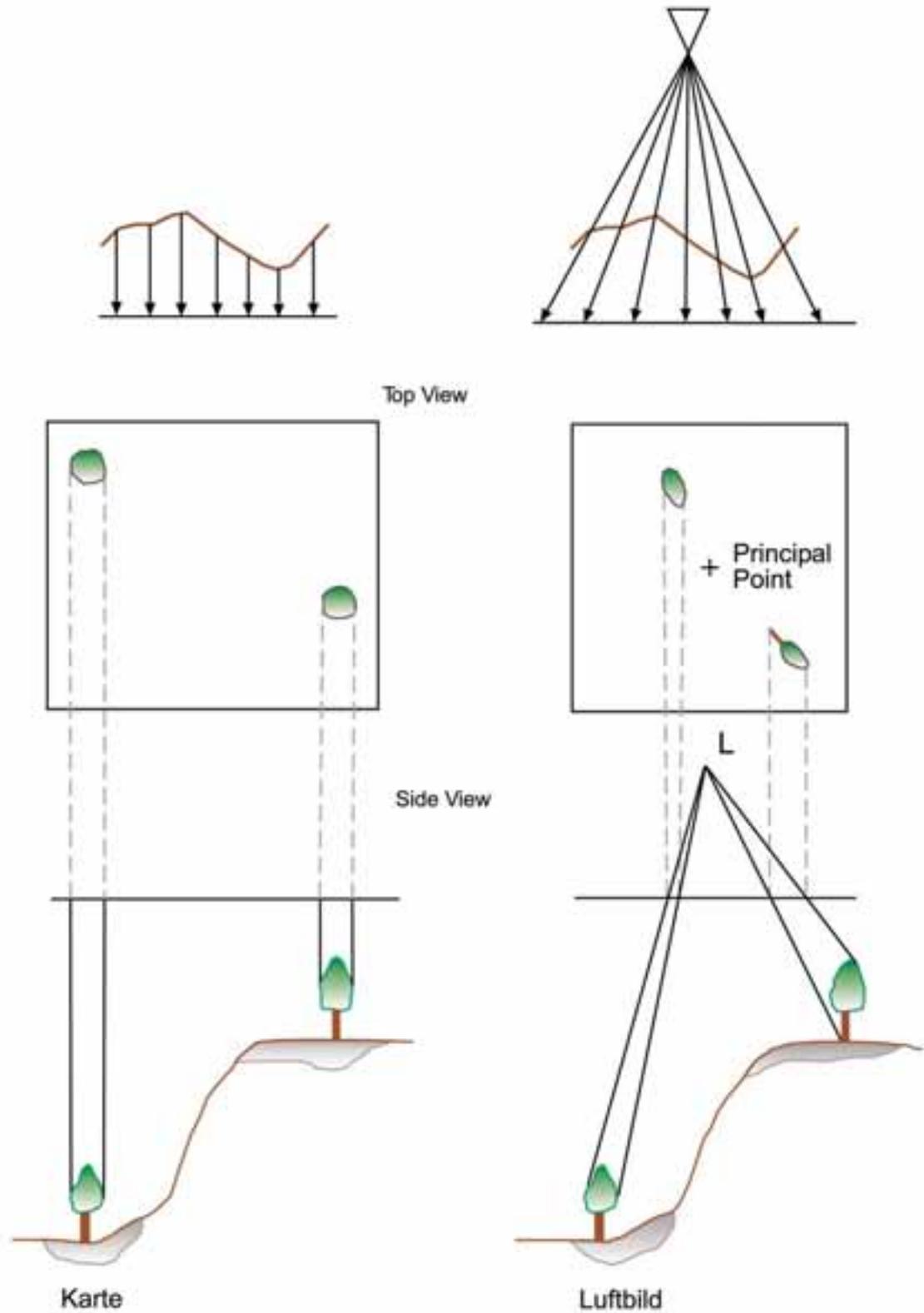


Abb. 21: Abbildung des Geländes in Karte und Luftbild, linke Spalte: senkrechte Parallelprojektion in der Karte, rechte Spalte: Zentralprojektion in die Bezugsebene eines Luftbildes, deutlich werden die Veränderungen in Form, Größe, Schatten und Position der Bäume (oben: nach Albertz 1991, unten: nach Lillesand & Kiefer 1994)

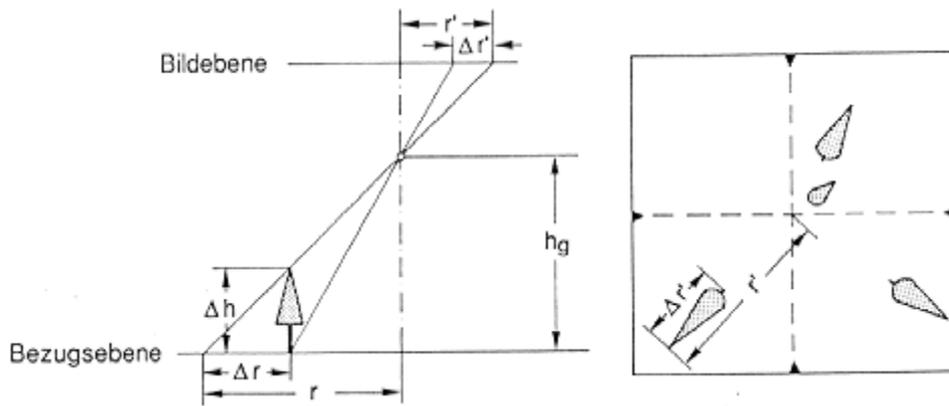


Abb. 22: Radiale Versetzung durch Höhenunterschiede (aus Albertz 1991)

Im Gegensatz zur fotografischen Aufnahme entsteht das Scanner-Bild nicht zu diskreten Zeitpunkten, sondern kontinuierlich, Zeile für Zeile. Für die Geometrie der entstehenden Aufnahme ist dies von entscheidender Bedeutung, da jede Bildzeile von einem anderen Ort aus und mit einer anderen räumlichen Lage des Fernerkundungssystems aufgenommen wird. Es resultieren Bilder mit wesentlich komplexeren geometrischen Eigenschaften als dies bei der fotografischen Luftbildaufnahme der Fall ist. Grundsätzlich wirken sich drei Faktoren auf die Geometrie der Scanner-Daten aus:

- Aufnahmetechnik
- Sensorbewegung (Flugbahn)
- Oberflächenform des Geländes

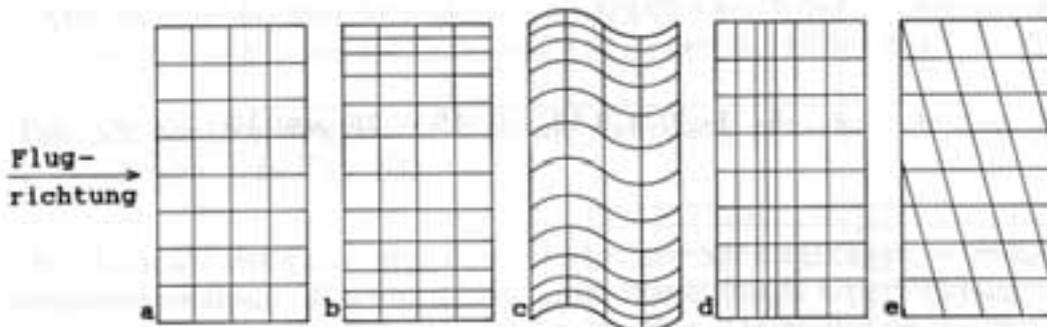


Abb. 23: Verzerrungen im Scannerbild durch flugbedingte Einflüsse: a= orthogonale Situation, b= ungestörtes Scannerbild, c= Verzerrung durch Querneigung (Rollbewegung), d= Verzerrung durch Längsneigung (Nickbewegung), e= Verzerrung durch Verkantung (nach Lillesand und Kiefer 1994)

Die Geometrie einer opto-elektronischen Scanneraufzeichnung ist durch die zeitgleiche Aufnahme eines ebenen Strahlenbündels durch eine rechtwinklig zur Aufnahmeachse in der Brennebene liegende Detektorzeile einfacher als jene opto-mechanischer Zeilenabtaster. Vorteil der CCD-Technik ist die fehlende mechanische Bewegung des Systems. Weder Panoramaverzerrungen noch s-förmige Deformationen der Scanzeile – wie bei opto-mechanischen Scannern - treten auf (Hildebrandt 1996). Ebenes Gelände und lotrechte Aufnahme vorausgesetzt, haben bei einem Scanner neben der Erdkrümmung (bei Aufnahmen aus dem Weltraum) auch die Flughöhe, die Fluggeschwindigkeit, die Integrationszeit und die CCD-Pixelgröße Einfluß auf die Größe der von den Pixeln erfaßten Bodenelemente. Zur Bestimmung der Länge einer Abtastzeile (Breite des Aufnahmestreifens) und der Größe des von jedem einzelnen Detektor erfaßten Bodenelements (räumliche Auflösung des Scanners in x- und y-Richtung) siehe Kap. 4.3.1)

In jedem Scanstreifen wird durch das aufgenommene ebene Strahlenbündel der entsprechende Geländestreifen zentralperspektivisch abgebildet. Es gelten dabei die Gesetze der

Zentralperspektive, wie sie für Luftbilder bekannt sind. Neben den genannten systembedingten Verzerrungen kann es auch bei opto-elektronischen Aufnahmen in Analogie zu Luftbild- und optomechanischen Scanner-Aufnahmen zu zufälligen Verzerrungen kommen. Sie gehen auf Veränderungen der Flughöhe und Fluggeschwindigkeit sowie der Lage des Flugkörpers (Längs- und Querneigung, Kantung) zurück (Abb. 23).

Diese Verzerrungen werden im Rahmen der photogrammetrischen Prozessierung mit Hilfe der Daten der äußeren Orientierung für jede Zeile korrigiert.

Bei den Scannerdaten handelt es sich um eine Mischprojektion aus paralleler (in Flugrichtung) und zentraler Projektion (senkrecht zur Ebene), höher gelegene Punkte werden senkrecht zur Flugrichtung nach außen versetzt. Wegen des geringen Öffnungswinkels von $11,8^\circ$ ist dieser Effekt jedoch bei HRSC-A-Bildern nicht sehr ausgeprägt.

5.10 Orthobildgrundlage DGM oder DOM

Für die Generierung von Orthobildern kann entweder ein Oberflächenmodell (DOM = Digitales Oberflächenmodell) oder ein Höhenmodell (DHM = Digitales Höhenmodell) verwendet werden. Ein Oberflächenmodell bildet das Gelände mit allen aufragenden Objekten wie Vegetation, Bebauung etc. ab. Ein Höhenmodell zeigt ausschließlich das Gelände, aufragende Objekte sind nicht berücksichtigt.

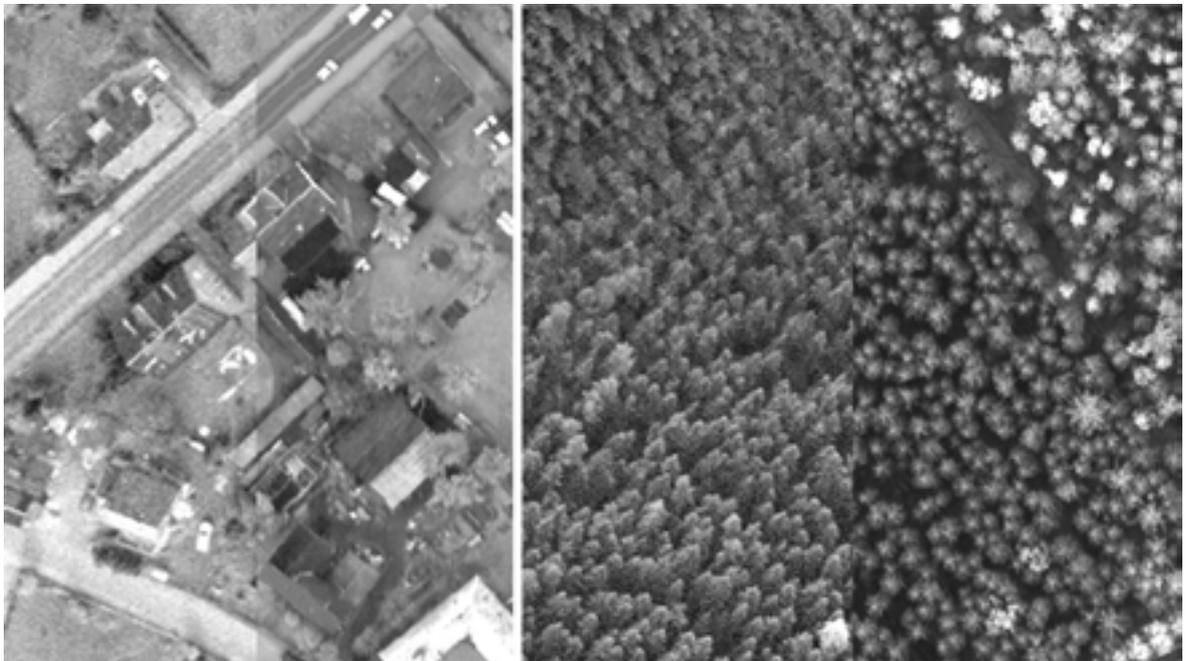


Abb. 24: Vergleich der Geometrie eines Luftbilds vom 23.10.98 aus 2500 m Höhe mit 40 cm Auflösung (rechts) mit Daten des Nadir-Kanals der HRSC-A vom 21.10.98 aus 3000m Höhe, Auflösung 25 cm (links)

In der photogrammetrischen Praxis werden zur Orthobildgenerierung von Luftbildern Digitale Geländehöhenmodell als Grundlage genommen. Die zentralperspektivische Abbildung des Luftbildes wird mittels dieses Geländemodells in die Orthogonalprojektion einer topographischen Karte überführt. Das generell hierfür verwendete DGM liegt bundeseinheitlich als ATKIS-DGM 25 mit einem 20-Meter-Gitter vor, der mittlere Punkthöhenfehler wird mit < 2 m angegeben. Die Genauigkeit der Orthobilddaten ist durch einen Lagefehler $< 0,5$ m bestimmt. Diese Genauigkeiten gelten nur für die Geländehöhe, darüber aufragende Objekte (Häuser, Bäume etc.) bleiben unentzerrt.

Der durch das Aufnahmeprinzip verursachte radiale Versatz von Objekten wird nicht korrigiert. Die geometrischen Eigenschaften dieser Objekte sind eher zufällig durch ihre Lage auf dem Luftbild bestimmt, je nachdem, ob sie im mittleren Bereich (wenig Verzerrung) oder im Randbereich (große Versätze) liegen. Ein Beispiel verdeutlicht die Größenordnung dieses Fehlers: Auf einem mit einer

Reihenmeßkammer ($f = 153 \text{ mm}$) aufgenommenen Bild wird ein Haus mit einer Höhe von 30 m in einer äußeren Ecke (Bildkoordinate $x'=y'=100 \text{ mm}$) mit einem radialen Versatz von 27,7 m falsch positioniert.

Bei der Wahl der Reihenmeßkammer sind die Auswirkungen verschiedener Bildwinkel zu bedenken. Der Helligkeitsabfall in der Bildebene, die Mitlicht-Gegenlicht-Unterschiede und die Lageversetzungen durch Gelände- und Objekthöhen wachsen mit zunehmendem Bildwinkel an. Ihr Einfluß ist deshalb bei Normalwinkelkammern ($c = 30 \text{ cm}$) oder gar Schmalwinkelkammern wesentlich geringer als bei Weitwinkelkammern ($c = 15 \text{ cm}$). Im Zweifelsfalle sind aus diesem Grunde Normalwinkelkammern vorzuziehen. Die Problematik der Blickwinkelunterschiede der HRSC-A-Daten wurde bereits in Kapitel 4.6. diskutiert. Die Aufnahmeneigungen und die Geländeoberfläche führen ferner dazu, daß der Bildmaßstab auf Luftbildern uneinheitlich ist, er wird daher nur in abgerundeten Zahlenwerten angegeben. Ferner bereitet die Mosaickierung von Luftbildern Probleme, da benachbarte Fotos verschiedene Geometrien aufweisen. Durch die radialen Versätze ist die Zusammenführung von Luftbildern schwierig, da Objekte in benachbarten Bildern anders abgebildet werden (Versatz nach verschiedenen Seiten). Dies erschwert die Angleichung der Übergangsbereiche und somit die Erstellung eines Mosaiks verschiedener Bilder.

Die Orthobilder aus HRSC-Daten werden mit Hilfe eines Digitalen Oberflächenmodells gewonnen. Ergebnis der Prozessierung sind Orthobilder, die mit einer Genauigkeit von 15 cm (x,y) die Erdoberfläche abbilden. Verzerrungen, die sich durch die Geländeneigungen/Höhenunterschiede ergeben, werden durch den Einsatz eines Geländeoberflächenmodells eliminiert, Häuser und Geländeoberflächen werden geometrisch richtig abgebildet. Den geometrischen Unterschied zwischen HRSC-A-Daten und Luftbildern zeigt Abb. 24. Die beiden Ausschnitte desselben Testgebietes, eines Waldgebiets bei Dresden, zeigen einen Nadelwaldbestand. Deutlich zu erkennen ist der radiale Versatz der Bäume auf dem Ortho-Luftbild, sie werden in der Seitenansicht abgebildet. Erkennbar ist auch die geringere radiometrische Auflösung der Luftbilddaten, der Informationsgehalt des Luftbildes ist somit geringer und die Interpretierbarkeit reduziert.

Für Anwendungen, die sich mit Objekten oberhalb der Erdoberfläche beschäftigen, sind die HRSC-Daten somit besser geeignet, da diese Objekte lagertreu wiedergegeben werden.

5.11 Radiometrische (physikalische) Eigenschaften

Neben den geometrischen Beziehungen bestehen zwischen einem Bild und dem abgebildeten Objekt auch physikalische Zusammenhänge, da die Bildentstehung von der Intensität und der spektralen Zusammensetzung der elektromagnetischen Strahlung, von den Absorptionseigenschaften der aufzunehmenden Objekte/des Geländes etc. abhängt. Folge davon sind radiometrische Eigenschaften, die ein Bild kennzeichnen.

Unter idealen Verhältnissen (störungsfreie Messung, linearer Zusammenhang zwischen den Meßwerten und der Strahlungsleistung, Meßwerte unabhängig vom Ort im Bild bzw. von der Beobachtungsrichtung) würden die aufgezeichneten Bilddaten die am Sensor ankommende Strahlung fehlerfrei erfassen. Tatsächlich treten erhebliche Abweichungen von diesem Idealfall auf.

Jeder Meßwert ist zunächst aus physikalischen Gründen einer statistischen Unsicherheit unterworfen, die als Rauschen bezeichnet wird. Sie drückt sich entweder in Schwankungen der Meßdaten aus oder in der körnigen Struktur von fotografischen Bildern. Ein Meßsignal kann nur empfangen werden, wenn es deutlich über dem Rauschen liegt. Die Leistungsfähigkeit eines Sensors hängt deshalb vom Signal-Rausch-Verhältnis ab. Dieses kann man zwar durch die Wahl einzelner technischer Parameter beeinflussen, doch geht eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses stets zu Lasten eines anderen Parameters. So ist beispielsweise bei fotografischen Schichten eine hohe Empfindlichkeit mit einer gröberen Komstruktur verbunden; bei Scanner-Systemen muß eine hohe radiometrische Auflösung mit einer geringeren geometrischen Auflösung (größeres IFOV) erkaufte werden.

Um einen Zusammenhang zwischen den Meßdaten und den zu beobachtenden physikalischen Größen herstellen zu können, müssen Meßgeräte kalibriert werden. Zur radiometrischen Kalibrierung eines Sensors kann man eine bekannte Strahlungsquelle benutzen und die Meßwerte registrieren, die sich bei verschiedenen Strahlungsleistungen ergeben. Ein linearer Zusammenhang zwischen Strahlungsleistung und Meßsignal läßt sich nur für einen bestimmten Meßbereich erzielen. Die technischen Parameter von Sensor-Systemen müssen daher auf den

Einsatzzweck abgestimmt werden, ein Satelliten-Scanner sollte beispielsweise dunkle Lavafelder und Schneeflächen gleichermaßen erfassen können. Eine Abstimmung auf diese extrem unterschiedlichen Aufnahmeanforderungen führt dazu, daß manche Landschaftsszenen in den aufgenommenen Daten nur einen kleinen Bereich der meist 256 möglichen Grauwerte enthalten. Bei der HRSC-A wird diese Anpassung an sehr unterschiedliche Helligkeiten der aufzunehmenden Gebiete durch elektronische Verstärkung des Signales während der Aufnahme erreicht. Über einen „Quicklook“-Kontrollmonitor können die Einstellungen während der Aufnahme kontrolliert und gegebenenfalls an wechselnde Bedingungen angepaßt werden.

Vielfach machen sich Restfehler der Kalibrierung störend bemerkbar (z.B. Alterung der Elektronik etc.). Ferner können auch richtungsabhängige Verfälschungen der radiometrischen Meßwerte auftreten. Die verwendeten Objektive weisen stets einen Helligkeitsabfall in der Bildebene auf, der mit Methoden der Bildverarbeitung korrigiert wird.

5.12 Datenverarbeitung: Prozessierung der Daten

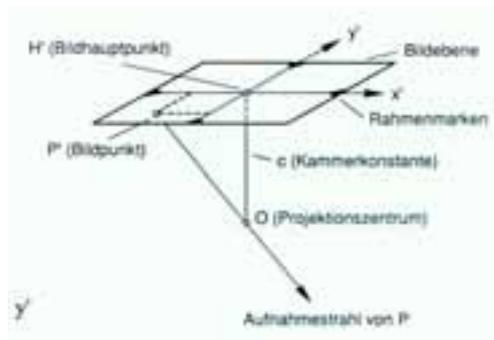


Abb. 25: Abbildungsgeometrie eines Luftbildes (Albertz 1991)

Die photogrammetrische Auswertung beruht auf der geometrischen Rekonstruktion des Aufnahmevorgangs. In der Luftbildfotografie ist dies nur dann mit der angemessenen Genauigkeit möglich, wenn die auszuwertenden Bilder mit einer Reihenmeßkammer aufgenommen sind und somit die *Innere Orientierung* (die das abbildende Strahlenbündel beschreibt) gegeben ist. Das Objektiv ist über den Kammerkörper fest mit dem Anlegerahmen verbunden. Dadurch wird eine feste innere Orientierung (räumliche Lage des Projektionszentrums relativ zur Bildebene) gewährleistet. Die Kenntnis ist Voraussetzung für die photogrammetrische Auswertung der aufgenommenen Bilder, da sonst das zentralperspektive Aufnahmestrahlenbündel nicht rekonstruiert werden kann.

Bei der Aufnahme führt jeder Geländepunkt (definiert durch die 3 Koordinaten x , y und z) zu einem eindeutig bestimmten Bildpunkt (definiert durch die Bildkoordinaten x' und y'). Umgekehrt jedoch kann die Raumlage des Geländepunktes aus lediglich einem Bildpunkt nicht eindeutig rekonstruiert werden, es bedarf einer zusätzlichen geometrischen Information.

Diese Zusatzinformation wird durch zwei verschiedene Auswerteverfahren gewonnen:

Entzerrung (dritte Koordinate wird dadurch bestimmt, daß der Objektpunkt innerhalb einer gegebenen Geländeebene liegen muß)

Stereoauswertung (Information wird aus einem zweiten Bild herangezogen, um die Raumlage eines Geländepunktes zu bestimmen) (Albertz 1991).

Um die erforderlichen geometrischen Beziehungen zwischen den Bildkoordinaten und den Geländekoordinaten zu bestimmen, verwendet man Paßpunkte, deren Koordinaten im System der Landesvermessung gegeben sind. Im Falle der Entzerrung dienen die Paßpunkte dazu, den geometrischen Bezug zwischen der Bildebene und der Geländeebene herzustellen, bei der Stereoauswertung ist es erforderlich, mit ihrer Hilfe die Lage der Aufnahmekammer im Raum (Äußere Orientierung) mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Topographische Objekte (z.B. Wegekreuze) reichen für photogrammetrische Genauigkeitsforderungen als Paßpunkte nicht aus, man verwendet Signale, die vor der Datenaufnahme im Gelände ausgelegt werden. Die Koordinaten der Paßpunkte werden mit vermessungstechnischen Verfahren bestimmt oder durch

Aerotriangulation gewonnen. Die Gewinnung von Paßpunkten ist mit erheblichem Aufwand (zeitlich und finanziell) verbunden und stellt einen spürbaren Engpaß in der Anwendung photogrammetrischer Verfahren dar (Albertz 1991).

Zur automatischen Herstellung von Orthobildern werden digitalisierte Luftbilder und ein digitales Geländemodell (DGM) benötigt, letzteres liefert die benötigten Höhendaten. Es kann entweder ein vorhandenes DGM genutzt werden oder eins, das im Rahmen der digital-photogrammetrischen Bearbeitung hergeleitet wurde. Die Höhengenaugigkeit eines DGM und aus diesem abzuleitender Höhendaten für die digital differentielle Entzerrung der einzelnen Bildelemente ist vom Abstand der Gitterpunkte des DGM abhängig, daher ist - unter Berücksichtigung der Reliefverhältnisse - ein entsprechend kleiner Abstand der Gitterpunkte erforderlich (z. B. 10 m).

Die geometrischen Beziehungen des differentiell zu entzerrenden Luftbildes zum Geländekoordinatensystem werden durch innere und äußere Orientierung des Stereobildpaares entweder automatisch oder interaktiv durch den Auswerter hergestellt (Hildebrandt 1996). Einzelheiten der Prozessierung können den zahlreichen Lehrbüchern zu diesem Thema entnommen werden. Die Prozessierungsroutine für die Daten der HRSC-A ist ausführlich in Kap. 4 beschrieben.

Vorteile der Orthobildherstellung mit Mitteln der digitalen Photogrammetrie sind die Möglichkeiten der Bildverbesserung während der Vorverarbeitung (z. B. Kontrastveränderungen), die radiometrische Angleichung mehrerer Bilder für Mosaik und Bildkarten, die besseren Voraussetzungen für die Herstellung farbiger Orthobilder, die Möglichkeit für die Integration der geokodierten Rasterdaten der Orthobilder in GIS und der hohe Grad an Automatisierung (Hildebrandt 1996). Durch die Automatisierung des Verfahrens kann die Verfügbarkeit von Orthobildern erheblich beschleunigt werden.

Der entscheidende Unterschied bei der Prozessierung von Daten beider Aufnahmesysteme ist die Art und Weise, wie die Daten der äußeren Orientierung verarbeitet werden. Dies hat auch Auswirkungen auf die erzielbaren Genauigkeiten beider Systeme.

Die Daten beider Aufnahmesysteme unterscheiden sich nicht nur durch die unterschiedlichen Aufnahmeprinzipien, erheblich anders ist bei den digitalen Kamerasystemen auch die weitere Verarbeitung. Dies gilt insbesondere für die Gewinnung der Daten der äußeren Orientierung, also die Information über Position und Lage des Aufnahmesystems während der Aufnahme. Die Art und Weise der Bestimmung dieser Daten hat großen Einfluß auf die Prozessierung der gewonnenen Bilddaten und auf die erzielbaren Genauigkeiten. Während bei den Luftbildern die Daten der äußeren Orientierung indirekt über eine Rekonstruktion der Strahlenbündel bestimmt werden, erfolgt bei den digitalen Kamerasystemen eine direkte Messung von Position und Lage mittels kombinierten GPS/INS-Systemen. Diese neue Vorgehensweise hat die Photogrammetrie erheblich verändert, in der Literatur wird von einem Paradigmenwechsel der Photogrammetrie gesprochen.

Die Hauptaufgabe der klassischen Photogrammetrie bestand in der Berechnung der Position und Lage des Kamerasystems zum Zeitpunkt der Aufnahme. Diese Daten der äußeren Orientierung werden indirekt über die zentralperspektivisch aufgenommenen Bilder bestimmt. Pro Bild gibt es eine einheitliche äußere Orientierung. Diese läßt sich mit Hilfe von identischen Punkten in den Bildern und Paßpunkten rekonstruieren (Stichwort: Zweibildauswertung, Aerotriangulation, Bündelausgleichung, beschrieben u.a. bei Kraus & Schneider 1988, Kraus 1994, Konecny & Lehmann 1984). Für Mehrzeilensensoren läßt sich die äußere Orientierung auf ähnliche Weise bestimmen (Hofmann 1982), dies bedarf jedoch eines ungleich aufwendigeren Verfahrens. Im Gegensatz zum Luftbild hat in einem Scannerbild jede einzelne Zeile eine eigene äußere Orientierung, dies führt zu einem erheblichen Mehraufwand für die Bestimmung der Daten der äußeren Orientierung. Durch den Einsatz von kombinierten GPS/INS-Systemen können die Daten der äußeren Orientierung auch direkt gemessen werden, unabhängig vom Bildaufnahmesystem (Stichwort: Direkte Georeferenzierung, beschrieben u.a. bei Cramer 1999, Lithopoulos 2000, Schwarz 1995, Wewel 1996, Hutton & Lithopoulos 1998, Reid et al. 1998).

Für die Bestimmung der äußeren Orientierung bzw. der Georeferenzierung der Bilddaten kommen in der Praxis drei Verfahren zum Einsatz:

1. Der nicht parametrische Ansatz, der auch bei der Georeferenzierung von Satellitenbilddaten zum Einsatz kommt. Dabei wird die äußere Orientierung nicht explizit bestimmt, die Bilddaten werden vielmehr über Paßpunkte mittels Polynomtransformation direkt auf die gewünschte Referenzfläche entzerrt.

2. Die Bestimmung der äußeren Orientierung nach photogrammetrischen Methoden für Stützpunkte und die Interpolation für alle anderen Bildzeilen (Kraus 1994, Müller 1991)
3. Die direkte Messung der äußeren Orientierung mittels kombinierter GPS/INS-Sensoren (Cramer et al. 2000, Wewel 1996).

Die Verfahren 2 und 3 können auch kombiniert eingesetzt werden (Müller 1991, Tempelmann et al. 2000). Je nach der Qualität des Aufnahmesystems für die Daten der äußeren Orientierung liegt dann der Schwerpunkt auf dem photogrammetrischen Verfahren oder auf dem meßtechnischen Verfahren der Bestimmung der Position und Lage der Kamera. Bei der HRSC-A wird ein hochqualitatives kombiniertes GPS/INS-System verwendet. Daher beschränkt sich die photogrammetrische Arbeit auf die Bestimmung des Einbauoffsets zwischen Kamerasystem und dem INS. Dies geschieht über die Rekonstruktion von Sichtstrahlen identischer Punkte in den Stereobildern und in den Bildern benachbarter Bildstreifen. Da die absolute Georeferenzierung über die gemessenen GPS-Positionen erfolgt, werden Paßpunkte nur zur Kontrolle der Orientierung gebraucht.

Der Vorteil der direkten Messung der Orientierungsdaten liegt somit darin, daß die Anzahl an Paßpunkten drastisch reduziert werden kann, da diese nur noch zur Kontrolle der absoluten Genauigkeit und zur Referenzierung der Daten auf das lokale Datum dienen. Damit werden sowohl die Kosten für die Feldarbeiten gesenkt als auch der Arbeitsaufwand für die Prozessierung, da das Messen von Paßpunkten in den Bilddaten entfällt. Dieses Messen stellt einen arbeitsintensiven Schritt der Prozessierung dar, der bisher nicht automatisiert werden konnte. Diese Vorteile der direkten Messung der äußeren Orientierung führen dazu, daß dieses Verfahren zunehmend auch für die Luftbildaufnahme getestet wird. Nachteilig ist, daß während der Bildaufnahme eine GPS-Referenzstation betrieben werden muß. In den meisten Gebieten Deutschlands können als Referenzdaten die SAPOS-Stationen der Landesvermessungsämter genutzt werden. Die GPS-Station sollte sich im Umkreis von 50 km des Aufnahmegebietes befinden.

5.13 Genauigkeiten

Die photogrammetrische Genauigkeit hängt im wesentlichen von drei Faktoren ab:

- Innere Orientierung
- Äußere Orientierung
- Bildpunktauflösung und Punktmessung

5.13.1 Innere Orientierung

Die Genauigkeit der *inneren Orientierung*, d.h. das abbildende Strahlenbündel, muß geometrisch genau bekannt sein.

Bei der Luftbildkamera müssen dabei sowohl die Kamerageometrie (Brennweite, Kamerahauptpunkt, Objektivverzeichnung etc.) wie auch die Lage des Filmes in Bezug zum Hauptpunkt bekannt sein. Folgende Fehler können dabei zum Tragen kommen:

- Kalibrationsfehler
- Meßfehler bei der Bestimmung der Rahmenmarken
- Filmdeformation
- Modellfehler (z.B. bei Annahmen zur Objektivverzeichnung).

Bei der digitalen Kamera sind dagegen Kamerakörper und Sensoreinheit fest miteinander verbunden. Bei der Kamerakalibrierung im Labor wird die Brennweite bestimmt und die Position der einzelnen Sensorelemente im Bezug zum Kamerahauptpunkt vermessen. Objektivverzeichnung und Sensorunebenheit werden direkt bei der Vermessung der einzelnen Sensorelemente berücksichtigt. Die Güte der inneren Orientierung ist bei der digitalen Kamera damit alleine von der Qualität der Kamerakalibrierung abhängig. Die innere Orientierung der Sensoren ist durch einmalige Kamerakalibrierung für alle Aufnahmen direkt bekannt.

Für die direkte Georeferenzierung von Bilddaten ohne die Verwendung einer zusätzlichen photogrammetrischen Bestimmung der Daten der äußeren Orientierung über Paßpunkte, wie sie bei der HRSC-Befliegungen verwendet wird, ist die hochgenaue Bestimmung der Daten der

inneren Orientierung essentiell, da Fehler z.B. der Brennweitenbestimmung nicht während der Punktbestimmung kontrolliert werden und zu Maßstabsfehlern führen.

5.13.2 Äußere Orientierung

Wie schon im Kapitel 5.1.12. erwähnt, erfolgt die Bestimmung der äußeren Orientierung bei der Luftbilddauswertung z.Z. noch ausschließlich photogrammetrisch, z.B. durch Aerotriangulation oder durch Bündelausgleichung. Da die direkte Messung der äußeren Orientierung auch für die analoge Luftbilddaufnahme große Vorteile verspricht, wurden in den letzten Jahren eine Anzahl von Tests zur Eignung der GPS/INS-Systeme für die Luftbilddaufnahme durch verschiedene Institutionen durchgeführt (Lithopoulos 1999, Cramer 1999, Heipke et al. 2000). Dabei wurden die Ergebnisse der Punktbestimmung aus der Aerotriangulation und der Bestimmung mittels der direkt bestimmten Daten der äußeren Orientierung für ein und dieselbe Befliegung direkt miteinander verglichen. Cramer (1999) gibt für seine Untersuchungen eine mittlere Lagegenauigkeit der Objektpunkte von $\pm 6\text{cm}$ und für die Höhe von $\pm 12\text{cm}$ für die Auswertung mit den direkt gemessenen Daten der äußeren Orientierung an (bei einer Flughöhe von 2000 m und einem Bildmaßstab von 1:13000). Damit waren diese Werte nur geringfügig schlechter als die in der Literatur (z.B. Kraus 1994) angegebenen theoretischen Genauigkeitswerte für die Aerotriangulation von $\pm 5\text{cm}$ (Lage) und $\pm 10\text{cm}$ für die Höhe bei der gegebenen Aufnahmekonfiguration.

5.13.3 Bildpunktauflösung und Punktmessung

Wie bereits in Kapitel 5.1.8. (Auflösung fotografischer Bilder) aufgezeigt wurde, ist ein Vergleich des Auflösungsvermögens von analogen Luftbildern und digitalen Daten wie denen der HRSC nicht unmittelbar möglich. Legt man den Kell-Faktor (Albertz 1991) zugrunde, so haben Luftbilder und die digitalen Daten der HRSC ein ähnliches Auflösungsvermögen. Auch die Punktmessung sollte - ob im analogen oder im digitalen Bild durchgeführt - ein vergleichbares Genauigkeitspotential besitzen.

5.13.4 Genauigkeitsuntersuchungen mit der HRSC

Die Genauigkeit der Daten des digitalen Kamerasystems HRSC-A wurde im Rahmen von Testflügen wiederholt validiert. Im Januar/Februar 1998 wurden zwei Testfelder befliegen, in denen jeweils mehr als 100 signalisierte Punkte ausgelegt waren. Die Testfelder wurden mit Aufnahmehöhen von 3000 m und Fluggeschwindigkeiten von 250 bis 270 km/h befliegen, die Bodenpixelauflösung beträgt bei dieser Konstellation rund 12 cm. Die Testfelder wurden mit einer 50%igen Überdeckung geflogen.

Für die Punktbestimmung an 120 Kontrollpunkten ergab sich ein mittlerer Lagefehler von $\pm 12\text{ cm}$ und ein mittlerer Höhenfehler von $\pm 20\text{ cm}$ (Wewel & Brand 1999). Diese Genauigkeitswerte wurden in weiteren Projektbefliegungen bestätigt. Die empirisch ermittelten Genauigkeitswerte für die Punktbestimmung mit der HRSC sind damit:

Lage: $m_{x,y} = \pm 7\ \mu\text{m} \cdot \text{Bildmaßstabszahl} (m_b)$

Höhe: $m_z = \pm 0,07\text{‰}$ der Aufnahmeentfernung (fh)

Diese Werte sind ca. doppelt so groß wie die theoretischen Genauigkeitswerte für die Bündelblockausgleichung, die von Kraus (1994) wie folgt angegeben werden:

Lage: $m_{x,y} = \pm 3\ \mu\text{m} \cdot \text{Bildmaßstabszahl}$

Höhe: $m_z = \pm 0,04\text{‰}$ der Aufnahmeentfernung

Die Größenordnung der Genauigkeit der HRSC-Daten entspricht aber den von ihm empirischen ermittelten Werten für die photogrammetrische Punktbestimmung aus Luftbilddaten ($m_{x,y} = \pm 9\ \mu\text{m} \cdot m_b$, $m_z = \pm 0,06\text{‰} \cdot fh$) (Wewel 2000).

5.14 Auswertung, Nutzungspotentiale

Beide Datensysteme können für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden, es gibt zahlreiche Anwendungsbeispiele mit Luftbilddaten. Ein Vorteil der digitalen Kameradaten ist die gleichzeitige Verfügbarkeit eines hochauflösenden Oberflächenmodells, diese dritte Dimension erweitert die Analysemöglichkeiten und Modellierungspotentiale der Daten erheblich.

Die Interpretation von Luftbildern erfolgt in der Regel visuell. Die visuelle Interpretation von Bildern ist gegenüber radiometrischen Verfälschungen weitgehend unempfindlich. Deshalb können Bilddaten durch die Methoden der Bildverarbeitung so aufbereitet werden, daß sie für den vorgesehenen Zweck möglichst gut visuell interpretierbar sind. Daß dabei mit den radiometrischen Eigenschaften der Daten recht willkürlich umgegangen wird, stellt in der Regel keinen Nachteil dar. Ganz im Gegensatz dazu sind die radiometrischen Eigenschaften bei anderen Auswerteziele von entscheidender Bedeutung. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn Bilddaten durch Multispektral-Klassifizierung ausgewertet oder aus Thermal-Bilddaten Oberflächentemperaturen hergeleitet werden sollen. Dann sind die originalen Bilddaten in radiometrischer Hinsicht sehr sorgsam zu bearbeiten. (Albertz 1991) Auf die Beschränkungen der automatisierten Auswertung von Luftbildern sei verwiesen. Luftbilder weisen Helligkeitsunterschiede im Bild auf. Aufgrund physikalischer Eigenschaften der Objektive tritt mit größer werdendem Bildfeld ein zum Bildrand hin wachsender Helligkeitsabfall auf, d.h. die Bestrahlungsstärke auf der fotografischen Schicht verringert sich von der Bildmitte zum Bildrand und vor allem zu den Bildecken hin. Dieser Erscheinung kann mit technischen Mitteln nur zum Teil entgegengewirkt werden. Deshalb verbleibt auch bei modernen Objektiven ein beträchtlicher Helligkeitsabfall. Die aufgenommenen Bilder werden deshalb (im Positiv) von der Mitte zu den Ecken hin dunkler, was bei der Interpretation beachtet werden muß (Albertz 1991). Gleiche Objekte haben somit unterschiedliche Grauwerte, abhängig davon, ob sie in der Mitte der Aufnahme oder am Rand liegen. Dies macht die Anwendung automatisierter Klassifizierungsverfahren schwierig, da diese auf dem Prinzip beruhen, daß gleiche Objekte die gleichen spektralen Eigenschaften aufweisen (Hildebrandt 1996). Durch den kleinen Öffnungswinkel der HRSC-A ist der Helligkeitsabfall zum Rand sehr gering. Im Rahmen der radiometrischen Korrektur wird dieser Fehler zusammen mit der Flat-Field-Korrektur berechnet.

5.15 Zusammenfassung und Diskussion

Der Vergleich der beiden Aufnahmesysteme zeigt zahlreiche Unterschiede in Aufnahmetechnik und Eigenschaften der Daten und ihrer Prozessierung.

Beide Systeme zeigen eine Vielfalt von Anwendungs- und Auswertungspotentialen. Bei Luftbildern überwiegt die visuelle Auswertung, Anwendung finden die Daten insbesondere im Bereich Planung und Forst (Flächennutzungskartierungen, Forstbestandsaufnahme, Biotoptypen, Waldschadenskartierungen, Aktualisierung von Kartenwerken). Die Möglichkeit einer automatisierten Auswertung der Daten ist durch eine Reihe von luftbildspezifischen Faktoren stark eingeschränkt:

- Zentralperspektivische Abbildung
- Problem des radialen Versatzes von Objekten (Seitenansicht von Objekten)
- Verschiedene Maßstäbe auf einem Foto
- Schwierige Mosaikierung
- Helligkeitsunterschiede im Bild, verschiedene Grauwerte derselben Objekte
- geringe radiometrische Auflösung
- Objekte über dem Gelände werden nicht modelliert, keine lagetreue Abbildung

Die Verfügbarkeit eines hochauflösenden Oberflächenmodells erhöht die Anwendungspalette der Daten der digitalen Kamera. Genannt seien dreidimensionale Modellierungen, Schallausbreitungsmodelle, Überschwemmungsszenarien oder Anwendungen im Bereich der Telecom.

Digitale Systeme können radiometrisch kalibriert werden, dies stellt einen großen Vorteil dar und ermöglicht eine (standardisierte) Auswertung der Daten. Eine radiometrische Kalibrierung von Luftbildern ist nicht möglich, durch fotografische Verfahren ist keine hohe Genauigkeit der radiometrischen Informationen erzielbar (chemischer Entwicklungsprozeß nicht zu vereinheitlichen oder zu normieren).

Die vollständig digitale Aufnahme ermöglicht eine automatisierte digitale Auswertung ohne Zwischenschritte (Scannen der Bilder etc.). Während die Fotografie begrenzt wird durch die enge spektrale Bandbreite von Filmen, können digitale Systeme einen großen Teil des elektromagnetischen Spektrums erfassen, sie erweisen sich durch die Aufnahmemöglichkeiten in

verschiedenen Kanälen ferner als flexibler als die im allgemeinen auf maximal drei Kanäle begrenzten Luftbilder.

Neben dem Aufnahmeprinzip ist auch die weitere Verarbeitung der Daten beider Aufnahmesysteme unterschiedlich. Hier ist insbesondere die Gewinnung der Daten der äußeren Orientierung zu nennen, also die Position und Lage des Aufnahmesystems während der Aufnahme. Im Rahmen der Luftbildauswertung wird diese indirekt mit Hilfe von identischen Punkten und Paßpunkten rekonstruiert. Bei der Prozessierung der Daten der digitalen Kamera HRSC-A kann auf die durch kombinierte GPS/INS-Systeme direkt gemessenen Daten der Äußeren Orientierung zurückgegriffen werden. Dies ermöglicht eine weitestgehend automatisierte Prozessierung, Paßpunkte sind lediglich zu Kontrollzwecken notwendig. Dieser neue Ansatz bedeutet einen tiefgreifenden Wandel in der Photogrammetrie, man spricht von einem Paradigmenwechsel.

Die mit beiden Systemen erreichten Genauigkeiten sind vergleichbar.

Mit der HRSC-A und der speziell für die Prozessierung dieser Daten entwickelten Software steht den Geoinformationssystemen erstmals ein operationelles System zur Verfügung, das vollständig digital und vollautomatisch hochauflösende Orthobilddaten produziert. Für Anwendungen, die sich mit Objekten oberhalb der Erdoberfläche beschäftigen, sind die HRSC Daten durch die Einbeziehung der Geländehöhe besser geeignet, da Objekte lagertreu wiedergegeben werden.

Tabellarischer Vergleich Luftbild und digitale Kamera HRSC-A

Tab. 15: Technische Parameter

	Luftbild	HRSC
Sensorsystem	Kamera (Reihenmeßkammer), Filter, Film	Photodetektoren (Halbleiter)
Speichermedium	Foto/Film	externes Speichermedium (Magnetband)
Optik	Objektiv	Objektiv
Filter	S/w-Aufnahmen: Gelb-, Orange- oder Rotfilter Infrarot-Aufnahmen: starke Rot- oder Infrarotfilter Farbaufnahmen: farblose Filter Color-Infrarot-Aufnahmen: Gelb- oder Orangefilter	Keine Filter zur Verbesserung der Aufnahme
Spektralkanäle	3 (bei Farbaufnahme) 1 (bei s/w Aufnahme)	4
Aufnahmeplattform	Flugzeug	Flugzeug
Übliche Flughöhe	300 – 7500 m	1000 -10 000 m
Belichtungszeit	1/500 bis 1/1000 s (Belichtungszyklus (RMK): min. 1,6 bis 2 s)	Integrationszeit von 1/460 s (bei AX/AXW 1/2000 s)
Öffnungswinkel	50-75° (Normalwinkelkammer) 75-100° (Weitwinkelkammer) 30° (Schmalwinkelkammer)	11,8°
Brennweite	Normal f = 305 mm Weitwinkel f= 153 mm	f = 175 mm

Tab. 16: Aufnahmeprinzip

	Luftbild	HRSC
Verfahren	Passiv	Passiv
Aufnahmeprinzip	Einzelbilder (Reihenbilder) Belichtung im Bruchteil einer Sekunde	Bildstreifen fortlaufende zeilenweise Aufzeichnung (jede Zeile räumlich und zeitlich verschieden)
	Aufnahme in allen „Kanälen“ zeitgleich (durch Lamellen oder rotierende Scheiben:	Aufnahme in den fünf (neun) Kanälen zu unterschiedlichen Zeiten und aus unterschiedlichen

	Belichtungszeit bei 1/1000 sec) Blickwinkel gleich	Positionen, Zeitverzug für die Aufnahme eines Objektes zwischen vor- und rückblickendem Kanal: ca. 30 sec
	Momentaufnahme	Zeitlich versetzte Momentaufnahmen, Bewegung von Objekten wird in den neun verschiedenen Kanälen fixiert
Bildgröße	Einzelbildgröße einheitlich 23 * 23 cm ²	Bildstreifenlänge nahezu beliebig, Streifenbreite abhängig von der Flughöhe (bei 3000 m Flughöhe 622 m)
Datenmenge	23 cm x 23 cm 1GB (pro Kanal, mit 7 µm gescannt) bei Maßstab 1:40 000 \cong 85 km ² , 11MB/ km ² 3-20 min Scandauer/Bild	24 cm Auflösung, Flughöhe 6000m, Fluggeschwindigkeit 70m/s: 17 MB pro km ²
Maßstabsbereiche	sehr große Maßstäbe (> 1: 500)	sehr große Maßstäbe (> 1: 500)
Bildüberlappungen	Bildüberlappung von 60% (x) in Flugrichtung (Möglichkeit stereoskopischer Auswertung) und 20-30% (y) mit benachbartem Bild (Sicherstellung der vollständigen Abdeckung des Gebietes, Flugbewegungen)	Bildüberlappung von 5(9) x 100% (Aufnahme desselben Ausschnitts mit verschiedenen Blickwinkeln) Streifenüberlappung von 30-50% (Sicherheitsüberlappung aufgrund Flugzeugrollbewegungen)
Aufnahmezeit	Abhängig von Aufgabenstellung	Abhängig von Aufgabenstellung
Anforderungen an Flugbedingungen	Tageslicht und Wolkenfreiheit	Tageslicht und Wolkenfreiheit bzw. geschlossene hohe Wolkendecke Zeitfenster größer

Tab. 17: Auflösung

	Luftbild	HRSC
spektrale Sensibilität	Orthochromat. Film 0,35 - 0,6 µm Infrarotfilm (s/w) 0,4 - 0,9 µm Colorinfrarotfilm grün 0,4 - 0,6 µm rot 0,4 - 0,7 µm infrarot 0,4 - 0,9 µm Panchromat. s/w Film 0,4 - 0,75 µm Panchromat. Farbfilm	Vier Farbfilter zur Trennung der Strahlung in verschiedene Spektralbereiche (Kanäle) Fünf clear-Filter für Stereo/Photometrie/Nadir Blau 0,395 - 0,485 µm Grün 0,485 - 0,575 µm Rot 0,730 - 0,770 µm Infrarot 0,925 - 1,015 µm Nadir 0,585 - 0,765 µm

	blau 0,35 - 0,5 μm grün 0,45 - 0,6 μm rot 0,45 - 0,7 μm	
radiometrische Auflösung	6 bit (auf 8 bit gestreckt bei gescanntem Luftbild)	8 bit (von 10 bit reduziert)
räumliche Auflösung	Flughöhe 2500 m ca. 12 - 32 cm (f=153 mm)	Flughöhe 2500 m 10 cm

Tab. 18: Eigenschaften der Daten

	Luftbild	HRSC
Primärprodukt	Fotografie	digitale Daten auf Band
Aufnahmeprinzip	Speicherung der aufgenommenen Energie als latentes Bild auf unentwickeltem Film	zeilenweise Speicherung der aufgenommenen Energie als elektrischer Impuls CCD - bestehen aus Ketten von Kondensatoren und erzeugen durch Belichtung Ladung Halbleiter-Bildsensoren
Projektion	Zentralprojektion (Objektpunkte, die über der Bezugsfläche liegen, werden vom Bildnadirpunkt (Mittelpunkt) radial nach außen versetzt; darunter liegende nach innen, vertikale Objekte (z.B. Bäume) konvergieren deshalb stets zur Bildmitte hin	Mischprojektion aus paralleler (in Flugrichtung) und zentraler Projektion (senkrecht zur Flugrichtung), höher gelegene Punkte werden senkrecht zur Flugrichtung nach außen versetzt Verzerrung des IFOV (Abstand der äußeren Pixel größer)
Radiometrische Eigenschaften (Rauschen)	Eine grobe Kornstruktur führt zu höherer radiometrischer Empfindlichkeit. Hohe Empfindlichkeit bedingt die Verwendung von Filmen mit grober Kornstruktur (= geringere geometrische Auflösung)	Hohe radiometrische Auflösung zu Lasten geringerer geometrischer Auflösung (z.B. durch Erhöhung der Integrationszeiten)
Genauigkeiten Lage Höhe	± 5 cm (2500 m Flughöhe) $\pm 7,5$ cm (2500 m Flughöhe) RMK, f = 153 mm	$\pm 12-15$ cm (2500 m Flughöhe) $\pm 15-20$ cm (2500 m Flughöhe)
Orthobildgrundlage	DGM (gängige Praxis)	DOM
Belichtungsspielraum	gering, 1/1000 s üblich,	Elektronische Verstärkung und/oder Erhöhung der Integrationszeit
Erkennbarkeit von Objekten im Schatten	Schatten dunkel bis tiefschwarz (je nach Film), keine Erkennbarkeit von Objekten	Schattenbereiche differenziert grau, Objekte erkennbar

Tab. 19: Verarbeitung der Daten

	Luftbild	HRSC
Bestimmung der äußeren Orientierung	<p>Hauptaufgabe der klassischen Photogrammetrie: Berechnung der Position und Lage des Kamerasystems :</p> <p>Indirekte Bestimmung durch Rekonstruktion der Strahlenbündel über die Bilddaten (über identische Punkte, Paßpunkte)</p> <p>Pro Bild eine äußere Orientierung</p>	<p>Direkte Messung von Position und Lage mit Hilfe von kombinierten GPS/INS-Systemen, keine Paßpunkte erforderlich (nur zu Kontrollzwecken)</p> <p>Jede Zeile hat eine eigene äußere Orientierung</p>
Verarbeitung	<p>Filmentwicklung, Kopieren, Bildverbesserung,</p> <p>Ergebnisse: Ortholuftbilder, Fotografische Bilder - Negative, Positive, Diapositive</p>	<p>Bandauslesen, Demultiplexen, radiometrische Kalibration, geometrische Vorkorrektur, Punktbestimmung und DOM-Generierung, Orthobilderstellung, Mosaiking</p> <p>Ergebnisse: Digitale Orthobilder, digitale Geländemodelle</p>
Auswertung	<p>Luftbildinterpretation und -messung, stereoskopische Auswertung, topographische und thematische Kartierungen, visuelle Interpretation mit Hilfe von Interpretationsschlüsseln</p>	<p>visuell, digitale Bildauswertungsverfahren (Textur, multispektral etc)</p>

6 Digitale Daten als Grundlage für die Kartenerstellung

Orthobildkarten haben in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Sie sind wertvolle zeitnahe Hilfsmittel für Planung, Orientierung und Kartennachführung und stellen – je nach Aufgabenstellung – ein schnelles Zwischenprodukt bis zur Nachführung von topographischen Karten oder Endprodukte innerhalb der Nachführungszyklen dar. Dies ist insbesondere in städtischen Bereichen mit großer Dynamik von Interesse. Der Bedarf aktueller Geobasisdaten macht Orthobilder besonders für Geoinformationssysteme interessant.

Bisher standen als Basisdaten für Orthobildkarten großer Auflösung ($> 1:10\,000$) lediglich Luftbilder zur Verfügung. Zunehmend werden diese analogen Daten abgelöst durch digitale Daten, die von neuartigen flugzeuggetragenen Kamerasystemen aufgenommen werden. Neben diesen extrem hochauflösenden Daten ($\leq 10\text{ cm}$) wird eine neue Generation von Satellitenbildern mit Pixel-Auflösungen von weniger als einem Meter die Möglichkeiten der Orthobildkarten-Erstellung erheblich erweitern.

In diesem Kapitel wird die Eignung der neuen digitalen Daten der vom DLR Adlershof entwickelten digitalen Kamera HRSC-A (High Resolution Stereo Camera - Airborne) für die Erstellung von Orthobildkarten und verwandten Produkten untersucht. Diese Kamera ist das erste operationell verfügbare System. Untersucht wurde die Einsetzbarkeit digitaler Daten für die operationelle Erstellung von Orthobildkarten und zur Aktualisierung von Karten.

Die digitalen Datenprodukte bieten eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber den analogen Luftbildern, ein Vergleich beider Systeme soll dies zeigen, ferner wird die nötige Auflösung von Daten für verschiedene Maßstäbe diskutiert. Anschließend wird die Herstellung einer Orthobildkarte mit digitalen Daten am Beispiel des Kartenblatts 423 C Berlin-Tiergarten beschrieben und bewertet. In einem Ausblick geht es um die Potentiale der neuen Technik zur Kartenerstellung und weitergehende Anwendungen.

6.1 Die Bedeutung von Orthobildkarten

Unter Orthobildkarten versteht man mit Rand, Koordinatengitter, Beschriftungen, Symbolen und ggf. auch Höhenschichtlinien versehene Bildkarten aus Orthobildern (Hildebrandt 1996). Orthobilder entstehen durch eine Differenzialentzerrung von Luftbildern, durch diesen Prozeß werden die durch das Relief verursachten Lagefehler eliminiert, das Bild weist geometrisch die Eigenschaften einer Karte auf (Albertz 1991).

Orthobildkarten sind seit Ende der 60er Jahre in vielfältiger Weise in der Praxis eingeführt und haben sich in zahlreichen Anwendungsgebieten bewährt. Nachfolgend eine Übersicht der Anwendungen in verschiedenen Ländern:

- als landesweites Kartenwerk, z. B. in Schweden mit der Ökonomische Karte 1:10 000 und 1:20000, in Österreich die Luftbildkarte 1:10 000, in Deutschland die Deutsche Grundkarte 1:5000 z. B. im Bundesland Nordrhein-Westfalen;
- als Grundlage für die Fortführung topographischer Kartenwerke und auch der o.a. Deutschen Grundkarte;
- als Mittel, Lücken in bestehenden oder im (langwierigen) Aufbau begriffenen topographischen Karten rasch zu füllen;
- als Forstbetriebskarte 1:10 000 in zahlreichen öffentlichen und privaten Forstbetrieben in Deutschland und Österreich oder auch bis 1:25 000 in Ländern mit weniger intensiver Waldbewirtschaftung (z. B. in Nordamerika);
- als Landnutzungs- und Planungskarte, besonders in Entwicklungsländern und dort auch als (vorläufige) Katasterkarten;
- als Ergänzung zu Katasterkarten im Hinblick auf die aktuelle Nutzungsart der Parzellen;
- zunehmende Bedeutung als aktuelle Geobasisdaten für GIS (Hildebrandt 1996, Kerner 1997).

Orthobildkarten lassen - in Abhängigkeit von ihrem Maßstab - eine Fülle von Landschaftsdetails erkennen und erlauben die Interpretation von Zusammenhängen sowie zahlreicher qualitativer und quantitativer Sachverhalte, ferner die zeitnahe Analyse von Ereignissen (Überflutung etc.). Die hauptsächliche Anwendung von Orthobildkarten liegt zwischen den Maßstäben 1:2000 und 1:25000, der Detailreichtum übertrifft den vergleichbarer topographischer Karten, der Bildinhalt

bleibt dennoch leicht interpretierbar (Albertz 1991). Bei größeren Maßstäben ist kaum noch ein Gewinn an zusätzlich wichtiger topographischer Information zu verzeichnen (Ausnahme: Kataster, Stadtopographie, Erfassung von Verkehrswegen). Bei kleineren Maßstäben ist die Lesbarkeit bedeutender linearer Objekte (z.B. Wasserläufe, Verkehrswege) in Frage gestellt; die Orthobilder bekommen Übersichtscharakter, geben aber noch viele wichtige flächenhafte und thematische Informationen (Landnutzungen, Formzusammenhänge sowie geologische Strukturen) wieder (Hake & Grünreich 1994).

Im Gegensatz zu Strich- und Signaturkarten und auch zu farbig angelegten thematischen Karten ist der Inhalt der Orthobildkarte weder generalisiert noch selektiert. Sie enthält daher für bestimmte Anwendungszwecke auch unwichtige, ggf. sogar störende Details oder hebt Wichtiges nicht besonders heraus (ein ausführlicher Vergleich von Luftbild und Karte findet sich bei Albertz 1991). Dem Vorteil der Informationsfülle steht dies unter den Gesichtspunkten der Kartennutzung als Nachteil gegenüber (Hildebrandt 1996). Problematisch ist ferner die Gewährleistung einer von Karten zu fordernden graphischen Logik, z.B. der Grundsatz, daß Gleiches gleich darzustellen ist. Diese Bedingung erfüllen Orthobilder nicht. Hier führen zusätzliche kartographische Gestaltungsmittel zu eindeutigen Aussagen:

Ergänzen durch Darstellung von Objekten, die im Orthobild nicht sichtbar sind (Objekte verdeckt, zu klein oder abstrakt)

Erläutern durch Namen und Abkürzungen

Verdeutlichen nicht gut identifizierbarer Objekte durch Nachzeichnen der Kontur, durch Signaturen oder durch Farbdecker

Klassifizieren durch graphisches Vereinheitlichen und Betonen, z.B. beim Verkehrsnetz (Hake & Grünreich 1994). Die Situationsdarstellung der Orthobildkarte erfüllt geometrisch die für topographische und thematische Karten geforderten Genauigkeiten und deren inhaltlichen Anforderungen (Hake & Grünreich 1994).

Aufgrund des hohen Grades von Anschaulichkeit, der Menge der entnehmbaren Informationen sowie der schnellen und wirtschaftlichen Herstellung regt Witt bereits 1979 eine Diskussion über die mögliche Ablösung der klassischen Strichkarten zugunsten von Bildkarten an.

Orthobildkarten erweisen sich in der Praxis als gut interpretierbare Informationsquellen für vielfältige Anwendungsgebiete. Ihre Vorteile in bezug auf Inhalt und Herstellung zeigen sich vor allem dort, wo Strichkarten noch nicht vorliegen oder der Aktualitätsgrad vorhandener Strichkarten nicht ausreichend ist, aber auch als Lieferant aktueller Geobasisdaten für GIS. Erheblich gesteigert werden kann dieser Informationsgewinn durch eine Kombination von Rasterbild und kartographischen Gestaltungsmitteln (Signaturen, Linien etc.).

6.2 Anforderungen an die Eingangsdaten: Genauigkeiten und nötige räumliche Auflösungen für die Kartenproduktion in verschiedenen Maßstäben

Als Basisdaten für die Erstellung von Orthobildkarten dienten bisher ausschließlich analoge Luftbilder. Die verfügbaren Satellitenbilddaten waren aufgrund der geringen räumlichen Auflösung und geometrischer Probleme als Grundlage für Orthobildkarten großer Maßstäbe nicht geeignet. Als Maßstabsgrenze für Satellitenbildkarten galt bisher 1:25 000 mit Daten des Aufnahmesystems IRS1 C (geometrische Auflösung 6 m) (Konecny 1999). Die Operationalität und geometrische Genauigkeit der neuen Generation von hochauflösenden Satellitenbilddaten (1999 gelungener Start von IKONOS mit einer Auflösung von knapp einem (panchromatisch) und vier Metern (multispektral)) muß noch untersucht werden. Tests der Universität Hannover zeigen, daß Bildkarten im Maßstab von 1:5000 mit dieser Auflösung realisiert werden können (Konecny 1999).

Die größtmögliche Lagegenauigkeit eines Kartenpunktes ist identisch mit der Kartier- und Zeichengenauigkeit. Für diese gilt als Standardabweichung etwa $s = \pm 0.15 \text{ mm}$. Dies ergibt in der Natur $s_L = \pm 0.15 m_K / 1000 \text{ [m]}$ (m_K = Maßstabszahl). Danach erhält man für die Maßstäbe 1:5000, 1:25 000 und 1:100 000 die Werte $s_L = \pm 0,8 \text{ m}$, $3,8 \text{ m}$ bzw. 15 m . Die tatsächlichen Lagefehler betragen jedoch oftmals das Mehrfache dieser Werte, bei kleiner werdendem Maßstab ist dies vor allem durch die Wirkungen der Generalisierung begründet (Hake & Grünreich 1994). Für die deutsche Grundkarte 1:5000 soll der mittlere Lagefehler für eindeutig nach der Karte

identifizierbare Punkte den Betrag $s_L = \pm 3$ m nicht überschreiten. Für die amtlichen deutschen Kartenwerke kleinerer Maßstäbe gibt es keine entsprechenden Forderungen (Hake & Grünreich 1994).

Mit einer absoluten Lagegenauigkeit von +/- einem Pixel (15 cm) übertreffen die HRSC-A-Daten diese Genauigkeitsanforderung um ein Vielfaches. Die Daten mit einer Auflösung von 15 cm eignen sich für sehr große Maßstäbe (siehe Tabelle 20).

Tab. 20: Pixelauflösungen und mögliche Maßstäbe und der jeweilige maximale Lagefehler

Pixelauflösung	Möglicher Maßstab	Max. Lagefehler
15 cm	1:1000 (1:500)	$\pm 0,16$ m
30 cm	1:2500	$\pm 0,4$ m
60 cm	1:5000	$\pm 0,8$ m
1 m	1:10 000	$\pm 1,6$ m

Die Bestimmung von Maßstabsbereichen und -grenzen für verschiedene Auflösungen kann nur bedingt rechnerisch gelöst werden, da die Auflösung von verschiedenen Parametern abhängig ist. Das Auflösungsvermögen allein entscheidet nicht über die Erkennbarkeit von Objekten, erheblichen Einfluß haben die Form und der Kontrast gegenüber der Umgebung. So können bei hohem Kontrast und auffallender geometrischer Form auch Objekte noch erkannt werden, deren Größe unter der Auflösung des Instruments liegen. Zur Einschätzung der umsetzbaren Maßstäbe mit den Daten der digitalen Kamera wurden daher umfangreiche visuelle Tests gemacht. Eingang fanden verschiedene Pixelauflösungen und die Simulation verschiedener Maßstäbe. Diese Modellierungen geben einen sehr guten Eindruck über die Verwendbarkeit in den verschiedenen Maßstäben.

Die Abbildungen 26 bis 35 zeigen die Daten in unterschiedlichen Maßstäben und Pixelgrößen. Diese Beispiele aus zwei Befliegungen (Berlin und das holländische Nijmegen) bilden eine ländliche Region und städtische Strukturen ab und geben einen Eindruck über Auflösungen und Maßstäbe. Diese Tests mit verschiedenen Auflösungen zeigen, daß eine Bodenpixelauflösung von 15 cm lediglich für die Herstellung sehr großmaßstäblicher Karten erforderlich ist, als Grenze kann hier der Maßstab 1:500 festgehalten werden. Interpretierbar sind Maßstäbe bis zum Maßstab 1:250, die Abbildungen machen anschaulich, wo die Grenzen der Auflösung liegen.

Für den Maßstab 1:5000 ist eine Bodenpixelauflösung von 60 cm ausreichend, die Detailerkennbarkeit ist hier noch vollständig gegeben. Bei einer Auflösung von einem Meter sind die Pixelstrukturen bereits erkennbar, diese Daten eignen sich nur für kleinere Maßstäbe, die Erstellung von Karten im Maßstab 1:10 000 wäre ohne Zweifel möglich. Beim Maßstab 1:2500 ist die Verwendung von 30 cm Daten empfehlenswert, brauchbar ist auch noch eine Auflösung von 60-cm-Daten. Beim Maßstabsbeispiel 1:1000 wird deutlich, daß die Bodenpixelauflösung mindestens 30 cm betragen sollte, eine höhere Interpretierbarkeit sichern 15-cm Daten.

Karten des Maßstabs 1:500 erfordern eine Bodenpixelauflösung von 15 cm, wobei auch die Daten mit 30 cm eine große Detailfülle aufweisen, dasselbe gilt für den Maßstab 1:250. Hier sind Details auf Häuserdächern noch klar erkennbar. Aus Vollständigkeitsgründen wurde auch der sehr große Maßstab 1:100 in die Simulation verschiedener Maßstäbe aufgenommen. Die Pixelstruktur wird hier bereits erkennbar. Bemerkenswert ist aber die immer noch große Interpretierbarkeit der Daten, Häuserkanten können noch klar unterschieden werden.

Verschiedene Maßstäbe in verschiedenen Auflösungen
- Nijmegen -

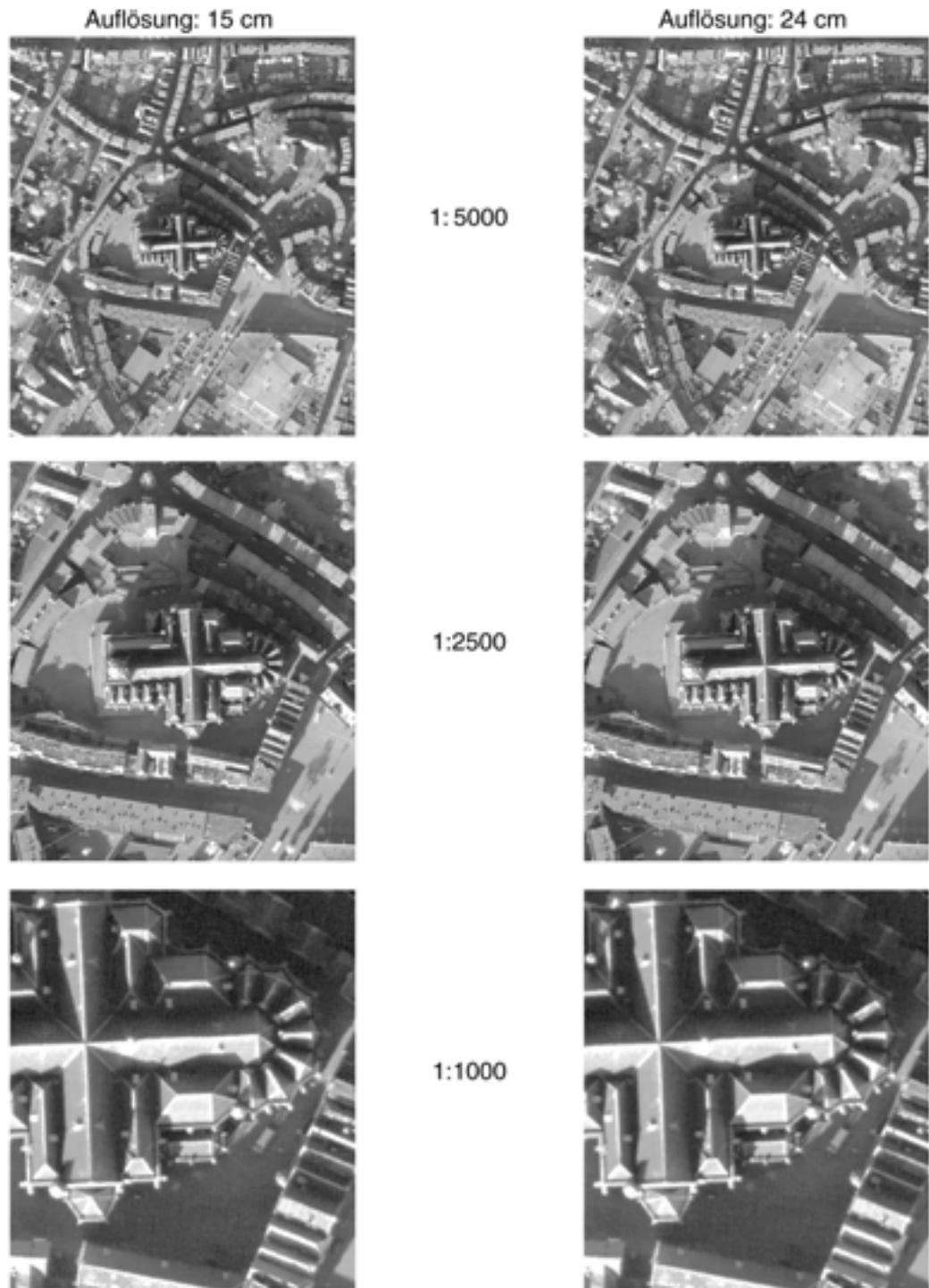


Abb. 26: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 1000 bis 1: 5000, Auflösungen 15 und 24 cm

Verschiedene Maßstäbe in verschiedenen Auflösungen
- Nijmegen -

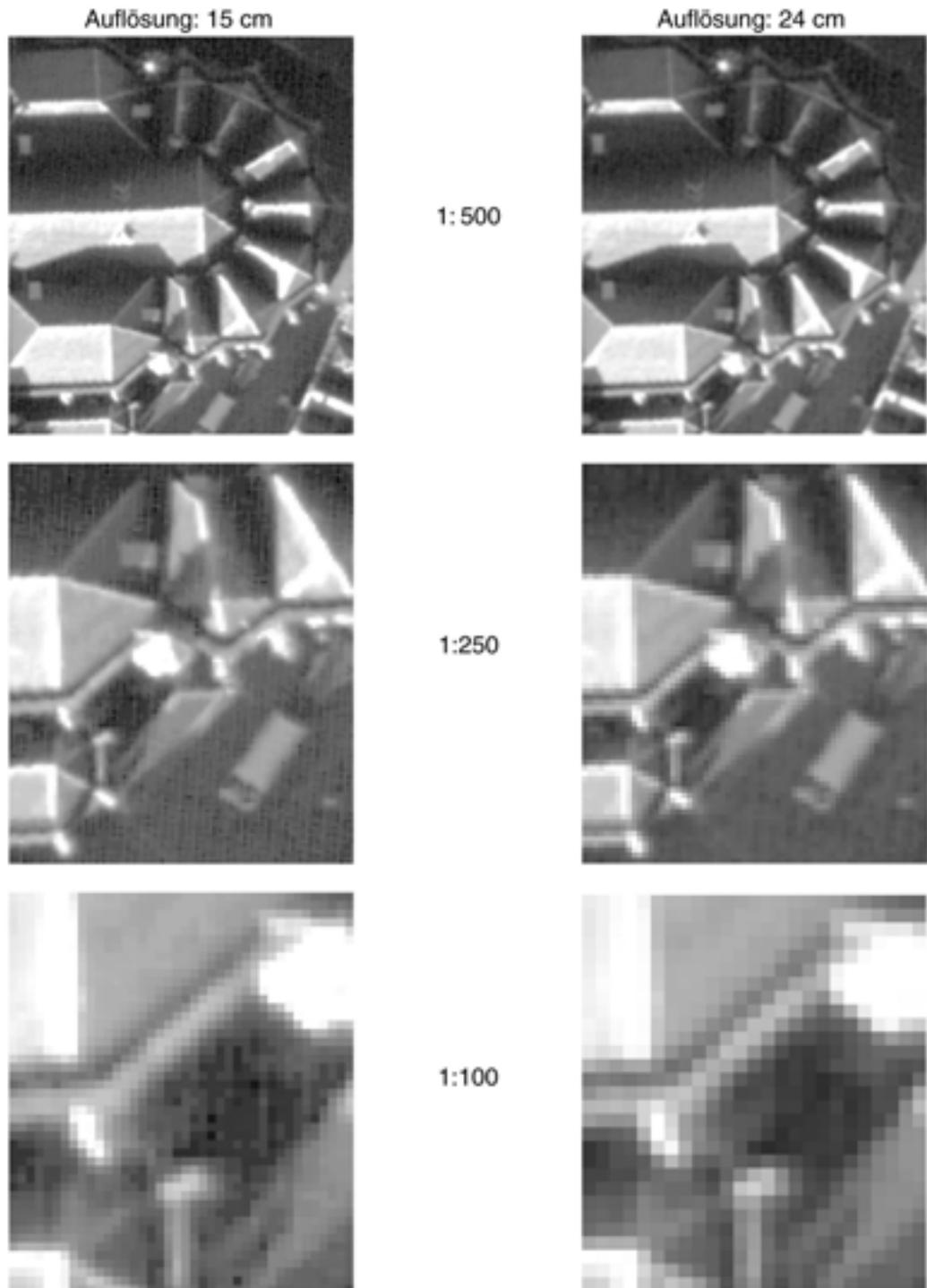


Abb. 27: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 500 bis 1: 100, Auflösungen 15 und 24 cm

Verschiedene Maßstäbe in verschiedenen Auflösungen
- Nijmegen -

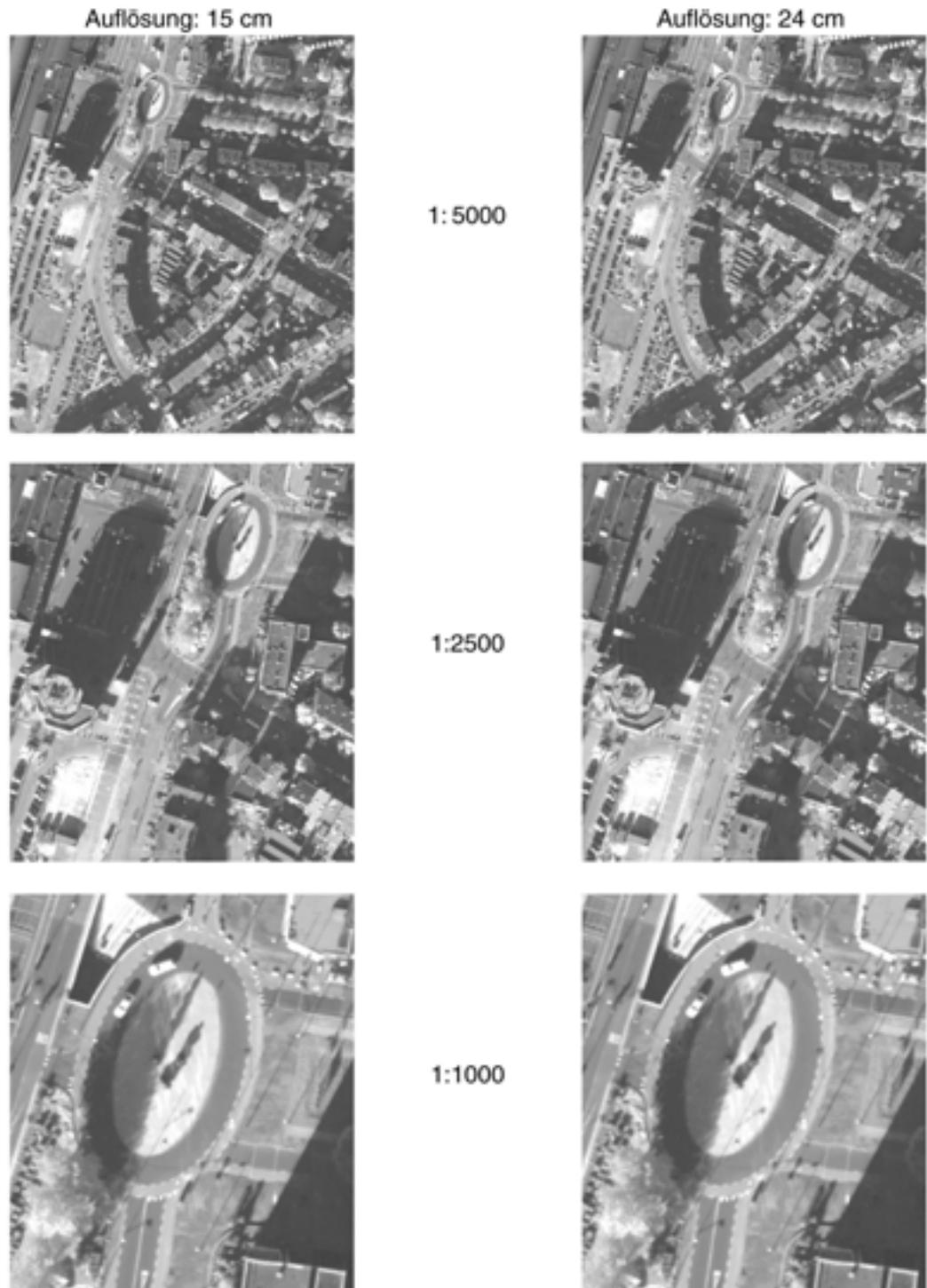


Abb. 28: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 5000 bis 1: 1000, Auflösungen 15 und 24 cm

Verschiedene Maßstäbe in verschiedenen Auflösungen
- Nijmegen -

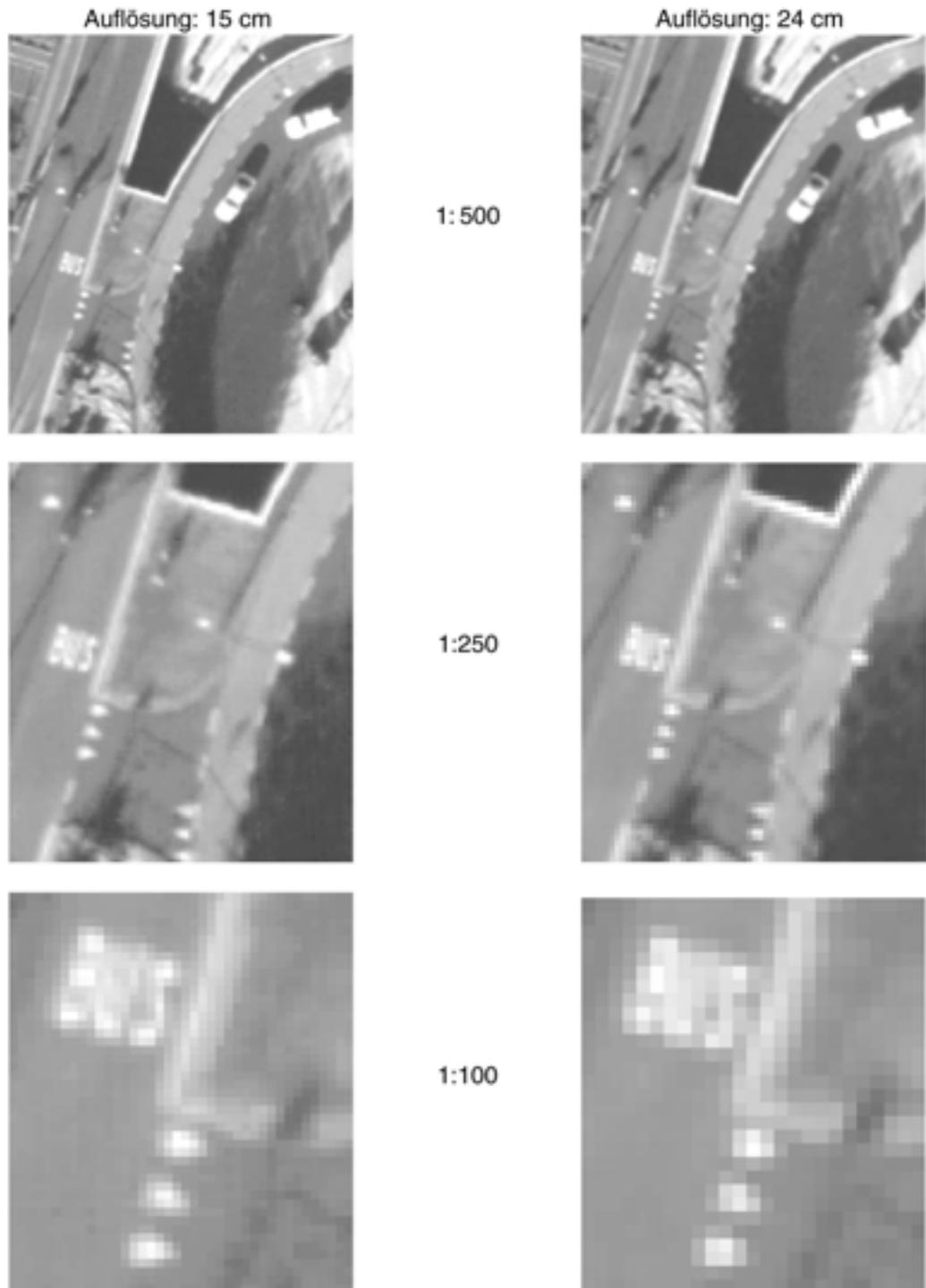


Abb. 29: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 500 bis 1: 100, Auflösungen 15 und 24 cm

Verschiedene Maßstäbe in verschiedenen Auflösungen
- Nijmegen -

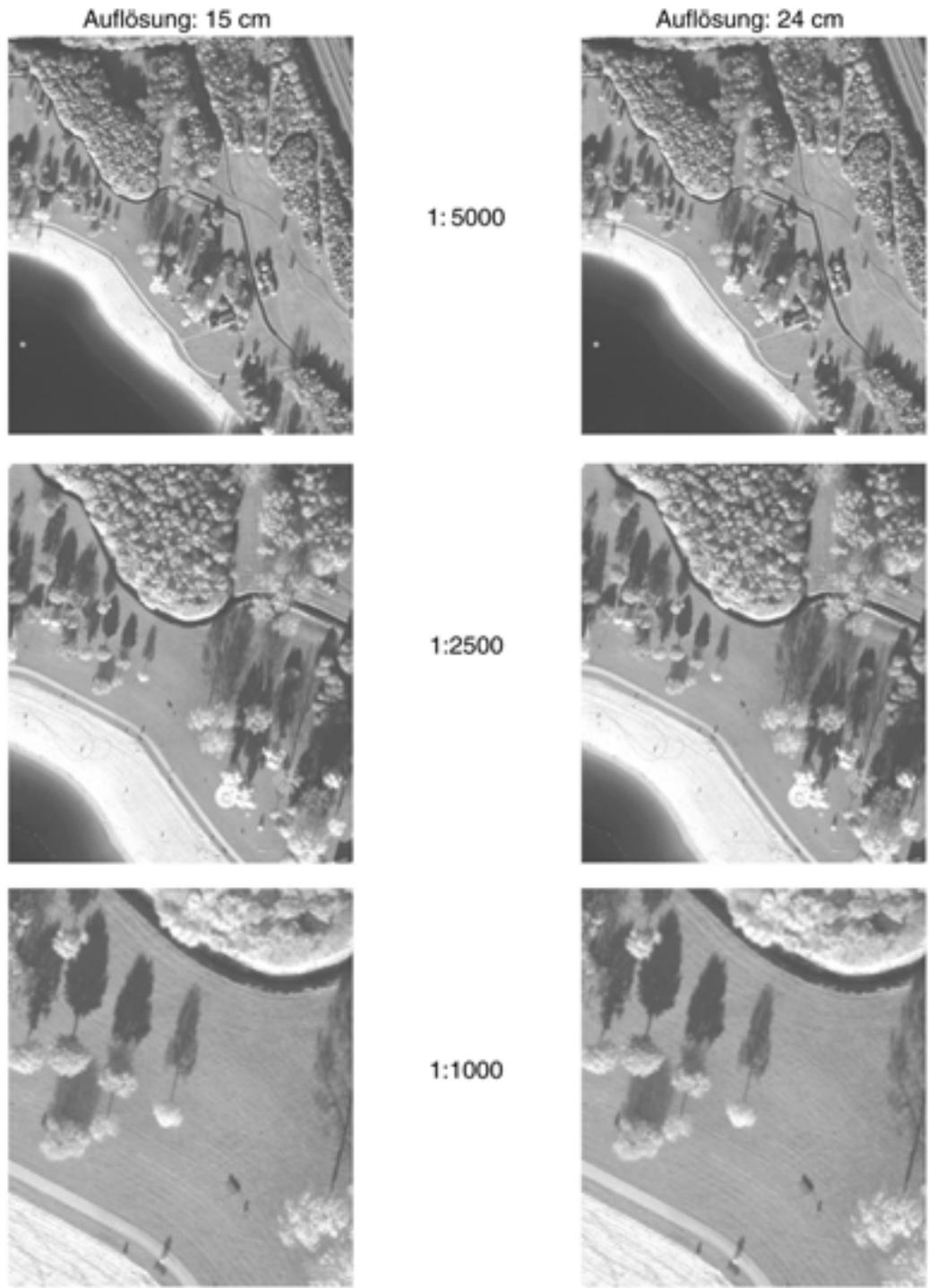


Abb. 30: Simulation verschiedener Maßstäbe im ländlichen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 1000 bis 1: 5000, Auflösungen 15 und 24 cm

Verschiedene Maßstäbe in verschiedenen Auflösungen
- Nijmegen -

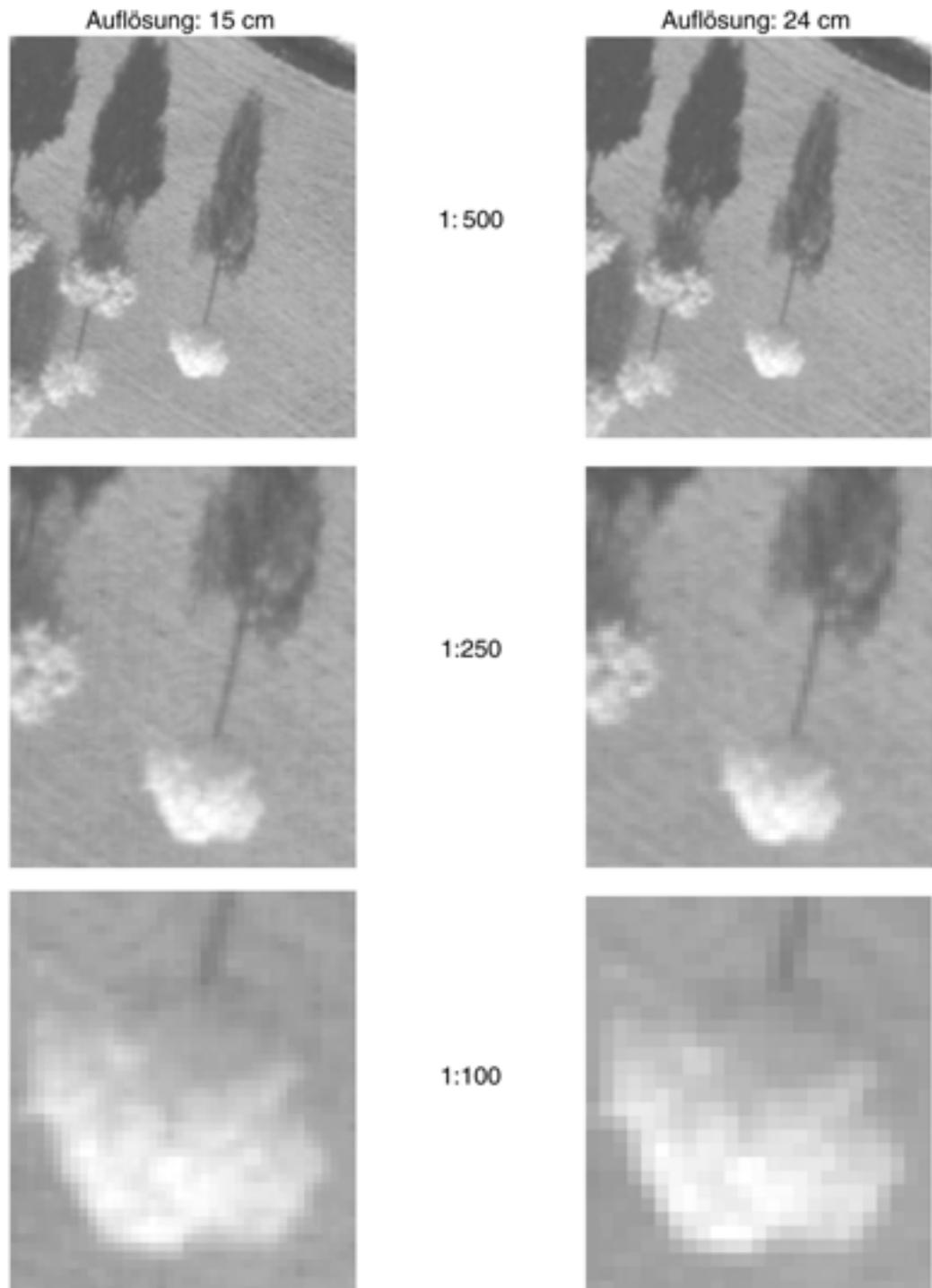


Abb. 31: Simulation verschiedener Maßstäbe im ländlichen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 500 bis 1: 100, Auflösungen 15 und 24 cm

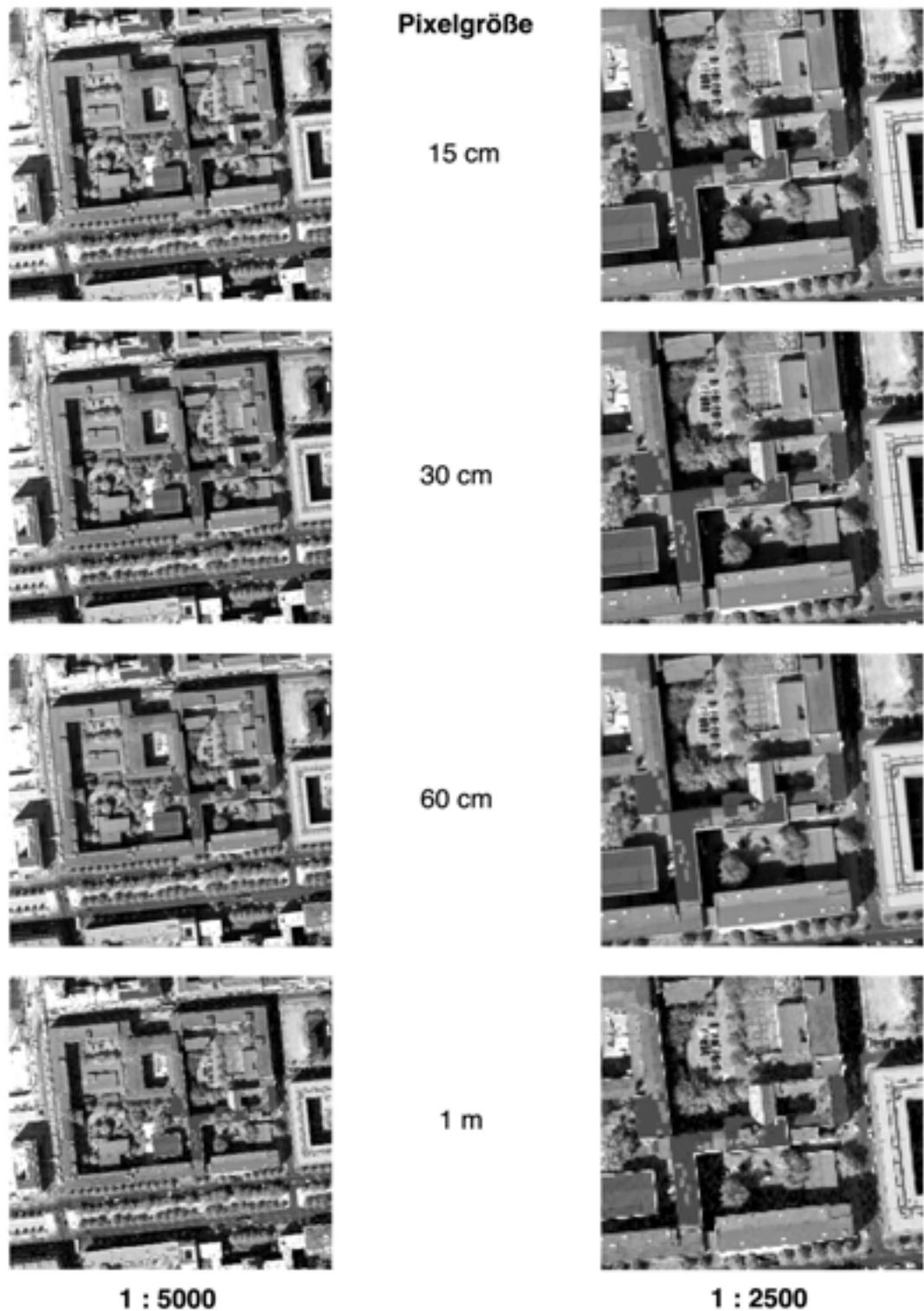


Abb. 32: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Berlin) mit den Maßstäben 1: 5000 und 1: 2500, Auflösungen von 15 Zentimetern bis zu einem Meter.

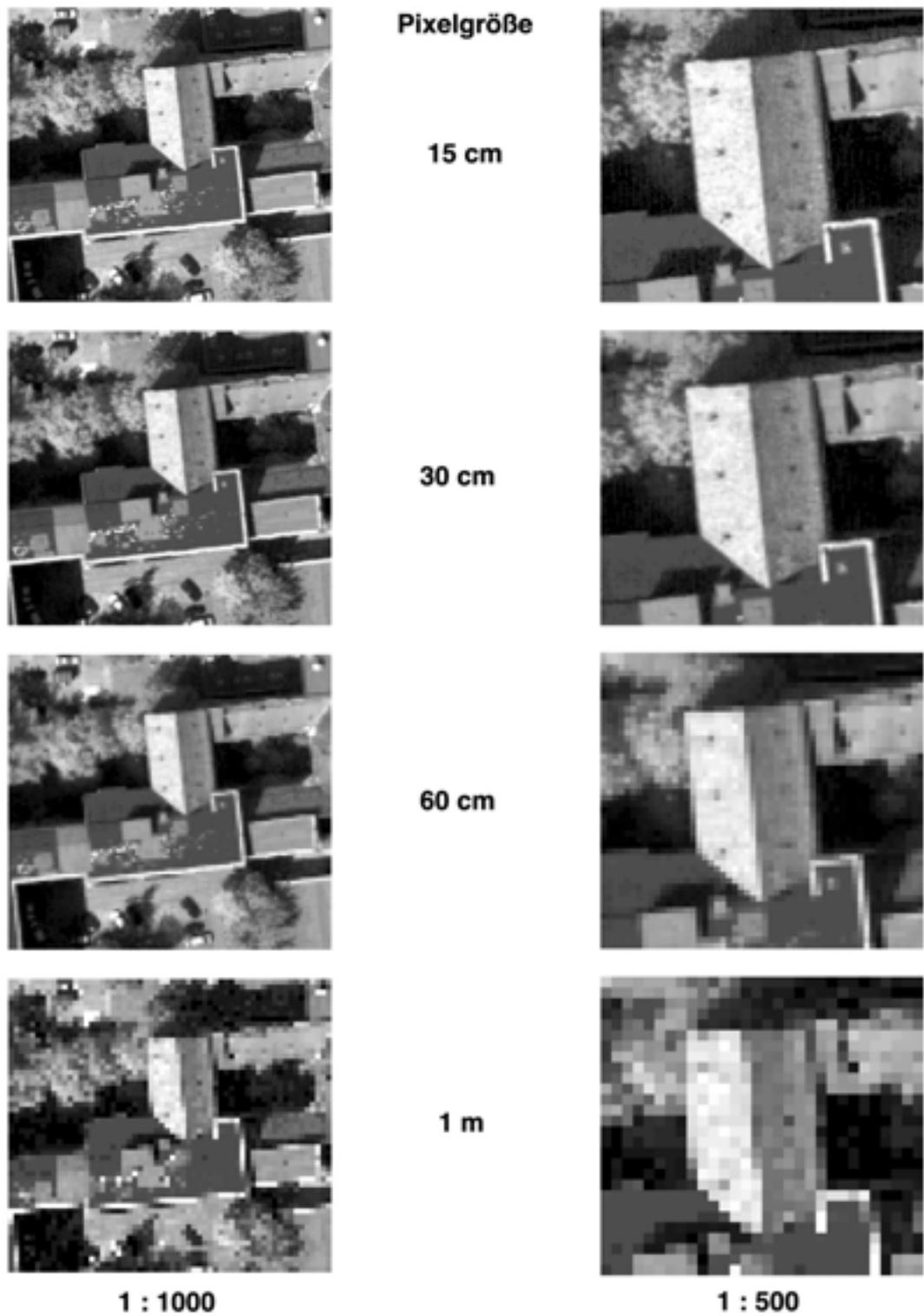


Abb. 33: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Berlin) mit den Maßstäben 1: 1000 und 1: 500, Auflösungen zwischen 15 Zentimeter und einem Meter.

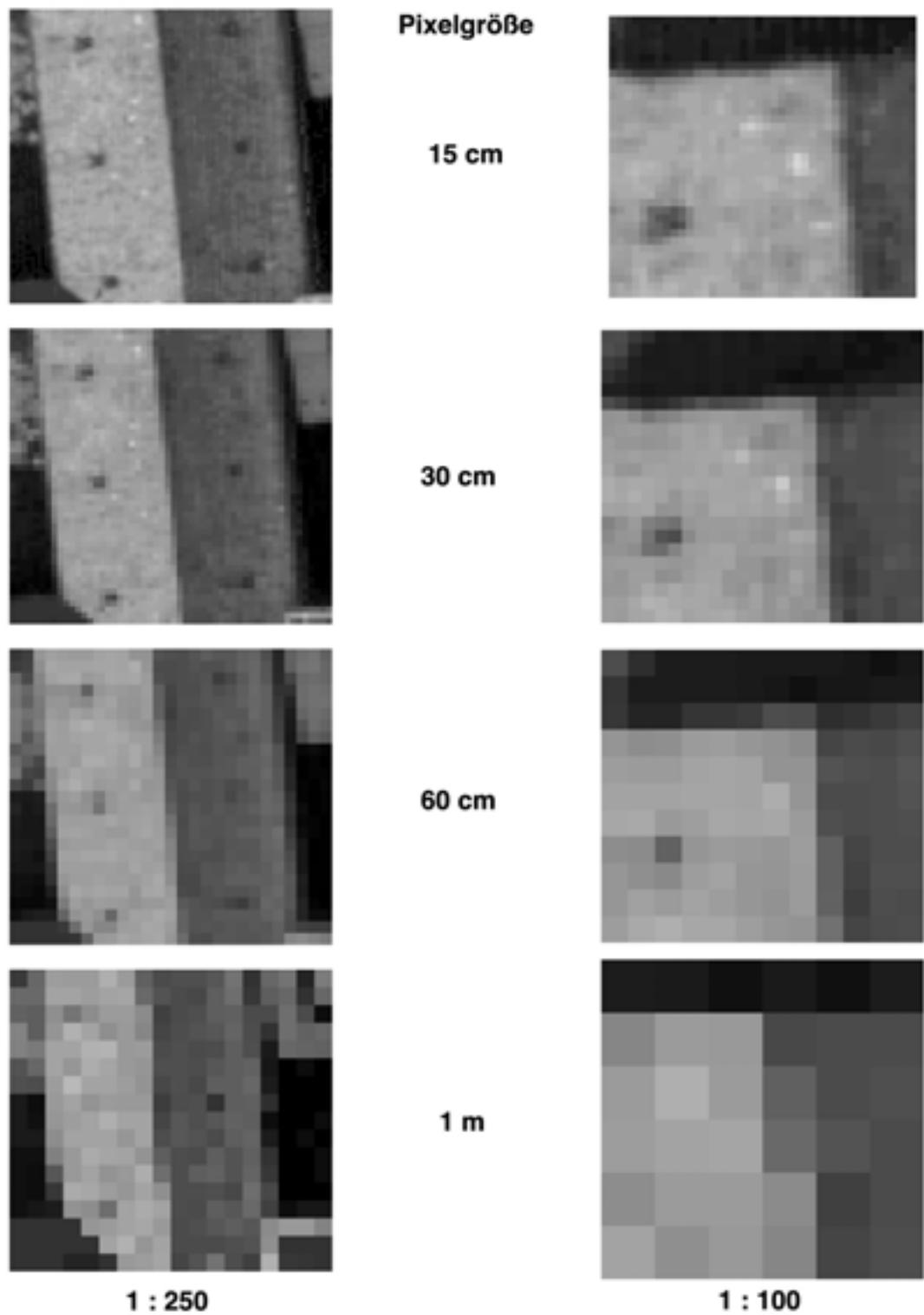


Abb. 34: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Berlin) mit den Maßstäben 1: 250 und 1: 100, Auflösungen zwischen 15 Zentimetern und einem Meter.

6.3 Die Orthobildkarte Berlin

6.4 Datenaufnahme für das Kartenblatt 423C

Die Daten, die die Grundlage bilden für die Orthobildkarte im Maßstab 1:5000, Kartenblatt Berlin 423C, wurden im Rahmen einer HRSC-A-Flugkampagne am 14. Mai 1998 aus einer Flughöhe von 3000 m aufgenommen. Prozessierung und Mosaikierung der neun Flugstreifen erfolgten vollautomatisch (siehe Abb. 36). Die Kartenfläche deckt ein Gebiet von 3200 Meter mal 2400 Meter in der Natur ab. Die räumliche Auflösung beträgt 15 cm, das Oberflächenmodell wurde in einer Auflösung von einem Meter in x/y-Richtung gerechnet, die Höhenstufen (z) betragen 10 cm. Die Daten wurden in der für Berlin typischen Soldner-Cassini-Projektion prozessiert, Bezugsellipsoid ist Bessel, Datum Potsdam. Die mittlere absolute Lage-Genauigkeit der Bilddaten beträgt $\pm 10\text{-}15$ cm. Paßpunkt-Kontrollmessungen zeigten maximale Abweichungen von der Soll-Lage von ± 1 Pixel (1 Pixel = 15 cm). Die mittlere absolute Höhengenaugigkeit beträgt $\pm 20\text{-}30$ cm. Diese Genauigkeiten wurden mittels signalisierter Punkte, die von Hand vermessen wurden, ermittelt.

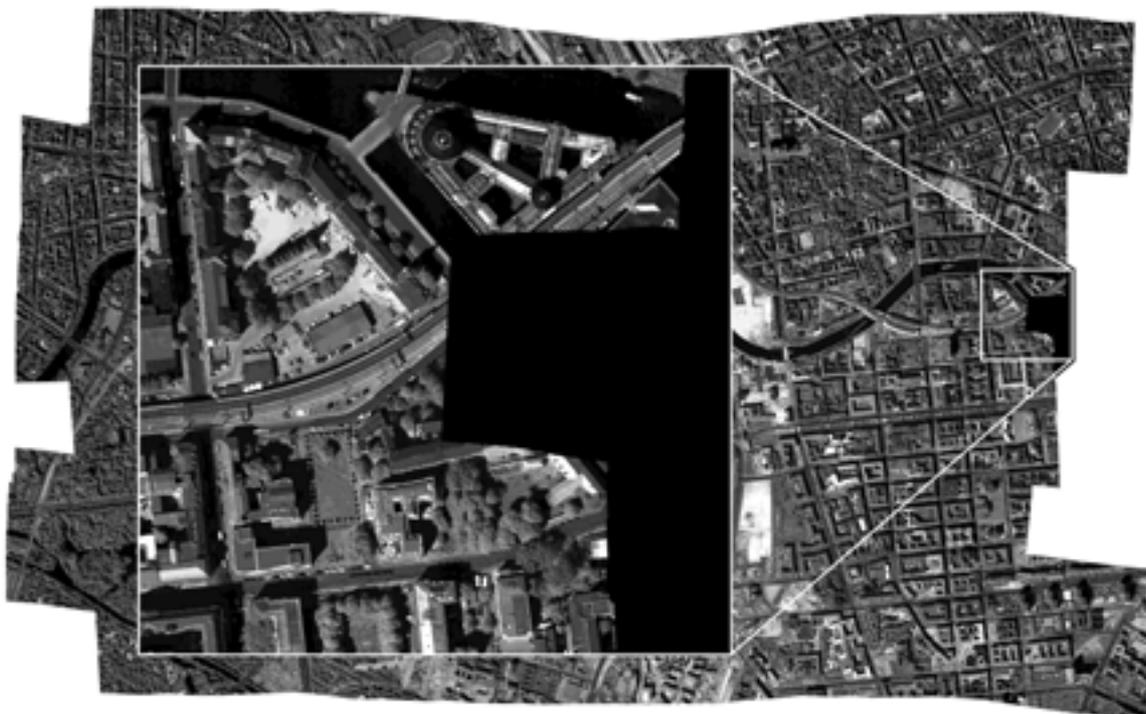


Abb. 35: Mosaik aus neun Flugstreifen



Abb. 36: Luftbildkarte 1:5000, Blatt 423 C

6.5 Luftbildbefliegungen und -archiv

Die Senatsverwaltung für Bauen, Wohnen und Verkehr, Abteilung V – Vermessungswesen führt ein Luftbildarchiv für den Bereich Vermessungswesen. Seit 1954 finden regelmäßig im Abstand von fünf Jahren Bildflüge mit Schwarzweiß-Aufnahmen statt, ferner liegen Infrarot-Falschfarbenaufnahmen vor. In den Jahren 1997 und 1998 sind für Berlin flächendeckend Luftbilder im Bildmaßstab 1:5000 aufgenommen worden. Für den Zeitraum von 1928 bis 1953 liegen historische Aufnahmen und Luftbildkarten vor.

Die „Luftbildkarte für Berlin 1:5000“ liegt in 77 Einzelblättern ausschließlich für den Ostteil der Stadt und in den Übergangsbereichen (wie beim Testdatenblatt 423C, Bereich Tiergarten) vor. Grundlage für die Herstellung dieser Luftbildkarten ist eine Befliegung aus dem Jahr 1992. Nach der Wiedervereinigung sollten möglichst schnell Daten aus dem Ostteil der Stadt verfügbar sein. Die Luftbildkarte von Berlin, Blatt 423C, wurde im Jahre 1993 von der Senatsverwaltung für Bau- und Wohnungswesen herausgegeben, sie hat als Grundlage eine Luftbildbefliegung vom 23. und 24. Mai 1992 (Anlage). Ferner liegt eine Überblickskarte für Berlin im Maßstab 1:50 000 vor, der Bildflug für diese Karte fand 1995 statt.

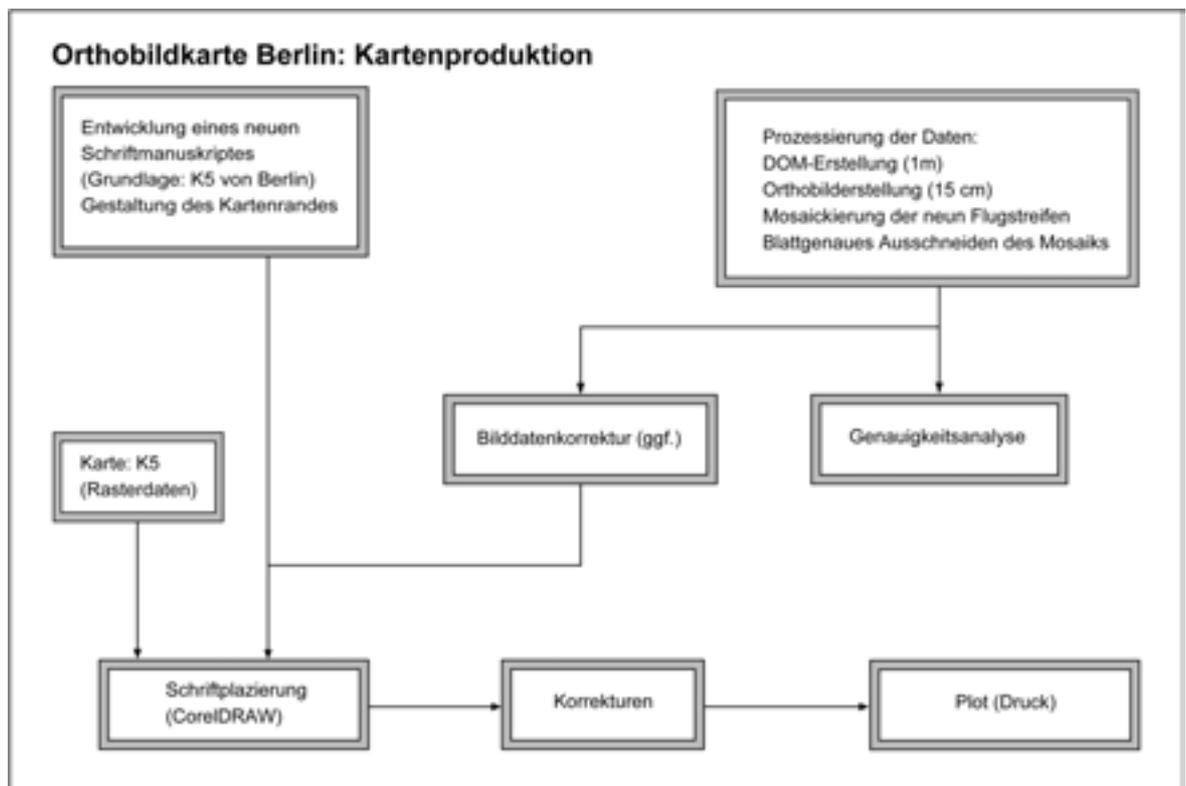


Abb. 37: Schematische Darstellung der Kartenproduktion

6.6 Der Ablauf der Kartenproduktion

Erstellung des Schriftmanuskriptes

Als zeitintensivster Teil der Orthokartenherstellung erwies sich die Entwicklung eines Schriftmanuskriptes. Die 1993 erschienene Luftbildkarte konnte nicht als Vorlage genutzt werden, sie erwies sich in Bezug auf Schriftgestaltung/Plazierung als ungeeignet. Es wurde ein neues Schriftmanuskript gestaltet, das sich an die Schriften der K5 anlehnt, aber stark vereinfacht ist. So wurde beispielsweise bei der Beschriftung von Straßen auf weitere Unterteilungen verzichtet, alle Straßenzüge erhielten ungeachtet ihrer Größe/Bedeutung eine Beschriftung gleicher Schriftart und -größe. Ebenso wurde auf die Unterscheidung und Klassifizierung verschiedener Gebäudetypen verzichtet.

Die Schrift einer Bildkarte hat im Unterschied zur topographischen Karte einen mehr unterstützenden Charakter, die Textinformation tritt zugunsten der Bildinformation in den Hintergrund. Grundsätzlich ist eine weitere Reduzierung der Straßenbeschriftung und eine stärkere Hervorhebung von Häusern und eine Überlagerung mit Vektorinformation zu überlegen.

Mit der Entwicklung eines Schriftmanuskriptes für die Kartengestaltung und einheitlichen Regeln zur Beschriftung des Orthobildes ist die Grundlage für eine Serienproduktion von Kartenblättern gegeben. Die Ergebnisse des Pilotdatenblattes 423C können somit auf die weitere Erstellung von Orthobildkarten übertragen werden. Abbildung 38 zeigt schematisch den Ablauf der Kartenerstellung.

Schriftplatzierung

Die Bearbeitung der Karte erfolgte mit dem PC-Softwarepaket Corel Draw. Als Rasterbild wurde ein Datensatz mit lediglich 60 cm Auflösung verwendet (Größe: 10 MB). Dies erwies sich als guter Kompromiß: Einerseits sind die Objekte noch gut erkennbar, andererseits belastet diese Datengröße den Arbeitsspeicher des Computers nur wenig. Bei der Verwendung der Daten in Originalauflösung muß bei jeder Verschiebung des Bildausschnittes auf den erneuten Bildaufbau gewartet werden. Für die spätere Ausgabe der Datei als Druck wird dann der höher auflösende Datensatz verwendet.

Als Hilfe bei der Schriftplatzierung erwies sich die Hinterlegung der digitalen Daten der K5. Diese gab einen guten Anhalt für die Lage von Straßen und deren Anfang und Ende und machte den aufwendigen Arbeitsgang der Schriftplatzierung verlässlicher und zeitsparender. Als schwierig gestaltete sich die Beschriftung von Gebäuden mit hellem Dach, hier ist die weiße Schrift oft nur schwer lesbar, alternativ könnte farbige Schrift eingesetzt werden.

Randgestaltung

Die Kartenrandgestaltung orientiert sich an der K10. Der Rand enthält Titellei, Koordinatenangaben, eine Überblickskarte über die Lage des abgebildeten Ausschnitts, Erläuterungen zum Bezugssystem, Maßstabsleiste, Hinweise zum Copyright und zum Herausgeber. Ergänzend wurde eine kurze Beschreibung des Kamerasystems aufgenommen, um dem Kartenbenutzer die Neuartigkeit des Datentyps und des Kamerasystems zu vermitteln.

Erstellung von flächendeckenden Orthobildkarten für Berlin, Maßstab 1:5000

Um das gesamte Gebiet Berlins mit Orthobildkarten im Maßstab 1:5000 abzubilden, wären 147 Kartenblätter zu gestalten. Die Tabelle 21 zeigt die anfallenden Datenmengen. In diesem Zusammenhang sei auf die Möglichkeit verwiesen, Daten zu komprimieren und somit den Speicherbedarf und die Verarbeitungszeit zu reduzieren. Mit modernen Wavelet-Komprimierungsverfahren lassen sich nahezu verlustfrei Datensätze auf Bruchteile der Originalgröße reduzieren.

Tab. 21: Abschätzung der Datenmengen bei verschiedenen Pixelgrößen, Maßstab 1:5000

Bodenpixelgröße	1 Blatt, s/w	1 Blatt, Farbe	147 Blatt, s/w	147 Blatt, Farbe
15 cm	341 MB	1,2 GB	50 GB	150 GB
30 cm	85 MB	255 MB	12 GB	36 GB
60 cm	10 MB	30 MB	1,5 GB	4,5 GB

6.7 Visueller Vergleich der beiden Orthobildkarten

Ein erster Blick auf die beiden Kartenendprodukte zeigt eine erheblich bessere Interpretierbarkeit des digitalen Datensatzes (bessere Kontraste, Helligkeit, Schärfe) im Vergleich zu der Orthobildkarte aus Luftbildern (Aufnahmemmaßstab 1:5000).

Deutlich wird in dem Bildprodukt die geringe radiometrische Auflösung der Luftbilddaten, das Bild erscheint dunkel, sehr grob kontrastiert (geringer Grauwertumfang), die Schattenbereiche sind tief schwarz, Objekte sind schwer erkennbar, das Bild ist praktisch nicht interpretierbar. Die Schrift ist nur schwer lesbar.

Ferner scheint die Grenze der Auflösung bereits überschritten, die Objekte wirken unscharf abgebildet und verschwommen. Einschränkend für die Interpretation der Daten ist ferner die Schrägansicht auf Gebäude in einigen Regionen des Bildes.

Die Daten für die vorliegende analoge Luftbildkarte wurden im Mai 1992 geflogen, die Karte wurde 1993 herausgegeben. Diese lange Produktionszeit hängt zusammen mit der Orthobildgenerierung und erscheint insbesondere für Bereiche mit großer Dynamik als zu lang.

Das Vorliegen von Farbinformationen erleichtert die Interpretation der Daten erheblich, dies würde auch zu erweiterten Einsatzmöglichkeiten führen. Genannt seien in diesem Zusammenhang: Untersuchungen zur Vitalität der Bäume, Interpretation von Details z.B. im Straßeninventar, Flächennutzungsplanung, Anwendungen in der Verkehrsforschung und -lenkung etc.

6.8 Zusammenfassung

Die Daten der digitalen Kamera erweisen sich als operationell einsetzbar zur Herstellung von Orthobildkarten. Das Produkt ist anschaulich und schnell verfügbar (zeitnahes Verfahren), die Prozessierung operationell und automatisiert. Das Potential der Daten liegt in der großen geometrischen Genauigkeit und der sehr guten Erkennbarkeit von Objekten bis in große Maßstabsbereiche hinein. Ferner wird die Geländeoberfläche naturnäher und kartenähnlicher abgebildet als bei Luftbildern. Die Information aus den Orthobildkarten dient als Basis für zahlreiche neue Anwendungsbereiche, die auf aktuelle Informationen angewiesen sind, z.B. für Verkehrsplanung, Fahrzeugnavigationssysteme, GIS, Hochwasserschutz, Katastrophenprävention, Monitoring etc. und dienen als Grundlage für Planung und als Geobasisdaten im GIS-Bereich. Pilotprojekte in verschiedenen Disziplinen zeigen die Potentiale der Daten.

Die möglichen Maßstabsbereiche, die mit Daten mit einer Bodenpixelauflösung von 15 cm erreicht werden können, werden von der Orthobildkarte 1:5000 nicht ausgeschöpft, eine Auflösung von 30 cm zeigt sich als ausreichend. Mit den HRSC-A-Daten können Maßstäbe bis zu 1:500 umgesetzt werden.

Die Orthobildkarte Berlin war bisher ein Schwarz-weiß-Produkt, durch eine mehrfarbige Bildinformation könnte das Kartenbild an Anschaulichkeit und Interpretierbarkeit gewinnen. Die Daten der digitalen Kamera ermöglichen die Entwicklung einer neuen Kartenproduktpalette, z. B. die Kombination von Vektor- und Rasterdaten, 3-D-Karten, Anaglyphenkarten etc., jeweils auch in digitaler Form. Zu prüfen ist ein erweiterter Einsatz kartographischer Gestaltungsmittel, um die Bildinformation eindeutiger zu gestalten (Gleiches gleich darstellen). Denkbar ist das Einkopieren eines linienhaften klassifizierten Verkehrsnetzes zur besseren Orientierung, zusätzliche Beschriftungen und der Einsatz von Signaturen.

Die Orthobildkarte kann als schnell zu erstellendes Informationsprodukt zwischen den Nachführungen von topographischen Karten dienen, dies ist besonders wichtig in Bereichen mit großer Dynamik, in denen die Nachführungszeiträume für topographische Karten zu groß sind. Mittels der Kameradaten können ferner Informationen für die Nachführungen extrahiert werden. Dies kann zunächst visuell geschehen, angestrebt wird jedoch eine automatisierte Aktualisierung topographischer Kartenwerke.



Abb. 38: Ausschnitt aus der Orthobildkarte 423C

7 Standardverfahren der Fernerkundung

7.1 Das Testgebiet Sanssouci

Als Testgebiet für die Analyse der Anwendbarkeit von Standardverfahren der Fernerkundung diente der Park Sanssouci in Potsdam. Im Rahmen von mehreren Geländebegehungen mit Mitarbeitern der Parkverwaltung wurden Einzelbäume und das Parkgelände kartiert, um eine Referenz für die Auswertung zu haben. (Abbildungen, Liste der Baumarten des Gebietes etc. im Anhang).

Das Gebiet wurde im Rahmen einer Befliegungskampagne mit der digitalen Kamera HRSC-A am 14. Mai 1998 gegen 13 Uhr geflogen, Flughöhe war 3000 m, der Flugstreifen wurde von West nach Ost aufgenommen. Die Wettersituation war sehr gut an diesem Tag, es gab kaum Wind, die Luft war klar und dunstfrei, die Sicht war sehr gut, die Temperatur lag mittags bei 17 Grad, der Himmel war wolkenfrei. Die Daten wurden im Photometrie-Modus geflogen, die Auflösung des Nadirs lag bei 15 cm, der Farben bei 60 cm. Die verwendeten Datensätze haben eine Auflösung von 30 cm (Farbkanäle und Nadir wurden auf diese Pixelgröße gesampelt).

Zur Untersuchung wurde ein zentraler Teil des Parks ausgewählt, der sich in relativ homogene größere Einheiten aufteilt. Die bearbeitete Fläche umfaßt rund 0,43 km², das entspricht 1619 mal 2924 Pixel.

Ziel war zunächst die Unterscheidung der verschiedenen groben Klassen Wald, Busch, Wiese, Weg, Treppe, Wasser und Schatten. Angestrebt wurde ferner die Unterscheidung verschiedener Baumarten, die im visuellen Eindruck gut voneinander unterscheidbar sind.

Das Ergebnis der Analyse wird beispielhaft am Gesamtdatensatz und an zwei Beispielbäumen diskutiert (Abb. 39).

7.2 Visuelle Interpretation

Der Testdatensatz ist klar strukturiert in die sich gegen die Nachbarflächen scharf abgrenzenden Wege und Treppen. Die Wiesenflächen, die rund ein Sechstel des Datensatzes einnehmen, wirken homogen. Ein Bach, der zum Teil unterhalb der Bäume verläuft, ist nur schwer abgrenzbar.

Der größte Teil des Datensatzes ist durch Baumbestände bestimmt (ca. 80 %). Die Bäume wirken spektral gut unterscheidbar, besonders auffällig sind Blutbuchen und Winterlinden. In der CIR-Darstellung erscheinen die Bäume in den Farben von tief dunkelrot bis hellgelb in zahlreichen unterschiedlichen Tönen. Der Baumbestand ist rund 80 – 150 Jahre alt, Einzelbäume sind abgrenzbar. Ein kleiner Teil der Bäume steht allein, die Winterlinden sind in langen Reihen gepflanzt und lassen zwischen sich Boden erkennen. Nicht einzeln abgrenzbar sind Bäume in den dicht bewachsenen Bereichen, da hier die Kronen miteinander verzahnen. Der Bestand hat einen Parkcharakter mit sehr gemischt kombinierten Baumarten nebeneinander, es gibt nicht, wie in Forstgebieten üblich, Pflanzungen gleicher Baumarten. Der Boden ist nur in Ausnahmefällen zu erkennen (Ausnahme bilden die Winterlinden), die Kronen verdecken auch Teile der Wege, Wiesen und Lichtungen. Ausgedehnte Schattenbereiche machen die Interpretation der Wege in einigen Bereichen uneindeutig, ihr Verlauf läßt sich dort nur erahnen.

Der Datensatz macht insgesamt einen in klare Einheiten gegliederten Eindruck. Komplizierte Objekte wie fein strukturierte Hausdächer, Straßen etc. fehlen in dem Testgebiet.

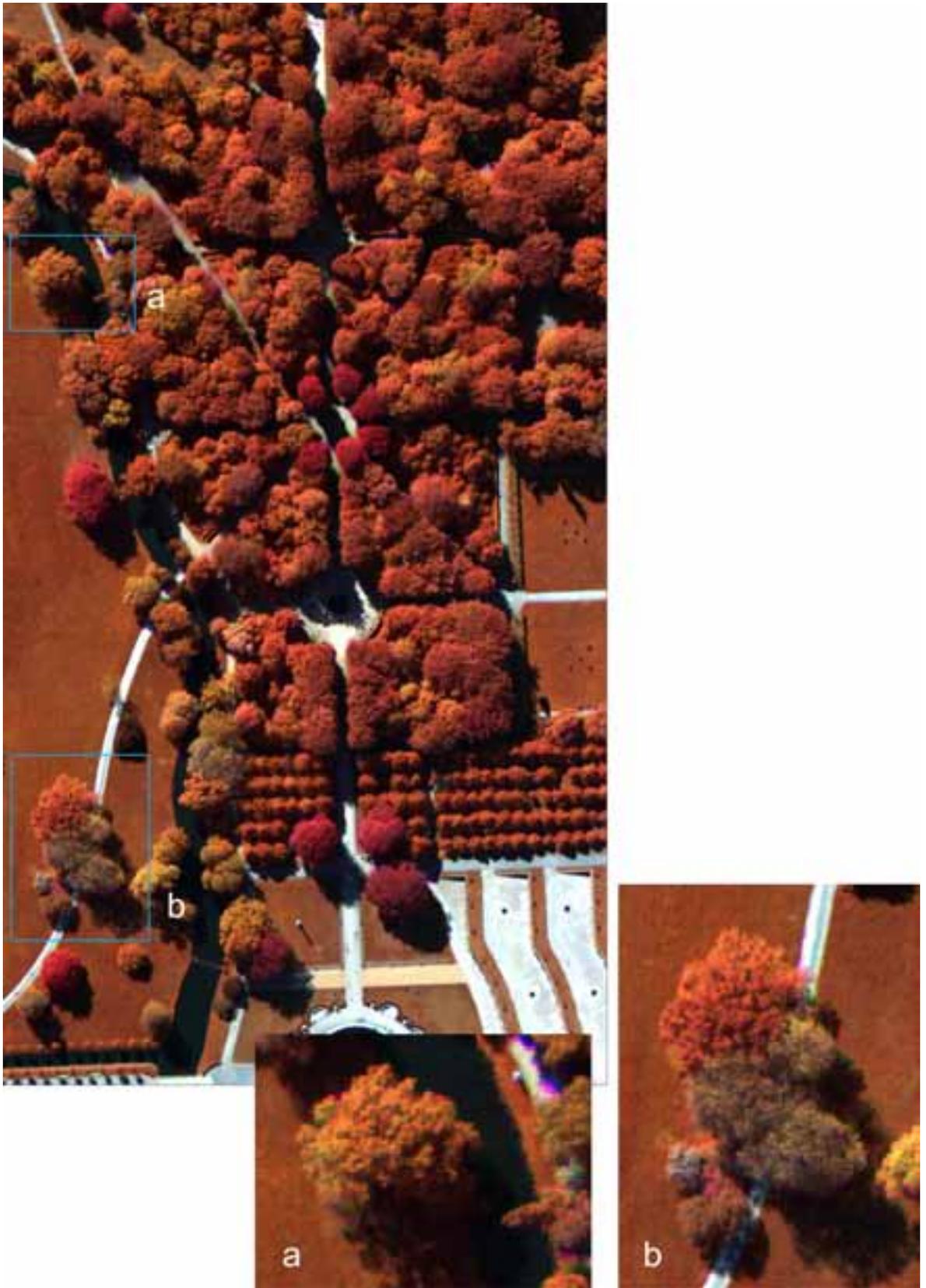


Abb. 39: Testgebiet Park Sansouci, CIR-Darstellung (Nd, BI, Gr), Einzelbäume Eiche (a), Platane/Roteiche (b)

7.3 Untersuchungsmethodik

7.3.1 Fernerkundung

Fernerkundung ist ein indirektes Meßverfahren, das die von einem Objekt reflektierte elektromagnetische Strahlung oder eine eigene Strahlungsquelle zur Informationsgewinnung nutzt. Aufnahmesystem und das zu erkundende Objekt kommen hierbei nicht in Berührung. Die Strahlung wird mittels Sensoren oder photographischen Sensoren aufgenommen, die sich in der Regel an Bord von Luft- (Flugzeugen) oder Raumfahrzeugen (Satelliten) befinden (Albertz 1991).

Fernerkundung setzt sich aus zwei Haupttätigkeiten zusammen:

- Datenerfassung
- Datenanalyse und Interpretation (Kappas 1994)

Die Datenaufnahme zielt auf die Speicherung der von der Erdoberfläche ausgehenden elektromagnetischen Reflexion mit Hilfe von Sensoren und deren Umsetzung in Bilddaten. Es entstehen Luft- oder Satellitenbilder.

Während es sich bei der Luftbildaufnahme um ein direktes photographisches Verfahren zur Bildgewinnung handelt, sind die Satellitenbilder indirekte Scanner-Aufnahmen. Im Gegensatz zur Photographie, mit der gleichzeitig ein Gesamtbild einer größeren Geländefläche gewonnen wird, beobachtet man mit einem Scanner oder Abtaster stets nur die von einem kleinen Flächenelement ausgehende Strahlung, jedes einzelne dieser Bildelemente (picture element, Pixel) repräsentiert den Durchschnittswert der aufgenommenen Fläche (z.B. 30 mal 30 Meter bei TM-Daten). Um ein größeres Gebiet aufzunehmen, müssen viele derartige Einzelbeobachtungen zusammengefügt werden. Diese Rasterdaten können anschließend digital verarbeitet werden.

Fernerkundungssysteme bestehen aus vier Hauptkomponenten:

- Strahlungsquelle
- Objekt
- Sensor
- Strahlungsweg (Kappas 1994)

Strahlungsquelle der meisten Fernerkundungssysteme ist die extraterrestrische Strahlung der Sonne. Je nach Quelle der empfangenen Strahlung wird zwischen passiven und aktiven Systemen unterschieden. Passive Systeme nutzen ausschließlich die in der Natur vorhandene elektromagnetische Strahlung. Dies kann das Sonnenlicht sein, meßbar ist aber z.B. auch die Eigenstrahlung von Körpern (Temperaturstrahlung). Aktive Systeme enthalten dagegen eine Energiequelle, die die Erdoberfläche künstlich bestrahlt. Aufgenommen wird der vom Gelände reflektierte Anteil der Strahlung (Lillesand & Kiefer 1994).

Die Zielobjekte der Fernerkundung haben die Eigenschaft, daß ihr Reflexionsvermögen variiert, dies drückt sich in der Wellenlänge aus. Wasserflächen, Wald oder bebauten Gebiete reflektieren unterschiedlich in den verschiedenen Wellenlängenbändern. Die Reflexionseigenschaften hängen vor allem von dem jeweiligen Material, seinem physikalischen Zustand (z.B. Feuchtigkeit), der Oberflächenrauigkeit und den geometrischen Verhältnissen (z.B. Einfallswinkel der Sonnenstrahlung) ab (Albertz 1991). Diese verschiedenen spektralen Eigenschaften macht man sich bei der Klassifizierung zunutze. Abb. 40 zeigt die spektralen Reflexionsgrade verschiedener Oberflächen.

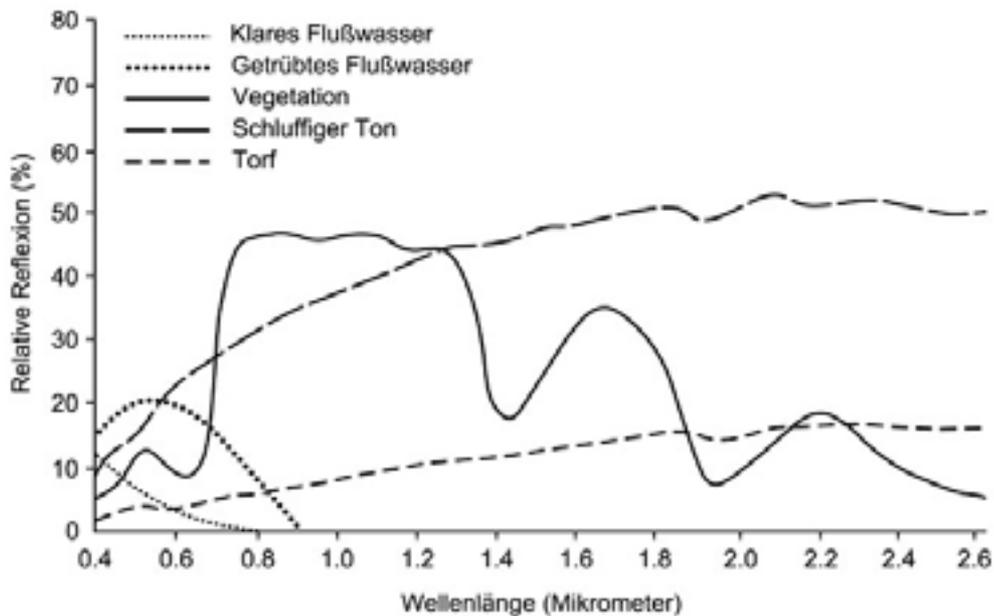


Abb. 40: Verschiedene Oberflächen zeigen verschiedene typische Reflexionseigenschaften. (Lillesand & Kiefer 1994)

Eine weitere Komponente des Fernerkundungssystems ist der Sensor. Er setzt die ankommende elektromagnetische Strahlung durch einen Empfänger in Meßsignale um und speichert sie. Es wird einerseits zwischen optisch-mechanischen und optoelektronischen Scannern unterschieden, andererseits zwischen den nur in einem Spektralbereich aufnehmenden einkanaligen und den mehrkanaligen oder multispektralen Scannern.

7.3.2 Die elektromagnetische Strahlung

Die elektromagnetische Strahlung ist eine Wellenstrahlung, d.h. ein sich periodisch änderndes elektromagnetisches Feld, das sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Gekennzeichnet wird sie durch ihre Frequenz ν , gemessen in Hertz (Hz) und ihre Wellenlänge λ , gemessen in Nano- oder Mikrometern (Nm oder μm). Die Gesamtheit der bei der elektromagnetischen Strahlung vorkommenden Wellenlängen wird als elektromagnetisches Spektrum bezeichnet.

Das elektromagnetische Spektrum wird nach der Verteilung der Wellenlängen in verschiedene Bereiche unterteilt, die ohne scharfe Grenzen ineinander übergehen und sich teilweise überlappen. Das Spektrum reicht von der extrem kurzwelligen kosmischen Strahlung über die Röntgenstrahlung und das ultraviolette Licht zum sichtbaren Licht. Nach dem sichtbaren Licht folgt die Infrarot-Strahlung, die sich in das nahe, mittlere und ferne Infrarot (Thermalstrahlung) unterteilt. Danach folgen die Mikrowellen und die Radiowellen. Die Fernerkundung benutzt nicht alle Wellenlängenbereiche, sondern nur den Teil des Spektrums zwischen dem nahen Ultraviolett und dem mittleren Infrarot und außerdem den Mikrowellenbereich (siehe Abb. 41).

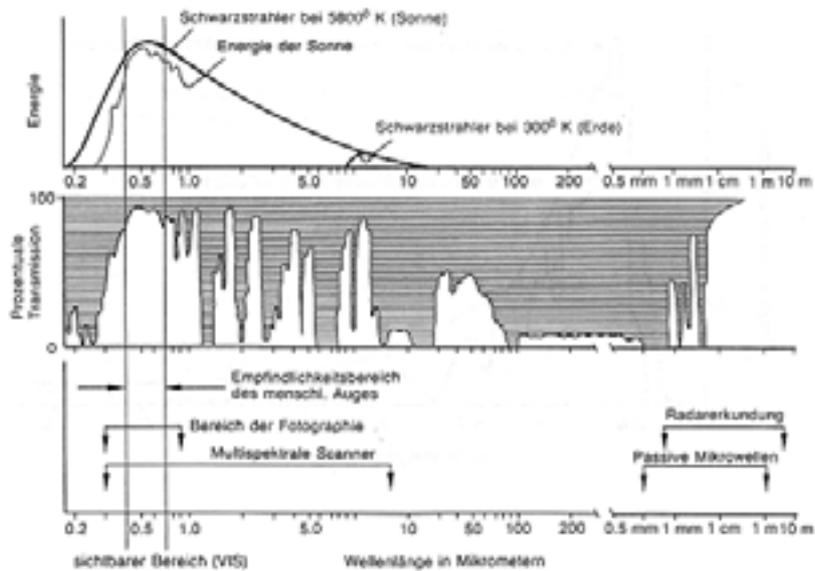


Abb. 41: Aufbau des elektromagnetischen Spektrums (Albertz 1991)

7.3.3 Auflösung von Rasterdaten

Es werden vier verschiedene Arten von Auflösung unterschieden:

- spektrale Auflösung
- räumliche Auflösung
- radiometrische Auflösung
- zeitliche Auflösung (Kappas 1994)

Die **spektrale** Auflösung sagt aus, welche Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums ein Sensor aufzeichnen kann. Unterschieden wird hier zwischen grober spektraler Auflösung (Aufzeichnung großer Intervalle) und feiner spektraler Auflösung (Aufzeichnung schmaler Intervalle) (Lillesand & Kiefer 1994).

Mit der **räumlichen** Auflösung wird die Fläche auf der Erde bezeichnet, die durch ein Pixel abgedeckt wird.

Die **radiometrische** Auflösung gibt Hinweise auf die mögliche Anzahl der Grauwertunterteilungen eines Aufnahmekanals. Bei 7-bit-Daten sind 128 Stufen möglich, bei 8-bit-Daten 256 Stufen.

Die **zeitliche** Auflösung schließlich bestimmt das zeitliche Intervall, nach dem ein Satellit erneut denselben Geländestreifen überfliegt und aufnimmt (Sabins 1997).

7.3.4 Klassifizierung

Unterschiedliche Geländeoberflächen zeigen verschiedene Reflexionseigenschaften und können so voneinander unterschieden werden. Jedes einzelne der aufgezeichneten Bildelemente oder Pixel repräsentiert bei TM-Satellitenbildern den Durchschnittswert der aufgenommenen Fläche (900 m²) in sieben verschiedenen Kanälen, diese spektralen Werte sind bei gleichen Geländeoberflächen gleich oder zumindest ähnlich. Dank dieser Eigenschaft können Rasterdaten klassifiziert werden.

Der ERDAS-Field Guide definiert den Prozeß der Klassifizierung wie folgt:

"Multispectral classification is the process of sorting pixels into a finite number of individual classes, or categories of data, based on their data file values. If a pixel satisfies a certain set of criteria, the pixel is assigned to the class that corresponds to that criteria" (ERDAS 1997).

Zwei Arten der digitalen Klassifizierung werden unterschieden:

- unüberwachte Klassifizierung (unsupervised)
- überwachte Klassifizierung (supervised)

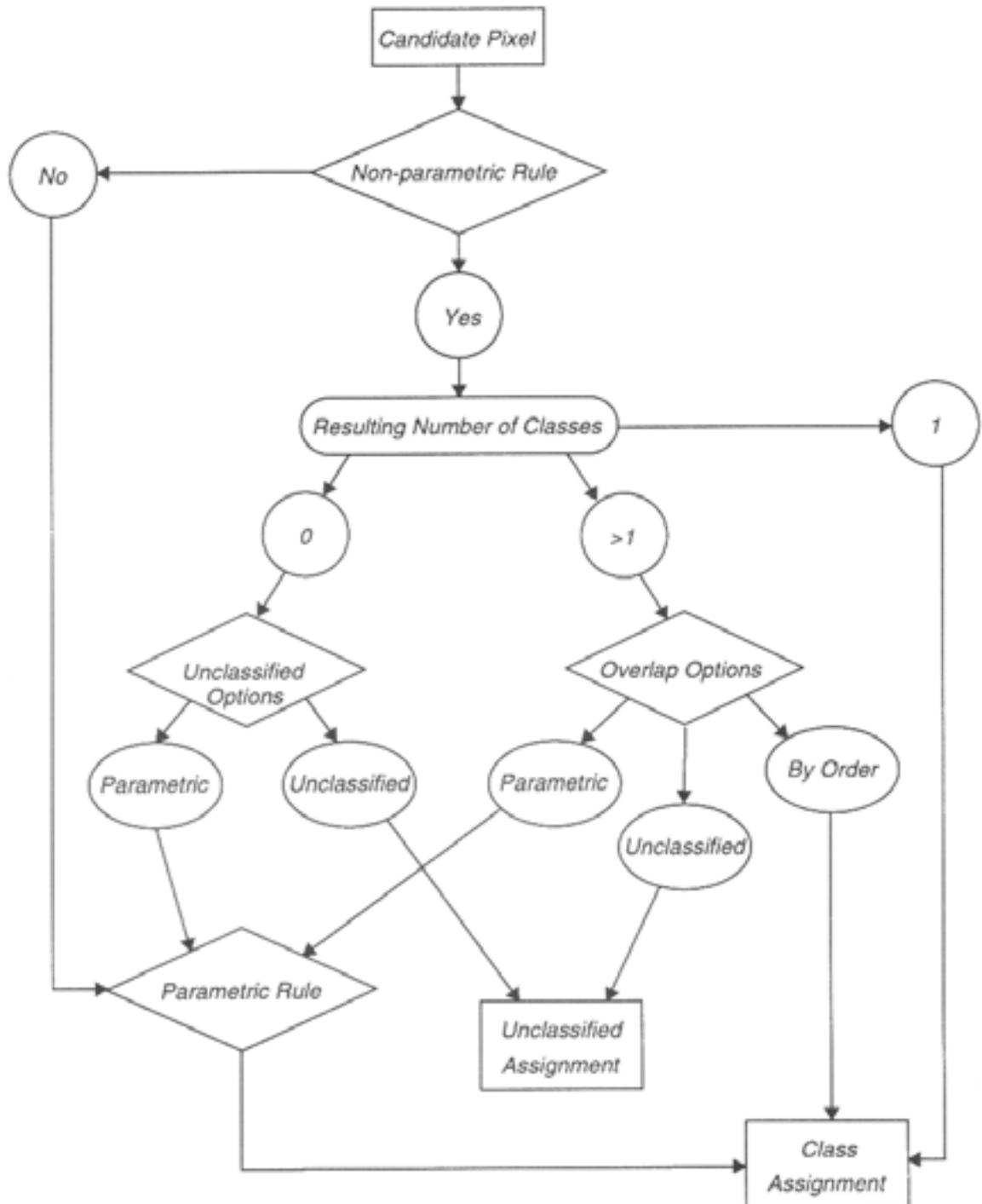


Abb. 42: Schematischer Ablauf eines unüberwachten Klassifizierungsprozesses (ERDAS 1997a)

Bei der überwachten Klassifizierung bringt der Bearbeiter Kenntnisse des zu untersuchenden Gebietes in die Bearbeitung ein. Das Gelände wird in verschiedene Merkmalsgruppen untergliedert, und es werden Trainingsgebiete gebildet, bei denen sicher ist, welcher Objektklasse sie zugehören. Diese Testgebiete, die i.a. durch Luftbilder oder Geländebegehung näher

untersucht wurden, dienen als Referenzgebiete mit einer speziellen spektralen Signatur (Bauer 1994). Ihnen werden während des Klassifizierungsprozesses Pixel mit ähnlicher Spektralsignatur zugeordnet.

Die überwachte Klassifizierung läßt sich in zwei Stufen einteilen:

- **Trainieren** (learning): Herauslesen der zu den Merkmalsgruppen gehörenden Bilddaten (Stichproben) und deren statistische Auswertung
- **Zuordnen** (classify): Zuordnung jedes Pixels zu einer Kategorie (Grunicke 1990)

Im Gegensatz hierzu beruht eine unüberwachte Klassifizierung (auch Cluster-Analyse, ISODATA-Verfahren) auf einer statistischen Analyse der Daten, Referenzdaten werden hierbei nicht eingebracht. Der Rechner gruppiert die Pixel allein aufgrund ihrer Spektralwerte in eine vom Anwender definierte Anzahl von Klassen (Erdas 1997) (Abb. 42).

Digitale Rasterdaten können per Bildverarbeitungsprogramm analysiert und bearbeitet werden. Für die vorliegende Arbeit kam das Programm ERDAS (Earth Resources Data Analysis System) IMAGINE zum Einsatz, es wurde mit der Version 8.3 bzw. 8.4 gearbeitet. Im Bereich der Bildverarbeitungssysteme und Raster-GIS ist ERDAS seit 1978 weltweit etabliert. Einsatzbereiche des Programmes sind Geographie, Geologie, Geodäsie, Kartographie und Photogrammetrie, Stadt- und Regionalplanung, Rohstoffexploration und Forstwirtschaft. ERDAS ist ein modular aufgebautes digitales Bildverarbeitungs- und ein rasterorientiertes Geographisches Informationssystem.

Zunächst wurden die Daten auf statistische Parameter untersucht, von Interesse waren die Korrelationen der einzelnen Kanäle, Grauwertverteilungen, Ratios etc. Anschließend wurde mittels überwachter und unüberwachter Klassifizierungsmethoden klassifiziert.

7.4 Statistische Verfahren

7.4.1 Korrelationsanalyse

Ein statistisches Verfahren zur Beurteilung des Informationsgehaltes von digitalen Daten ist die Durchführung einer Korrelationsanalyse. Einzelne Kanäle eines multispektralen Bildes sind häufig hoch korreliert, Untersuchungen zu diesem Thema mit Schwerpunkt auf Landsat-TM- und MSS-Daten finden sich u.a. bei Grunicke (1990, 1993), Townshend (1987) und Quiel (1985).

Diese Korrelation entsteht

- durch die spektrale Korrelation. Bei Landsat-MSS-Daten ist sie beispielsweise durch die relativ geringe Reflexion der Vegetation in den Kanälen 4 und 5 und durch die relativ hohe Reflexion in den Kanälen 6 und 7 begründet (Grunicke 1990)
- durch die topographische Neigung und Gestalt der Erdoberfläche. Der topographische Schatten ist in den HRSC-A-Daten für alle Kanäle durch die unterschiedlichen Blickwinkel verschieden und kann selbst die bildbestimmende Kontrast-Komponente in gebirgigem Gebiet und bei geringem Sonnenstand sein
- durch die Überlappung der spektralen Empfindlichkeit zwischen angrenzenden Spektralkanälen

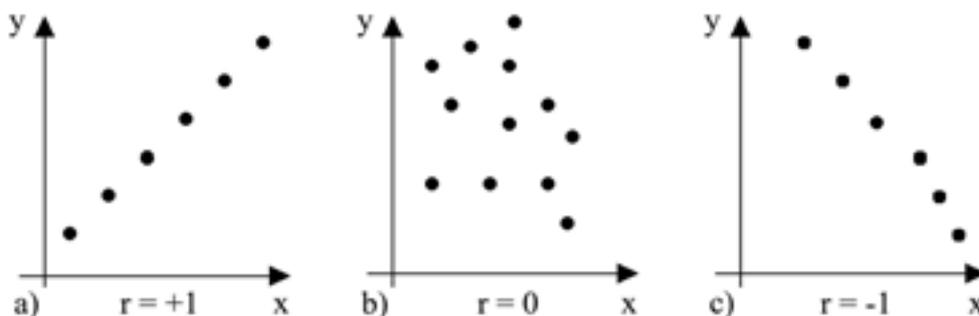


Abb. 43: Punktwolken mit unterschiedlichen Korrelationen (nach Renner 1985)

Die Korrelation deutet auf den Grad des Zusammenhangs zweier Merkmale hin. Der Korrelationskoeffizient r ist eine Abhängigkeitsmaßzahl für den (linearen) Zusammenhang zweier Merkmale x und y .

Der Wertebereich des Korrelationskoeffizienten (r) reicht von -1 bis $+1$. Ein Koeffizient von $r = +1$ (Abb. 43 a) bedeutet für zwei Spektralkanäle vollständige Korrelation. Die Grauwerte liegen im Merkmalsraum auf einer Geraden mit einem Winkel von 45° . Eine enge Korrelation besteht ebenfalls für $r = -1$ (Abb 43 c), die Gerade verläuft in diesem Fall im Merkmalsraum in einem Winkel von 135° , beide Bilder verhalten sich zueinander wie Positiv und Negativ. Je kleiner r ist, desto geringer ist die Abhängigkeit der Daten. Für $r = 0$ (Abb 43 b) besteht keine Übereinstimmung der Informationsgehalte, folglich sind die beobachteten Merkmale voneinander unabhängig.

Tab. 22: Korrelationskoeffizienten der HRSC-Kanäle (File 35_rgbndir_03m_subwald.img)

	Kanal 1 (r)	Kanal 2 (g)	Kanal 3 (b)	Kanal 4 (nd)	Kanal 5 (ir)
Kanal 1 (r)	1	0.248	0.065	0.661	0.798
Kanal 2 (g)		1	0.928	0.772	0.269
Kanal 3 (b)			1	0.620	0.061
Kanal 4 (nd)				1	0.674
Kanal 5 (ir)					1

In der Tab. 23 sind die Korrelationskoeffizienten des HRSC-A-Datensatzes Potsdam-Sanssouci aufgeführt. Die Korrelationsmatrix für die fünf Spektralkanäle zeigt, daß die Kanäle nicht unabhängig voneinander sind, sondern mit einem Koeffizienten von überwiegend $>0,6$ hoch korreliert sind. Alle Kanäle sind positiv miteinander korreliert, d.h., es gibt keine Positiv-Negativ-Effekte.

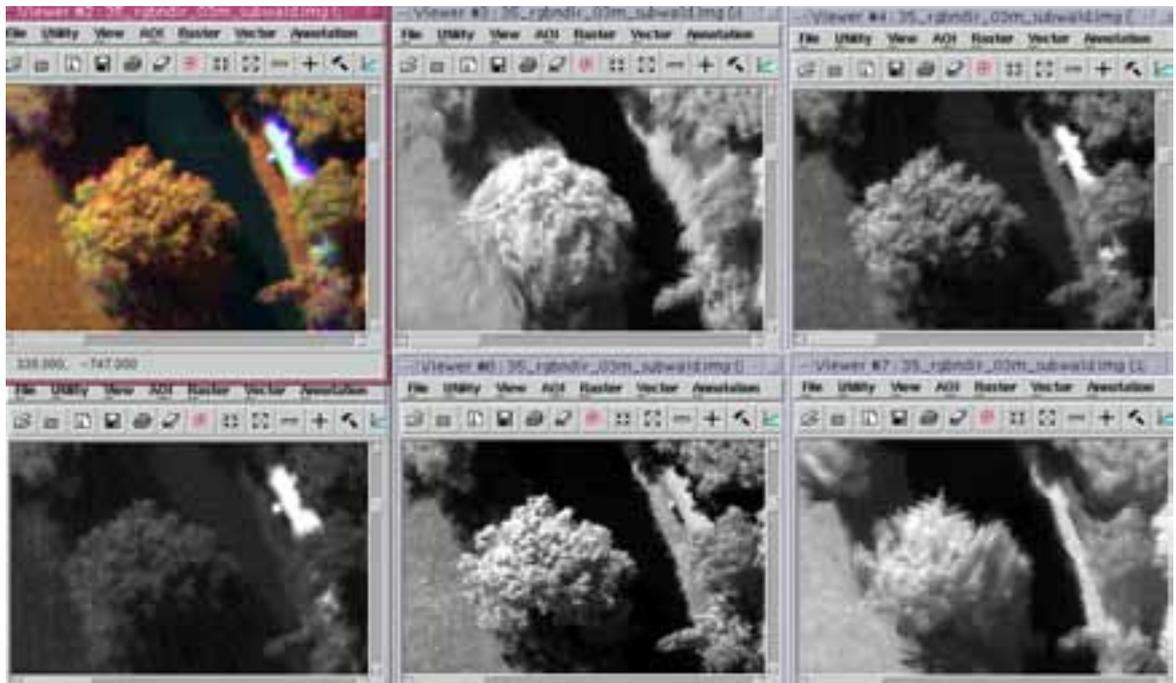


Abb. 44: Die verschiedenen Farbkanäle am Beispiel einer Eiche im Park Sansouci (oben von links nach rechts: ein RGB-Komposit aus Nadir, Grün, Blau; und die Einzelkanäle Rot, Grün, Unten von links: Blau, Nadir und Infrarot.

Die Kanäle Blau und Grün korrelieren mit einem Wert höher als $0,9$ und liefern damit redundante Information. Dies bestätigt sich bei einem optischen Vergleich der Bilddaten dieser Kanäle (siehe Abb 44) Beide Kanäle liegen spektral eng zusammen.

Sehr hoch korreliert sind auch die Kanäle Infrarot und Rot mit einem Koeffizienten von 0.798. Dies ist angesichts der extrem unterschiedlichen Blickwinkel der beiden Kanäle (32°) und der unterschiedlichen Geometrie der Orthobilddaten (Abb. 44) erstaunlich. Zu erwarten gewesen wäre eine größere Unterschiedlichkeit der Kanäle. Spektral macht die hohe Redundanz Sinn, die beiden Kanäle liegen benachbart im nahen infraroten Bereich.

Aufgrund seiner großen spektralen Bandbreite ist der Nadir-Kanal mit allen anderen vier Kanälen hoch korreliert. Dies trifft besonders auf Grün zu (Koeffizient 0.772), im Vergleich mit den anderen Kanälen werden Werte größer als 0,6 erreicht, was auf sehr ähnliche Information in den beteiligten Datensätzen hinweist. Überraschend ist hier, daß der rote Kanal nicht mit der Information aus dem Nadir übereinstimmt, da der rote Kanal spektral einen Teilbereich des Nadir-Kanals bildet.

Am wenigsten redundant sind die Kanäle Infrarot und Blau mit einem Koeffizienten von 0,061. Diese Kanäle unterscheiden sich sowohl spektral wie auch von der Ausrichtung der Blickwinkel (12°) erheblich. Erwartungsgemäß wenig redundante Information steckt auch in den Kanälen Rot und Grün, beide Kanäle unterscheiden sich durch 18° Blickwinkel, die geometrischen Eigenschaften der Orthodaten sind bei Blau und Grün sehr verschieden von denen des Infraroten und des Roten Kanales.

7.4.2 Grauwertverteilungen

Die Darstellung der Grauwertverteilung von Scannerdaten ist ein wertvolles Hilfsmittel bei der digitalen Bildverarbeitung. Die Form des Histogramms macht den Kontrastumfang einer Szene deutlich und läßt Aussagen über deren Homogenität zu. Ein Histogramm mit einem einzigen scharfen Maximum läßt beispielsweise auf eine homogene Oberfläche mit geringem Kontrast schließen. Auch ein einfaches gestrecktes Maximum deutet auf Homogenität hin, bedeutet aber einen größeren Kontrastumfang. Andere Formeigenschaften eines Histogramms geben Aufschlüsse über die statistische Beschaffenheit der Daten. Das Vorkommen von seitlichen Ausläufern und der Grad der Asymmetrie des Maximums weisen auf wichtige strukturelle Eigenschaften hin, die man dem Bild selbst nur schwer entnehmen könnte.

In diesem Kapitel werden die Grauwertverteilungen der Sanssouci-Bilddaten und die daraus berechneten Mittelwerte (Mean) und Standardabweichungen (STDV) untersucht. Anhand dieser statistischen Kenngrößen sollen die Hauptunterschiede zwischen den einzelnen Kanälen beschrieben werden.

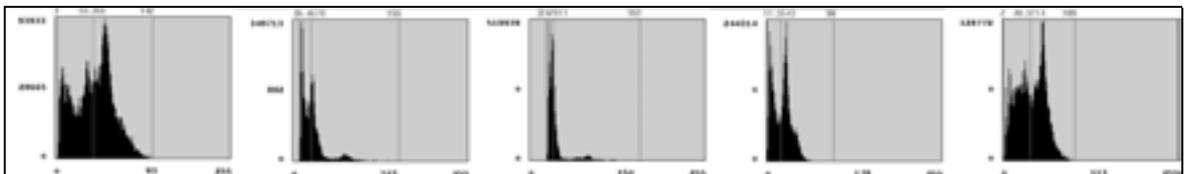


Abb. 45: Histogramme der Kanäle des Datensatzes Sanssouci (von links): rot, grün, blau, nadir, infrarot

Die HRSC-Daten werden noch als 8-bit-Daten (256 mögliche Grauwertstufen) aufgezeichnet, die neue Kamerageneration wird über eine 12-bit-Datentiefe verfügen (1024 mögliche Graustufen). Die jetzige theoretische radiometrische Auflösung von 256 Grauwerten wird praktisch nie erreicht. Aufgrund der üblicherweise sehr unterschiedlichen Geländekontraste (dunkle Wald- oder Ackerflächen/helle Sandflächen) muß der gain factor, mit dessen Hilfe die Kamera angesteuert wird, mit entsprechendem Sicherheitspuffer ausgewählt werden. Für die weitere Prozessierung – insbesondere für die Orthobildherstellung – ist es von zentraler Bedeutung, gleichmäßige Grauwertinformationen zu haben, ein „Überlaufen“ des Buffers ist zu vermeiden. Das heißt, der gain factor muß so gewählt werden, daß selbst hellste Flächen nicht überstrahlt werden und in diesen Gebieten noch differenzierte Information vorliegt, um bei der Prozessierung Anhaltspunkte zu finden. Durch diese Einhaltung eines Sicherheitspuffers kann der gesamte theoretisch mögliche Bereich von 256 Graustufen nie ausgeschöpft werden.

Die Potsdam-Daten verfügen durchschnittlich über eine radiometrische Auflösung von 7 bit, maximal werden 156 verschiedene Grauwerte unterschieden, in einzelnen Kanälen (blau, grün) sind die Informationen in 6 bit zusammengefaßt.

7.4.3 Die Verteilung der Daten

Die Häufigkeitsverteilungen sind durch Maßzahlen zu charakterisieren, der Mittelwert und der Median geben die Lage der Häufigkeitsverteilung an, die Streuung der Häufigkeitswerte ist aus der empirischen Varianz s^2 und der daraus abgeleiteten Standardabweichung s abzuleiten. (Der **Mittelwert** (Mean) ist definiert mit $\bar{x} = 1/n$, der **Median** (Mitte der Maßzahlen) ist weniger anfällig für Ausreißer als der Mittelwert, die **Empirische Varianz** s^2 gibt die Breite der Häufigkeitsverteilung an, d.h. die Streuung der Werte und ist proportional zur Summe der quadratischen Abweichungen vom Mittelwert. Die positive Wurzel aus der Varianz ist die **Standardabweichung** s).

Tab. 23: Statistik File Potsdam-Sanssouci (35_rgbndir_03m_subwald.img)

	Min	Max	Mean	Median	Mode	Std Dev
Kanal 1 (r)	3	142	55,366	58	72	28,384
Kanal 2 (g)	9	155	26,468	24	12	16,611
Kanal 3 (b)	24	161	35,701	32	27	14,114
Kanal 4 (nd)	1	98	21,354	23	28	12,950
Kanal 5 (ir)	2	105	40,321	41	58	20,284

Die Abbildung 45 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Grauwerte in den fünf Kanälen der HRSC-A-Daten. Auf der Abszisse sind die Grauwerte von 0 bis 255 abgetragen, wobei immer sieben Grauwerte zu einem Intervall zusammengefaßt wurden. Die Ordinate zeigt die Häufigkeit pro Intervall in absoluten Zahlen.

7.4.4 Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse (englisch Principal Components Analysis, PCA) ist ein multivariates statistisches Verfahren, das der Gruppe der Faktorenanalysen im weiteren Sinn angehört. Es ist aus der Sicht der Klassifikationstechniken als Vorverarbeitungsschritt zu sehen, da das Ergebnis nicht unmittelbar Klassen sind. Mit der Hauptkomponentenanalyse werden nicht Ähnlichkeiten zwischen Objekten (Pixeln) gemessen, sondern Ähnlichkeiten zwischen einzelnen Merkmalsdimensionen - wobei diese in der Bildverarbeitung vorwiegend spektrale Dimensionen (Kanäle) sind.

Multispektrale Fernerkundungsdaten weisen oft starke Übereinstimmungen zwischen den Spektralinformationen der einzelnen Kanälen auf. In den meisten Kanälen sind vergleichbare Muster zu erkennen, wenn auch die absoluten Werte unterschiedlich sind bzw. Minima und Maxima vertauscht sein können. Es besteht demnach zwischen diesen Kanälen eine auch statistisch klar quantifizierbare Korrelation.

Diese Korrelation zwischen einzelnen Merkmalsdimensionen derselben Objekte (Pixel) bedeutet, daß redundante Information in diesen Datensätzen vorhanden ist, daß sich der Informationsgehalt einzelner Kanäle signifikant überlappt. Um diese starke Korrelation zu überwinden und die geringen materialspezifischen Spektralunterschiede zu verstärken, wird die Hauptkomponenten-Transformation von Multispektraldaten durchgeführt. Aus den ursprünglichen Merkmalsdimensionen werden voneinander unabhängige Faktoren - die "Hauptkomponenten" - gebildet. Diese Transformation führt zur Errechnung neuer synthetischer Datensätze, die nur die unkorrelierten Spektralunterschiede beinhalten (Donker & Mulder, 1976). Wichtig sind hier die Verstärkung und Darstellung der voneinander unabhängigen Spektralinformationen in Datensätzen höherer, n-dimensionaler Ordnung.

Oft können die voneinander statistisch unabhängigen Hauptkomponenten thematisch einer abstrakten Merkmalsdimension zugeordnet werden. Meist entspricht die erste Hauptkomponente den wichtigsten Strukturen der großräumigen Variation und in weiterer Folge kleinräumigeren bzw. singular - lokal wirksamen Phänomenen. Bei Landsat-TM-Daten repräsentiert beispielsweise die 1. HK ein Abbild der Gesamtalbedo, die 2. HK die Albedounterschiede zwischen VIS und IR-Spektrum, die 3. HK interne Albedounterschiede innerhalb des IR oder des VIS, höhere Hauptkomponenten individuelle Unterschiede wie z.B. Rauschen (noise). Mit steigendem

Ordnungsgrad der Hauptkomponenten dominiert zunehmend das elektronische Rauschen der Datenübertragung (also immer feinere Unterschiede zwischen den Kanälen). Erfahrungsgemäß stellen die ersten drei bis vier Hauptkomponenten eine gute Grundlage zur Interpretation von geowissenschaftlichen Merkmalen im Bild dar (Grunicke, 1990; Prinz & Bischoff, 1995).

Die Vorteile der Hauptkomponentenanalyse sind:

- Reduktion der Anzahl der Originalkanäle durch Informationskompression
- erheblicher Kontrastanstieg durch diese Datenkompression
- Korrelationsfreiheit der Ergebniskanäle nach der Transformation
- beträchtliche Reduktion der durch fehlerhafte Sensorelemente verursachte Bildstreifen bzw. Datenstörungen (ERDAS 1997)

Die theoretisch-mathematische Ableitung der Hauptkomponenten soll an dieser Stelle nicht im Detail ausgeführt werden und kann bei Flury & Riedwyl (1983) und Richards (1986) sowie Haberäcker (1987) und Kraus (1990) nachvollzogen werden. Im folgenden sollen die wesentlichen Züge der Transformation am Beispiel einer zweidimensionalen PCA (oder auch HKA) und die Charakteristika der Hauptkomponenten skizziert werden.

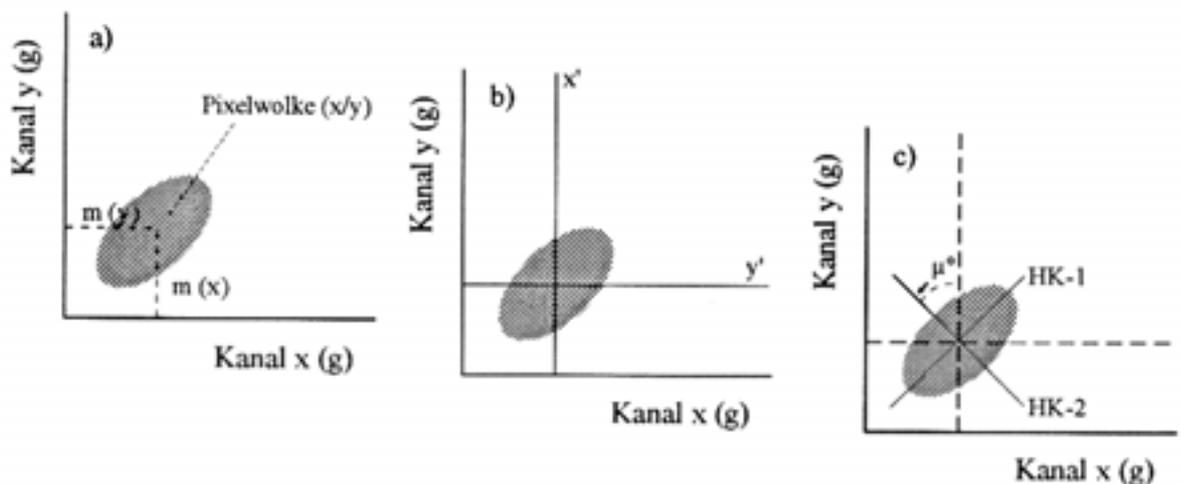


Abb. 46: Prinzip einer zweidimensionalen Hauptkomponenten-Transformation. Erläuterung im Text (Kappas 1994)

Die Transformation der voneinander abhängigen Grauwerte DN (k) in neue, unabhängige Grauwerte DN*(k) erfolgt über die Definition eines in diesem Beispiel zweidimensionalen Merkmalsraumes (bei einer vollständigen Transformation besitzt der Merkmalsraum soviele Dimensionen wie Kanäle). Die Grauwertverteilung zeigt eine elliptische Form und belegt so den hohen Korrelationsgrad der Daten (Abb. 46a). Die PCA versetzt den Ursprung des Achsensystems an den Punkt, an dem die Mittelwerte m_x und m_y der beiden Datensätze definiert sind (Abb. 46b). Anschließend werden die Achsen um einen Winkel u gedreht, so daß eine Achse entlang der größten Varianz der Daten ausgerichtet ist (Abb. 46c). Diese Achse bildet die erste Hauptkomponente (HK 1) und repräsentiert die größten unkorrelierten Spektralunterschiede. Die senkrecht zu ihr stehende Achse wird als zweite Hauptkomponente bezeichnet. Hervorgerufen wird diese Drehung der Achsen durch eine Transformationsmatrix, die auf die Eigenwerte und die Varianz/Kovarianzmatrix der beteiligten Datensätze zurückgreift. Bei mehr als zwei Dimensionen resultieren n-dimensionale Ellipsoide mit einer entsprechenden Anzahl von Raumachsen.

Da die Hauptkomponenten-Transformation auf maximale Varianz ausgelegt ist, befindet sich der Hauptteil der Bildinformation in der 1. HK. Der Anteil an der Gesamtvarianz nimmt in den Hauptkomponenten höherer Ordnung drastisch ab. Bei Landsat-TM-Daten konzentriert sich über 90% der Bildinformation auf die ersten drei Hauptkomponenten.

Die Hauptkomponenten-Transformation der Pixel des Ausgangsbildes erfolgt in mehreren Stufen:

- Berechnung der Kovarianzmatrix (für das ganze Bild). Die Kovarianz zwischen den Kanälen beschreibt die Korrelation und ist somit ein Maß für die Redundanz des Datenmaterials und bildet die statistische Grundlage für weitere Berechnungen
- Berechnung der Eigenwerte und Eigenvektoren von der Kovarianz. Der Eigenwert entspricht der Varianz, die den einzelnen Hauptkomponenten zufällt und gibt deren Länge an. Der Eigenvektor gibt die Achsenrichtung der Hauptkomponenten an und zeigt somit in die der maximalen Restvarianz. Dieser Vektor ist Maß für die lineare Beziehung zwischen n-tem Kanal und n-ter Hauptkomponente und stimmt mit den entsprechenden Korrelationskoeffizienten überein und dient daher der Beschreibung der Hauptkomponenten
- Pixelweise lineare Transformation der Originalgrauwerte in den Merkmalsraum der Hauptkomponenten: Zur Berechnung des neuen Grauwertes werden die n-dimensionalen Merkmalsvektoren des Ausgangsbildes mit den entsprechenden Eigenvektoren multipliziert.

Die erste Hauptkomponente ist ein gewichtetes Mittel aller beteiligten Daten und gibt ein angenähertes Bild der Albedo und der Topographie für den gesamten aufgezeichneten Bereich. Sie eignet sich gut zur Strukturinterpretation. Die höheren Komponenten drücken Abweichungen verschiedenster Art von diesem Durchschnitt aus und beinhalten Informationen über geologische Variationen und Vegetationsunterschiede in den Ausgangsdaten.

Aus den neu errechneten Hauptkomponenten werden diejenigen ausgewählt, welche die größten Standardabweichungen bzw. größten Eigenwerte (eigenvalues) besitzen. Auf diese Weise wird die redundante Information durch eine Linearoperation auf eine geringere Anzahl von Kanälen komprimiert. Eine Hauptkomponenten-Analyse kann auch nur für eine begrenzte Anzahl von Kanälen durchgeführt werden, wenn es z.B. darum geht, nur die Gesamtalbedo des VIS oder des IR Spektrums zusammenzufassen. Solche Einzelkomponenten werden dann gezielt mit anderen Originalkanälen oder Ratios zu hybriden Falschfarbkompositen zusammengefügt.

Coenradie (1992) weist auf die Besonderheiten der Hauptkomponenten-Transformation hin: Zum einen ist die Transformation der Bilddaten szenenabhängig. Es bedarf einer eingehenden Analyse der Eigenvektoren und der visuellen Betrachtung der einzelnen Hauptkomponenten, um ihre Bedeutung in der jeweiligen Szene zu erfassen. Ferner ändern sich die Kovarianzmatrix und damit die Eigenwerte und -vektoren mit den jeweiligen Anteilen der Oberflächenbedeckungen im Bild.

Für das Datenbeispiel Potsdam/Sanssouci wurde für alle fünf verfügbaren Spektralkanäle eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Hierbei sollten die Möglichkeiten der Kontrastverstärkung und der Hervorhebung bestimmter Bildinhalte untersucht werden, ferner wurde eine mögliche Datenreduktion geprüft.

In Abbildung 47 sind die fünf Hauptkomponenten der Potsdam-Daten wiedergegeben; deutlich ist die abnehmende Bildqualität aufgrund der immer geringer werdenden Unterschiede in den DN-Werten mit höherer Hauptkomponenten-Ordnung. Die Farbgebung der Objekte ist nicht mehr durch die originären Reflexionswerte gegeben, vielmehr sind Spektralunterschiede unterschiedlicher Ordnung den Farbvektoren [rgb] zugewiesen

Tab. 24: Eigenvalues

Hauptkomponente	Eigenvalue
Kanal 1 (I. HK)	1263.068
Kanal 2 (II. HK)	472.654
Kanal 3 (III. HK)	111.320
Kanal 4 (IV. HK)	21.221
Kanal 5 (V. HK)	10.455

Tab. 25: Eigenvektoren

	Kanal 1 (I. HK)	Kanal 2 (II. HK)	Kanal 3 (III. HK)	Kanal 4 (IV. HK)	Kanal 5 (V. HK)
Kanal 1 (r)	0.768	-0.281	0.564	-0.111	-0.016
Kanal 2 (g)	0.213	0.672	0.004	-0.108	-0.701
Kanal 3 (b)	0.102	0.606	0.104	-0.396	0.674
Kanal 4 (nd)	0.301	0.283	-0.090	0.877	0.228
Kanal 5 (ir)	0.513	-0.146	-0.814	-0.225	0.046

Tab. 26: Statistik File PCA Potsdam-Sanssouci (pca_potsdam.img)

	Min	Max	Mean	Median	Mode	Std Dev
Kanal 1 (I. HK)	10,105	184,26	78,941	86,3	99,906	35,242
Kanal 2 (II. HK)	-13,93	201,97	24,067	17,275	17,275	21,875
Kanal 3 (III. HK)	-55	62,732	0,262	-0,733	1,5665	10,456
Kanal 4 (IV. HK)	-43,518	11,874	-13,483	-13,658	-13,442	4,487
Kanal 5 (V. HK)	-14,318	67,744	11,383	11,327	11,006	3,157

Die Tabellen 25 und 26 zeigen das Ergebnis der Hauptkomponenten-Analyse der fünf HRSC-Kanäle. In den Tabellen sind die Eigenvektoren, die Eigenvalues und die statistischen Eigenschaften der einzelnen Hauptkomponenten wie Standard Deviation, Mittelwerte etc. aufgelistet. Die Eigenvektoren oder Ladungen geben an, wie stark und in welcher Richtung eine Hauptkomponente von den Ausgangskanälen geprägt wird. Die Werte liegen zwischen -1 und +1. Ladungen, deren Betrag kleiner 0,1 ist, werden als Nullladungen bezeichnet. In diesem Fall besteht kein Zusammenhang zwischen der Hauptkomponente und den Ausgangsdaten.

Die erste Hauptkomponente wird erwartungsgemäß durch den roten Kanal bestimmt, der die breiteste Grauwertverteilung aufweist (siehe Kap. 4, Abbildungen siehe S. 97). Bestimmend wirkt ferner die Information des infraroten Kanals. Deutlich prägt sich die verzogene Geometrie der Orthobilddaten beider Kanäle durch. Erheblich geringeren Anteil an der ersten HK haben die Informationen aus den innenliegenden Kanälen Grün und Nadir, Blau ist mit einem Eigenvektorwert von 0,102 so gut wie gar nicht an der I. HK beteiligt. Die Daten der ersten HK wirken sehr kontrastreich, schwarze Schatten und tiefschwarze Wasserflächen strukturieren das Bild. In den Baumkronen sind unterschiedliche Strukturen und Grauwertverteilungen zu erkennen. Rasen, Wege und Treppen sind visuell nicht voneinander zu unterscheiden. Die Treppen des Schlosses Sanssouci verschmelzen spektral mit den Rasenflächen.

Die zweite HK wird bestimmt durch die Information aus den mittleren Kanälen Blau, Grün und Nadir. Die Waldgebiete erscheinen als dunkle Flächen, das Erscheinungsbild ist unstrukturiert und diffus. Auch in der zweiten HK sind Rasenflächen, Wasser und Schatten nur schwer

unterscheidbar. Die Treppen und Teile des Weges erscheinen in gleißendem Weiß und wären mit Hilfe dieser HK gut herauszufiltern. Auffällig sind ferner die streifigen Strukturen der Rasenflächen im linken Bildteil. Die Geometrie der Pixel ist regelmäßiger und rechteckiger als bei der I. HK, hierbei wird die höhere Auflösung des Nadirs erkennbar. Die enger zusammenliegenden Kanäle Blau und Grün bestimmen das Erscheinungsbild.

Ähnlich wie die erste HK wird die III. HK lediglich von den extrem auseinanderliegenden Kanälen Rot und Infrarot gebildet, wobei die Ausrichtungen der Eigenvektoren in entgegengesetzte Richtungen weisen. Die anderen drei Kanäle sind Nullladungen. Als graue Flächen prägen sich die Schattengebiete wie Schablonen durch. Der Rasen erscheint als streifige verrauschte Fläche, gleißend weiß erscheinen einzelne Schattenbereiche. Der Gesamteindruck dieser HK ist sehr unruhig. Es dominieren stark unregelmäßig große Pixel, die einzelne Gebilde wie Bäume abstrakt verzerren. Die Bäume wirken unstrukturiert und haben große Grauwertspannen.

Diffus wirkt auch die IV. HK. Sie wird überwiegend aus der Nadirinformation gebildet, die Information aus den anderen Kanälen tritt zurück, die Eigenvektoren der anderen Kanäle haben zudem andere Richtungen. Die IV. HK verfügt über einen engen Grauwertbereich von lediglich 50 Graustufen, das Bild macht einen unstrukturierten Salz-und-Pfeffer Eindruck. Bestimmendes Element ist die Textur des hochauflösenden Nadirkanals. Auffällig ist das Hervortreten eines Weges im unteren Teil des Bildes. Lediglich in dieser HK unterscheidet sich dieser Weg von den anderen, indem er erheblich heller erscheint.

Die V. HK schließlich wird aus den Informationen des grünen und blauen Kanals zusammengesetzt mit einem geringen Anteil vom Nadir und enthält kaum noch Informationen. Die Strukturen sind weitgehend verschwunden, die Bildinhalte machen einen verrauschten Eindruck. Die Baumkronen sind ein Geflecht aus dunklen Pixeln, die sich im Randbereich kaum noch vom Untergrund absetzen. Sehr deutlich treten aus diesen verwaschenen Strukturen zwei Baumtypen hervor: Die 13 Blutbuchen des Parks sind sehr deutlich als homogene weiße Flächen zu erkennen, tief schwarz, aber inhomogen, sind einzelne Eschen zu unterscheiden. Ferner ist auch in der V. HK ein Weg (wie in der IV. HK) durch eine andere Einfärbung abgesetzt.

Allgemein bestätigt sich in der Hauptkomponenten-Analyse das Problem der Blickwinkelunterschiede. Die Hauptkomponenten werden entweder von den weit auseinanderliegenden roten und infraroten Kanälen bestimmt (HK 1, HK 3) oder den eng zusammenliegenden Kanälen Nadir, Grün, Blau (HK 2, HK 5), die vierte HK wird von der Nadir-Information dominiert.

Auffällig bei der 5. Hauptkomponente ist das deutliche Hervortreten der Blutbuchen. Die 13 Blutbuchen treten als weiße Ovale deutlich aus dem Bild hervor. Diese Komponente wird aus den drei zusammenliegenden Kanälen Nadir, Blau und Grün gebildet, die Information aus Infrarot und Rot fällt völlig heraus (Nullladungen).

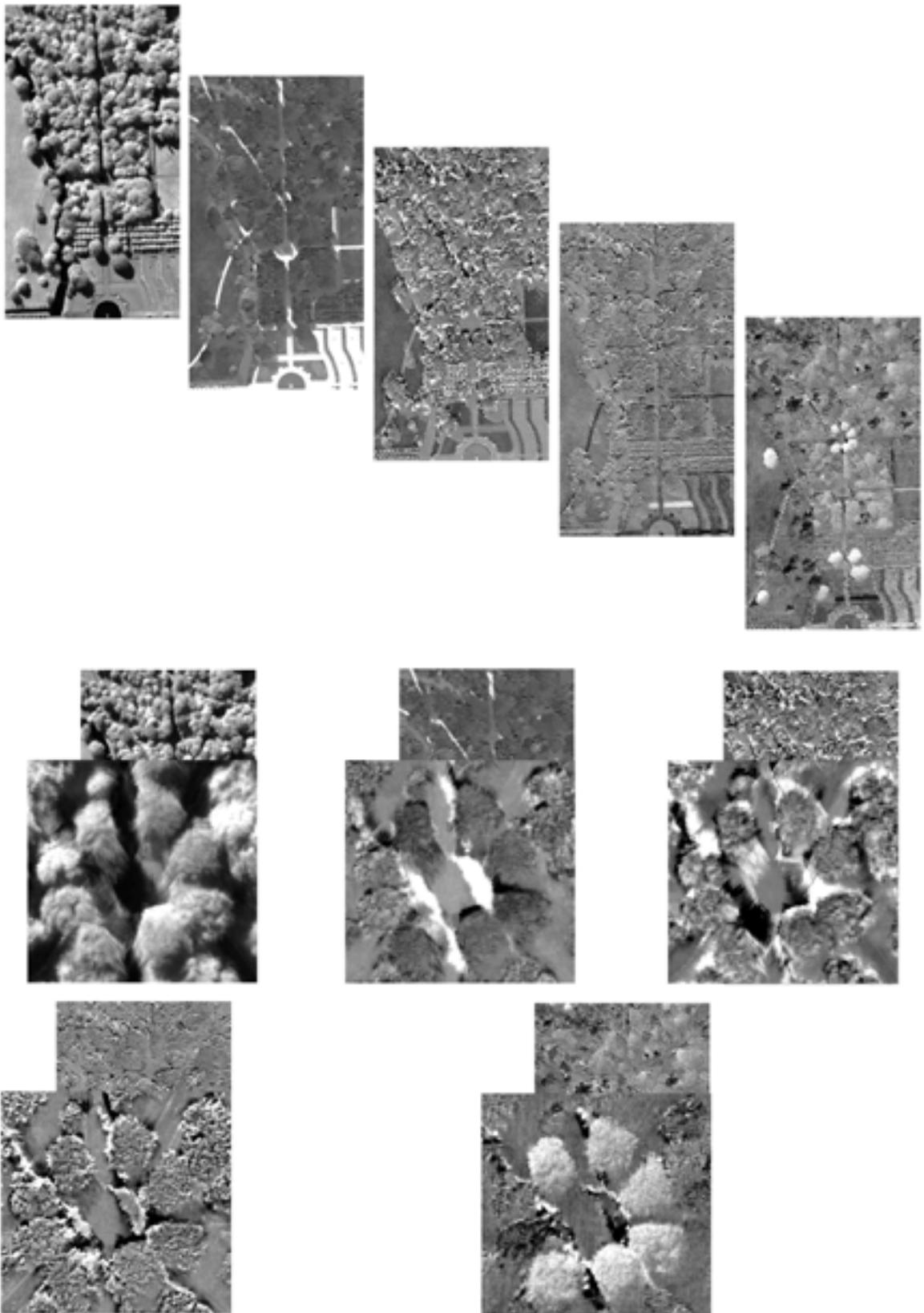


Abb. 47: Ergebnisse der Hauptkomponenten-Transformation. Oben die fünf Hauptkomponenten für das gesamte Untersuchungsgebiet, unten der Ausschnitt einer Buchengruppe

7.4.5 Reduzierung der Pixelauflösung mittels der Point Spread Function

Für die weitere Auswertung der Daten wurden testweise verschiedene Pixelgrößen mittels der Point Spread Function simuliert. Diese Funktion simuliert unter Berücksichtigung verschiedener kameraspezifischer Parameter eine Datenaufnahme mit der jeweiligen Auflösung, resampelt also nicht lediglich die vorhandenen Pixel wie bei anderen Methoden.

Bei den hochauflösenden Daten (bis 15 cm) sind noch Säume durch die Blickwinkelunterschiede zu beobachten. Diese treten ab Auflösungen zwischen einem und drei Metern nicht mehr auf. Zur Untersuchung des Vegetationsindex erwies sich die Verwendung der räumlich reduzierten Daten als sinnvoll.

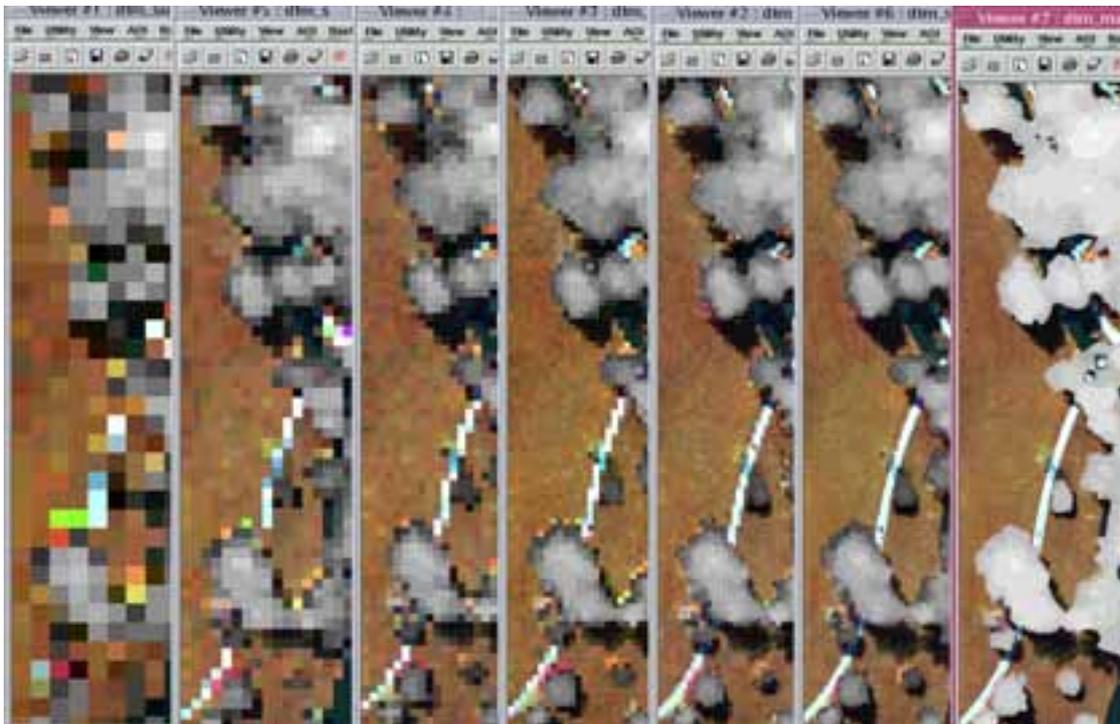


Abb. 48: Ergebnis der verschiedenen Pixelaufösungen, die Datensätze sind mittels des Oberflächenmodells maskiert (von rechts nach links 15 cm bis 10 m)

7.4.6 Untersuchung des "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI)

Der "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) dient zur Hervorhebung der chlorophyllhaltigen Vegetation gegenüber anderen Oberflächen im Bild und ermöglicht so eine bessere Abgrenzung bei der visuellen Interpretation und der digitalen Klassifizierung (Bauer 1994). Der NDVI ist ein "überaus brauchbares Instrument zur schnellen Erfassung quantitativer Informationen mit einem Minimum an Interpretation durch den Menschen" (Allewelt 1987). Der Vegetationsindex bietet ferner ein objektives Vergleichsmittel von multitemporalen Datensätzen und wird als Prüfverfahren für Vegetationsklassifizierungen eingesetzt (Hoffmann 1995).

Der rote und der infrarote Spektralbereich eignen sich besonders gut für Vegetationsuntersuchungen. Während der photosynthetisch aktiven Phase unterscheidet sich Vegetation von unbedecktem Boden durch hohe Absorption von rotem Licht. Die reflektierte Strahlung reagiert im Bereich von 0,75 μm bis 0,8 μm auf grüne bzw. photosynthetisch aktive Vegetation. Die Beziehung zwischen diesem Bereich der Strahlung und der Biomasse beruht darauf, daß kaum Absorption im spektralen Bereich zwischen 0,74 μm und 1,20 μm stattfindet, hingegen ist die Lichtstreuung an oder durch Blätter hier besonders groß. Somit wird von der einfallenden Strahlung ein höherer Anteil reflektiert als absorbiert (Allewelt 1987). Um eine Differenzierung zwischen "Vegetation" und "vegetationslos" zu bestimmen, wird der Kanal mit der höchsten Absorption (bei TM-Daten Kanal 3 mit einem Wellenlängenbereich von 0,63 bis 0,69 μm) mit dem Kanal verglichen, der die stärkste Reflexion aufweist (TM-Kanal 4 mit einem Wellenlängenbereich von 0,76 bis 0,9 μm), pixelweise werden hierbei die spektralen Informationen durcheinander dividiert (Allewelt 1987).

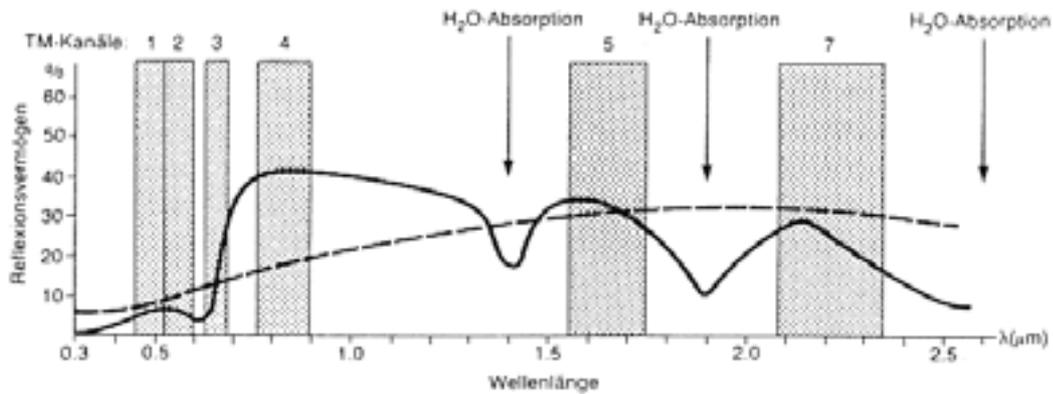


Abb. 49: Zusammenwirken von Differenz, Summe und Ratio im Vegetationsindex. Unter Ratiobildung wird die Kombination mehrerer Kanäle eines multispektralen Bildes zur Hervorhebung bestimmter spektraler Eigenschaften verstanden (z.B. die Division zweier Kanäle oder komplexere Rechenformeln (Kappas 1994)

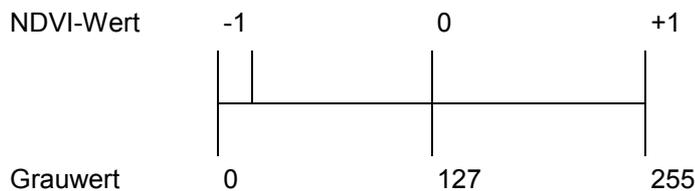
Die Formel für diesen Vorgang beim NDVI lautet:

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}$$

Die berechneten NDVI-Werte bewegen sich zwischen -1 und + 1. Je höher der Wert, desto mehr Vegetation ist vorhanden. Mittels einer abgewandelten Formel werden die Originalwerte auf den Bereich von 256 Grauwertstufen gestreckt (Csaplovics 1992):

$$NDVI = \left(\frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3} \right) \times 127$$

Die Daten werden somit wie folgt verteilt:



Das gerechnete Ergebnis wird in einem einkanaligen Bild zusammengefaßt und in abgestuften Grautönen dargestellt. Dabei entspricht der Wert 0 dem Wert schwarz, der Wert 255 bedeutet weiß; d.h. je heller die Fläche, desto mehr Vegetation ist zu erwarten.

Der Vegetationsindex NDVI als Standard-Verfahren zur Überprüfung der Vegetation ist nur schwer durchzuführen, da die HRSC keine (ausschließliche) Information aus dem benötigten roten Spektralbereich liefert. Üblicherweise wird der Kanal mit der geringsten Reflexion (bei Thematic Mapper ist dies Kanal 3 mit einem Wellenlängenbereich von 0,63 bis 0,69 μm) mit dem Kanal verglichen, der die stärkste Reflexion aufweist (TM-Kanal 4 mit einem Wellenlängenbereich von 0,76 bis 0,9 μm). Die Kanäle der HRSC-A haben in diesen spektralen Bereichen keine Information. Zwar liefert der infrarote Kanal (Bandbreite: 925 - 1015 nm) die gewünschte Information aus dem spektralen Bereich der stärksten Reflexion von Vegetation, der Bereich der geringsten Reflexion (600 - 700 nm) ist jedoch nicht abgedeckt, der rote Kanal der HRSC (730 - 770 nm) liegt zu weit im infraroten Bereich und bildet somit ebenfalls einen Bereich starker Vegetationsreflexion ab. Die Ratiobildung dieser Kanäle (rot/infrarot) ist zudem problematisch, da diese beiden die höchsten Blickwinkelunterschiede der Farbkanäle repräsentieren (beide liegen rund 32° auseinander) und Objekte unterschiedlich abgebildet werden (Versätze entstehen).

Eine mögliche Vorgehensweise ist die Verwendung des grünen (485 - 575 nm) anstatt des roten Kanals. Vorteil bei der Ratiobildung aus diesen beiden Kanälen ist, daß der Blickwinkelunterschied mit $12,6^\circ$ niedriger ist und somit ein besseres Ergebnis zu erwarten ist.

Weiteres Problem ist, daß das NDVI-Verfahren pixelweise arbeitet, d.h. pixelweise werden die spektralen Informationen durcheinander dividiert. Durch die Verschiebung der Pixel gegeneinander sind die Ergebnisse der NDVI-Ratiobildung bei HRSC-A-Daten zufällig und unbefriedigend.

Besonders in den Randbereichen der untersuchten Objekte entstehen Fehlersäume. Bei einer Kombination von infrarotem und rotem Kanal sind erhebliche Fehler durch die großen Blickwinkelunterschiede zu erwarten.

Für eine Untersuchung des NDVI ist eine Reduzierung der räumlichen Auflösung anzuraten. Selbst bei korrekter übereinanderliegender Position der Einzelpixel macht eine Untersuchung von 30 cm-Pixeln hinsichtlich der Vegetation keinen Sinn, da zu viele Einzelkomponenten der zu untersuchenden Objekte mit einbezogen werden. Ein Baum gliedert sich so beispielsweise in eine bunt zusammengesetzte Fläche aus photosynthetisch aktiven Bereichen (Blätter) und nicht aktiven Bereichen (Stamm und Zweige).

Die Verwendung von HRSC-A-Daten zur Bestimmung des Vegetationsindexes ist unter Einsatz der Kanäle infrarot und grün bedingt möglich. Die Bodenpixelauflösung wurde testweise auf verschiedene Größen reduziert, ein gutes Ergebnis zeigte sich bei einem Datensatz mit drei Metern Pixelauflösung. Bei dieser reduzierten Auflösung und somit zu großen Einheiten zusammengefaßten Pixeln treten die Probleme der Blickwinkelunterschiede in den Hintergrund, eine Saumbildung um die zu interpretierenden Objekte, wie zuvor bei den 30-cm-Daten, wurde nicht mehr beobachtet

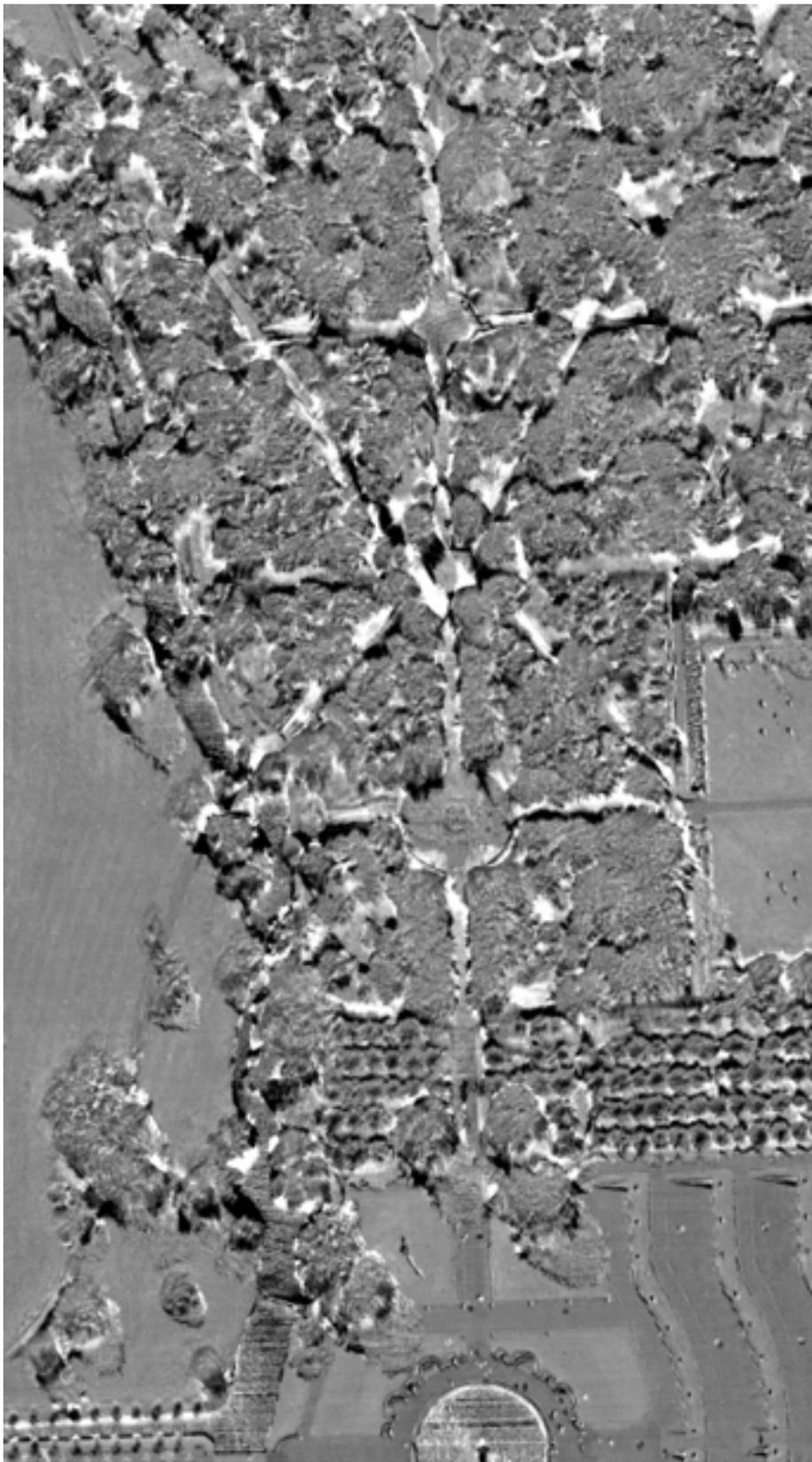


Abb. 50: NDVI für die gesamte Szene, Erläuterungen im Text

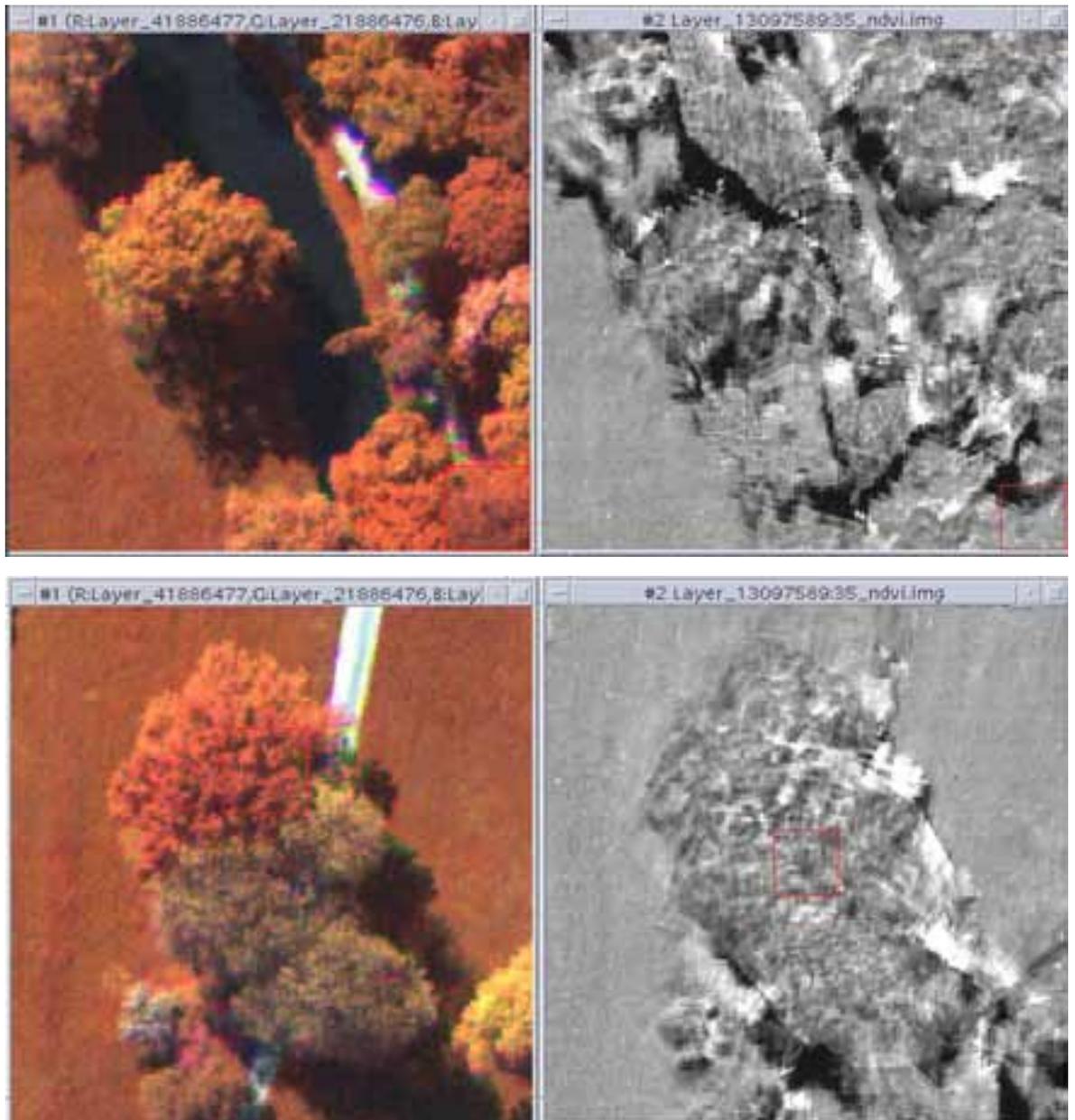


Abb. 51: NDVI am Beispiel der zwei Testbäume (IR-Darstellung)

7.5 Klassifizierungen

Der Datensatz wurde mittels verschiedener Klassifizierungsverfahren untersucht. Zunächst wurde versucht, mittels einer unüberwachten Klassifizierung einen Überblick über den Datensatz zu erhalten, in einem späteren Arbeitsschritt wurden Klassen eintrainiert und überwacht klassifiziert.

Zur Anwendung kamen die Standardverfahren, die von kommerziellen Softwareanbietern (ERDAS, ENVI etc.) angeboten werden (ISODATA-Verfahren, überwachte Klassifizierung mittels nearest neighbour).

7.5.1 Unüberwachte Klassifizierung

Im Rahmen der unüberwachten Klassifizierung wurde der Datensatz zunächst grob klassifiziert, in einem weiteren Arbeitsschritt sollten feinere Strukturen interpretiert werden. Das ISODATA-Verfahren ordnet die Einzelpixel lediglich aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften in eine vom Auswerter definierte Anzahl von Klassen, die nicht a priori mit den angestrebten realen Landnutzungs- oder Vegetationsklassen übereinstimmen müssen. Die gefundenen spektralen cluster werden im späteren Interpretationsverfahren realen Klassen zugeordnet.

Der Datensatz wurde in 3, 5, 10 und 50 Klassen sortiert.

Bei drei Klassen zerfällt das Ergebnisbild in Schattenbereiche und einen Mix aus den restlichen zwei Klassen, erkennbar sind nur wenige Strukturen (Treppen, Teile von Wegen). Die Schatten verzahnen insbesondere mit den Baumkronen. Bereits deutlich wird eine Tendenz, die sich später bestätigt: Wiese und Bäume sind spektral nicht zu unterscheiden. Die visuell sehr homogen wirkenden Wiesenflächen geben im geclusterten Ergebnisbild eine 1:1-Mischung der beiden Nicht-Schatten-Klassen. Dies wird auch deutlich an der Testeiche. Ihre Krone zerfällt zu ungefähr gleichen Anteilen in diese beiden Klassen, der untere Bereich des Baumes verzahnt sich diffus mit dem Schatten und bildet keine Abgrenzung, während sich die Eichenkrone im oberen Bereich scharf gegen den Schatten abgrenzt.

Mit fünf clustern bleibt die Schattenklasse nahezu unverändert, die Wiesen- und Wegbereiche beginnen sich auszudifferenzieren. Alle fünf Klassen finden sich im Kronenbereich der Eiche wieder, es gibt fließende Übergänge zwischen dem Kronenbereich und der umgebenden Wiese.

Bei einer Sortierung in zehn Klassen bildet sich eine sich eindeutig abgrenzende Klasse Treppe/Wege aus, alle anderen Bereiche zeigen sich diffuser und heterogener. Erheblich weiter ausdifferenziert sind die Schattenbereiche, wenn der Datensatz in 50 Klassen sortiert wird. Wasser und Wege sind nicht unterscheidbar und werden von gemeinsamen clustern repräsentiert.

Der Einzelbaum setzt sich aus nahezu allen clustern zusammen. Wie in Abb. 52 ersichtlich, wirkt die Krone der Beispieleiche wie eine Punktwolke, zusammengesetzt aus einer großen Anzahl verschiedener Merkmale.

Der Prozess der unüberwachten Klassifizierung erfordert nach der Sortierung des Datensatzes in eine vorbestimmte Anzahl von Klassen eine thematische Zuordnung dieser cluster in die gewünschten Klassen der realen Welt. Dies erwies sich als nicht möglich, da die cluster Teile sehr unterschiedlicher Objekte darstellen. Die visuell sehr eindeutig und gut unterscheidbaren Baumindividuen konnten durch die ISODATA-Analyse nicht unterschieden werden. Bäume, Sträucher und Wiesen erwiesen sich als zu heterogen und in den Bestandteilen ihrer Zusammensetzung wiederum als zu ähnlich, um eindeutig zugeordnet zu werden.

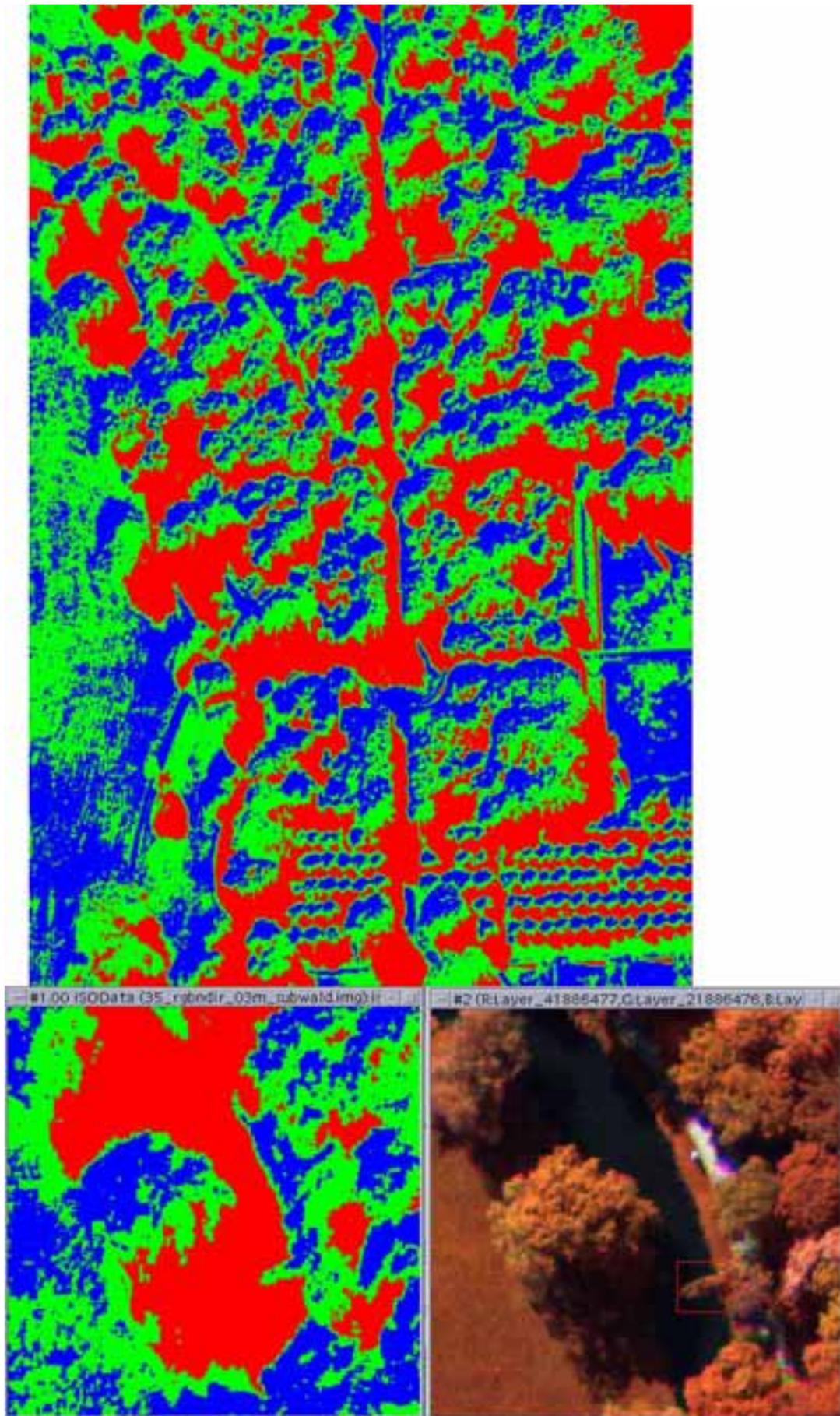


Abb. 52: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung mit drei Klassen

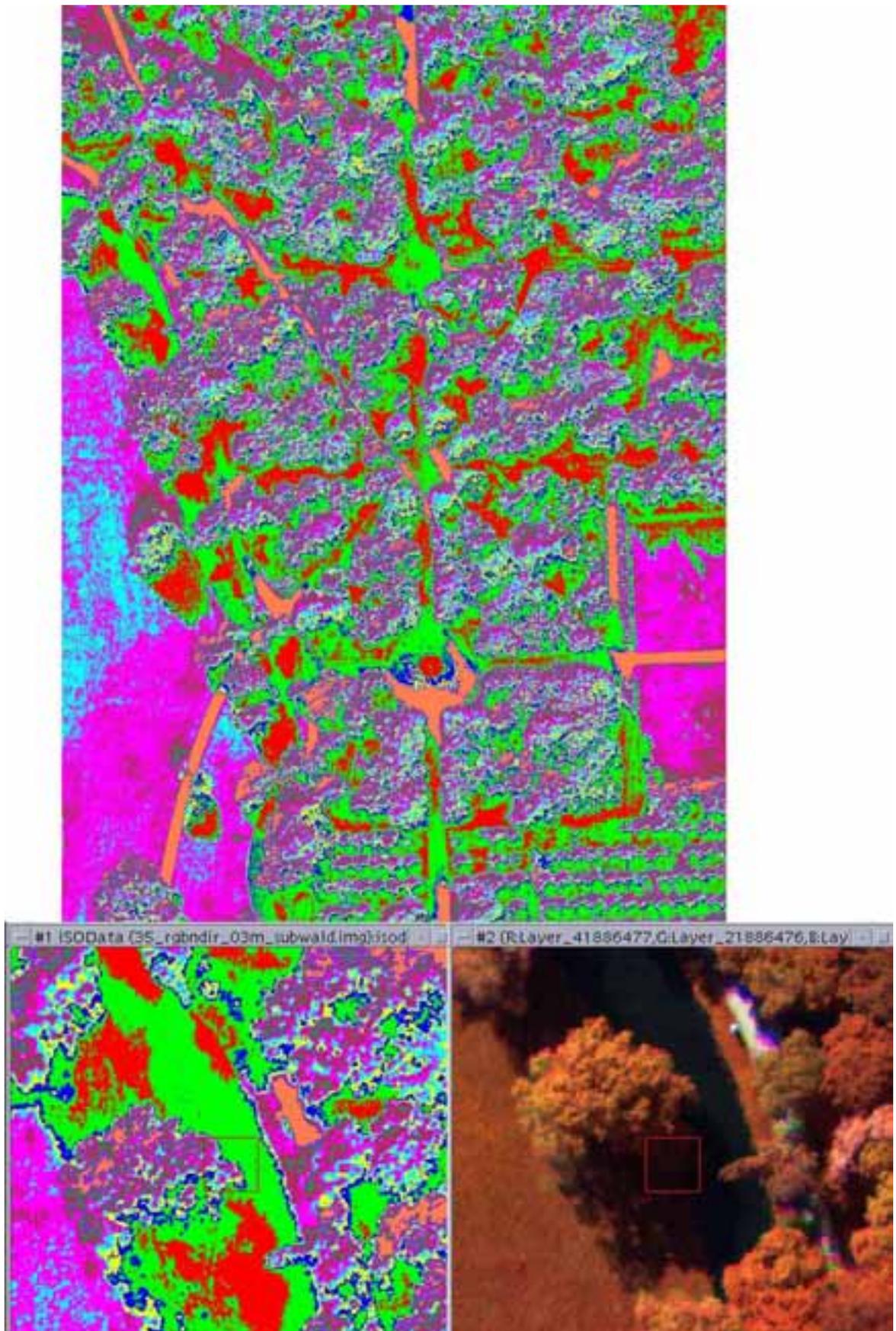


Abb. 53: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung mit 10 Klassen

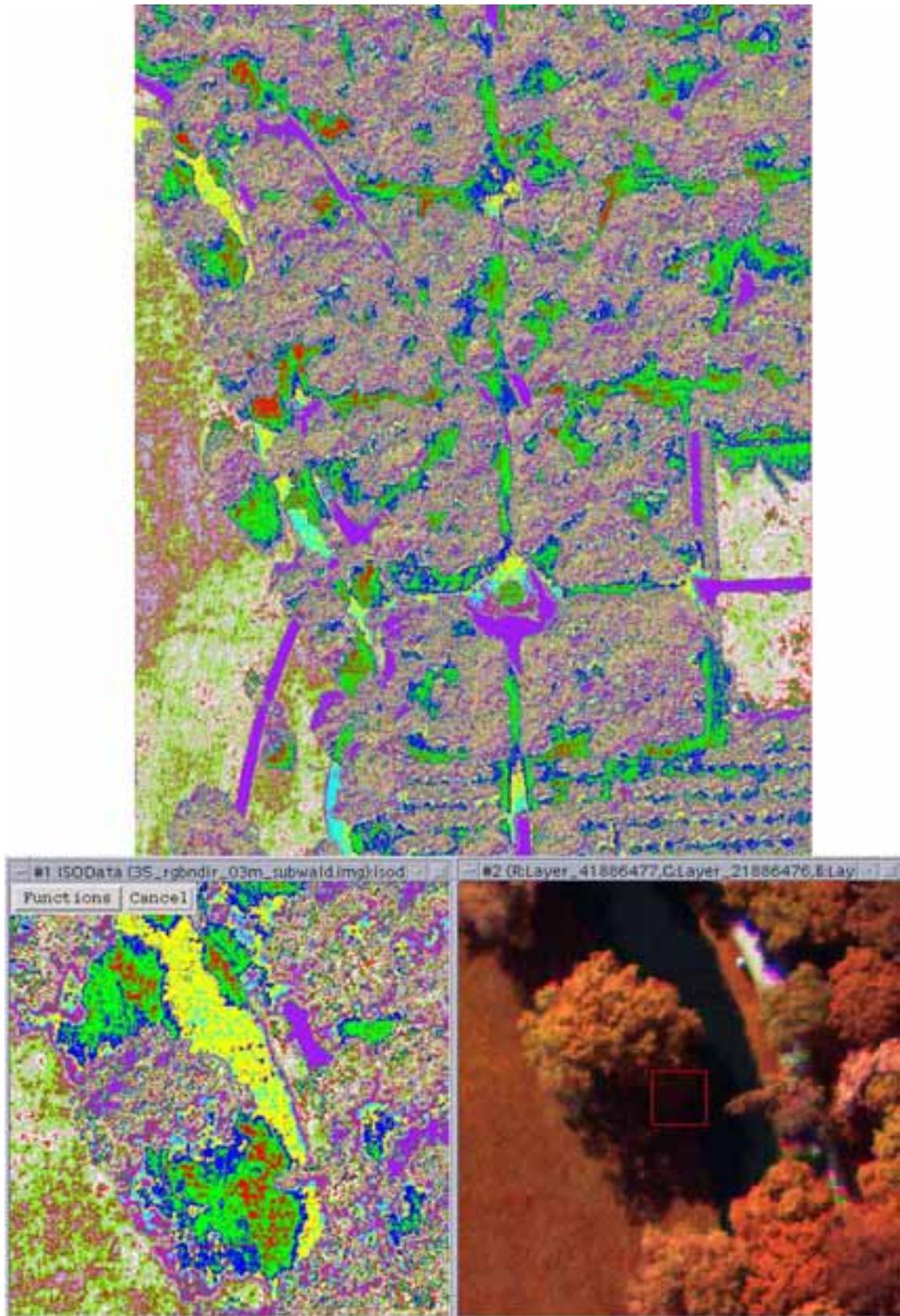


Abb. 54: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung mit 50 Klassen für den gesamten Datensatz und im Detail am Beispiel der Eiche

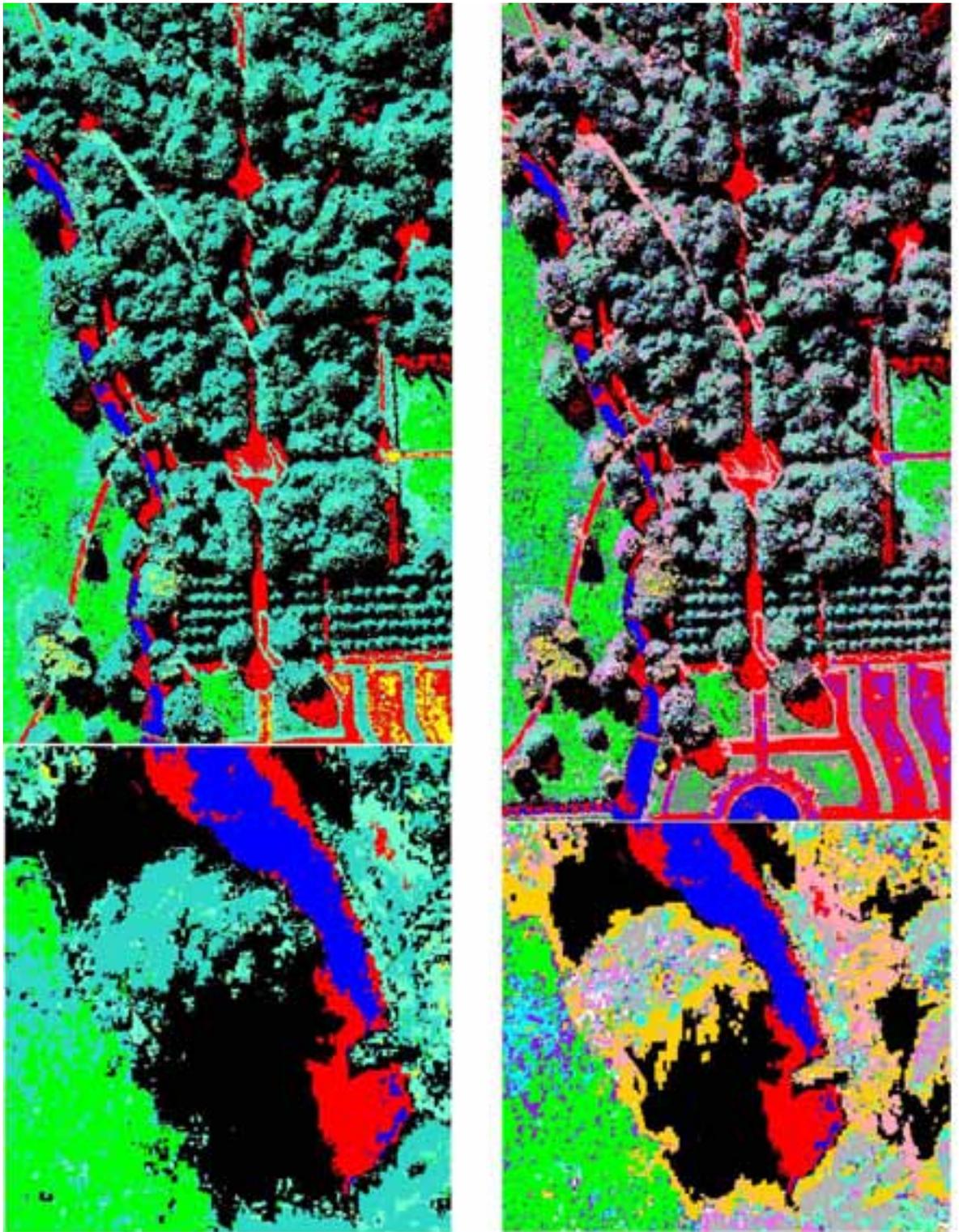


Abb. 55: Ergebnis der überwachten Klassifizierung: links die grobe Einteilung in 5 Klassen (blau = Wasser, rot = Weg, türkis = Bäume und Büsche, grün = Wiese, schwarz = Schatten u.a., gelb = Treppe), rechts das Ergebnis aus der Klassifizierung mit 48 Klassen

7.6 Überwachte Klassifizierung

Das überwachte Klassifizierungsverfahren beginnt mit einer Trainingsphase. Zunächst werden die Klassen definiert, die mittels der Klassifizierung interpretiert werden sollen. Der nächste Schritt ist die Auswahl der Trainingsgebiete im Datensatz. Diese bekannten Flächen wurden mittels einer Geländebegehung ermittelt. Die definierten Trainingsgebiete werden anschließend anhand statistischer Untersuchungen evaluiert.

7.6.1 Definition der Trainingsgebiete: Das Seed-Verfahren

Die Eintragung der Trainingsgebiete kann nach verschiedenen Methoden erfolgen:

- durch die Einzeichnung von Testgebieten am Bildschirm (Polygone)
- Übernahme von Flächen aus Arc/Info-Vektorlayern oder bereits bearbeiteten Bildern (Übernahme sogenannter Areas of Interest (AOI), geometrischer Abgrenzungen, die als Polygone abgespeichert werden)
- Wahl eines Modellpixels (Seed-Pixel), dessen spektrale Eigenschaften mit den benachbarten Pixeln verglichen werden
- Übernahme eines vorhandenen thematischen Rasterlayers (ERDAS 1997)

Für die überwachte Klassifizierung der Sanssouci-Daten wurden Seed-Pixel bestimmt. Bei der Seed-Methode identifiziert der Bearbeiter ein für das Trainingsgebiet charakteristisches Pixel. Dieses Seed-Pixel ist ein Modellpixel, mit dem die umgebenden Pixel - je nach Auswahl die vier oben, unten, rechts und links oder alle acht - spektral verglichen werden. Bei der Aufnahme der Trainingsgebiete im Gelände sollte darauf geachtet werden, möglichst große homogene Flächen zu erfassen, so daß nicht nur ein einzelnes Pixel über die aufgenommenen Eigenschaften verfügt.

Der Rechner sucht aufgrund der spektralen Eigenschaften des Seed-Pixels alle ähnlichen Nachbarpixel und faßt sie in einem Polygonzug zusammen, der als AOI abgelegt wird. Vorgegeben werden müssen die Parameter für diesen Suchvorgang: Bestimmt werden kann die maximale Polygongröße (d.h. nach wievielen gefundenen Pixeln der Suchvorgang beendet werden soll), die Nachbarzuweisung (4er oder 8er Pixelumgebung) und die spektrale Distanz. Der Suchradius wird durch die Euklidische Distanz festgelegt. Die Grauwerte der gefundenen Pixel werden als signatures in einer Datei (signature file) abgelegt, mit Hilfe dieser Datei wird der Klassifizierungsprozeß gestartet.

Die Größe der Trainingsgebiete richtet sich nach der Homogenität der Klassen, die Pixelanzahl schwankt zwischen 12 und 1000. Eine Richtzahl für die Größe der Trainingsgebiete gibt es nicht, es ist aber grundsätzlich sinnvoller, mehrere Trainingsgebiete pro Klasse einzurichten als ein großes (Grunicke 1990).

7.6.2 Bewertung der Trainingsgebiete

Die Eignung der definierten Klassen für die nachfolgende Klassifizierung und ihre spektrale Trennbarkeit wird anschließend mittels statistischer Untersuchungen geprüft. Eine Überlappung der Klassen sollte vermieden werden - ist jedoch besonders bei ähnlichen Klassen nicht zu vermeiden. Jedes der bestimmten Trainingsgebiete kann Pixel enthalten, die eigentlich zu einer anderen Einheit gehören. Die Güte der gewählten Trainingsgebiete läßt sich mittels einer *contingency* - Matrix (Kontingenz-, Zufälligkeits-, Möglichkeitsmatrix) beurteilen (siehe Anhang). Mit ihr kann die Homogenität der Trainingsgebiete überprüft werden. Die Kontingenzmatrix ist eine Fehlermatrix, für deren Berechnung lediglich die Pixel der Trainingsgebiete herangezogen werden, sie werden mit dem Ergebnis der Klassifizierung verglichen. Werden die Pixel der Trainingsgebiete falsch klassifiziert, ist bei der Bearbeitung der gesamten Szene mit erheblich höheren Fehlern zu rechnen.

Für jedes Trainingsgebiet werden die Pixel mit dem *maximum-likelihood*-Algorithmus klassifiziert und einer Einheit zugeordnet. Das Ergebnis wird in einer Matrix dargestellt, bei der die Spalten die prozentuale Zuordnung zu den jeweiligen Klassen zeigen, bei fehlerfreier Zuordnung steht hier 100%. Die Klassifizierungsgenauigkeit sollte möglichst wenig von diesem Maximalwert abweichen, um zu gewährleisten, daß die Klassen mit genügend großer Distanz voneinander gewählt worden sind. Bei der Klassifizierung selbst, bei der alle Pixel der Szene herangezogen werden, ist eine

geringere Genauigkeit zu erwarten als bei der Klassifizierung der Trainingsgebiete. Die Streuungen der Gesamteinheiten sind immer größer als die Streuungen der Musterklassen (Grunicke 1990).

Die Analyse der definierten Trainingsgebiete hilft bei der Optimierung der Klassifizierung, die spektrale Trennbarkeit der einzelnen Klassen kann so beurteilt werden. In einem iterativen Prozess werden die Klassen anschließend verändert.

Die Kontingenzmatrix der 48 Trainingsklassen zeigt gute Ergebnisse, einzelne Baumarten sind unterscheidbar, auch die anderen Klassen lassen sich trennen. Es sei jedoch darauf verwiesen, daß die Methode der Erstellung der Fehlermatrix nicht quantitativ ist, die ermittelten Genauigkeiten stellen lediglich Schätzwerte dar.

7.6.3 Klassifizierungsmethode

Für die praktische Durchführung der Klassifizierung stehen vier Methoden zur Verfügung: das *maximum-likelihood*-Verfahren (Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit), das *minimum-distance*-Verfahren (Verfahren der nächsten Nachbarschaft), das *parallel-epiped*-Verfahren (Quaderverfahren) und das *Mahalanobis-Distance*-Verfahren. Für die vorliegende Arbeit wurde die *maximum-likelihood*-Methode gewählt, auf die anderen Verfahren soll hier nicht eingegangen werden.

Die *maximum-likelihood*-Methode ist die präziseste Methode (ERDAS 1994). Sie verwendet zusätzlich zu den objektklassenspezifischen Grauwerten deren kanalweise Korrelation (Allewelt 1987). Anhand statistischer Komponenten der vorgegebenen Klassen wird die Wahrscheinlichkeit errechnet, mit denen die einzelnen Bildelemente zu diesen Klassen gehören. Eine Zuordnung der Pixel erfolgt dann zur Klasse mit der höchsten Wahrscheinlichkeit (Grunicke 1990). Dabei unterstellt man, daß die Meßdaten der Bildelemente jeder Objektklasse im Merkmalsraum eine Normalverteilung um den Klassenmittelpunkt aufweisen. Bei starker Korrelation innerhalb der Kanäle kommt es dann zur Bildung von Ellipsoiden mit Ebenen gleicher Wahrscheinlichkeit, sogenannter Mahalanobis-Ellipsoiden (Prinz 1998). Jedes Pixel wird nur einer Klasse zugeordnet. Besonders bei schwer trennbaren Klassen - d.h. sich in den Kanälen überschneidenden Bereichen - ist das maximum-likelihood-Verfahren von Vorteil (Itten 1980). Nachteil ist die benötigte Rechenzeit, die von allen zur Verfügung stehenden Klassifizierungsalgorithmen die höchste ist. Die Rechenzeit steigt mit der Anzahl der Kanäle drastisch an (Bauer 1994).

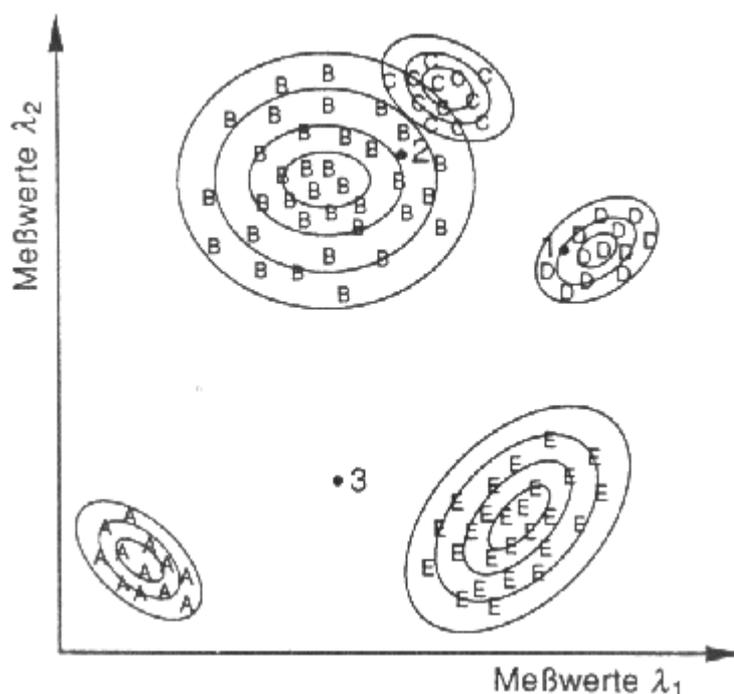


Abb. 56: Schematische Definition von Pixel-Klassen über Ellipsoide gleicher Wahrscheinlichkeit (Albertz 1991)

Gleichzeitig wurde ein *distance-file* gerechnet, ein wichtiges Werkzeug zur Beurteilung des Klassifizierungsergebnisses. Es wird ein Schwarzweißbild erstellt, das für jedes Pixel die Eindeutigkeit der Zuordnung berechnet. Schwarz bedeutet eine eindeutige Zugehörigkeit des klassifizierten Pixels zu einer Klasse, d.h. eine größere spektrale Nähe zum Trainingsgebiet, weiße Pixel konnten nicht eindeutig zugeordnet werden und zeigen mögliche falsche Zuordnungen an. Die Trainingsgebiete sollten im distance file tiefschwarz erscheinen, also eindeutig zugeordnet worden sein (ERDAS 1997).

7.6.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der überwachten Klassifizierung

Bereits die grobe Einteilung des Datensatzes in sechs Klassen zeigt wenig befriedigende Ergebnisse, die visuell gut zu unterscheidenden großen Einheiten Wiese, Wald, Wege, Wasser und Schatten können mittels des überwachten Klassifizierungsprozesses nicht eindeutig voneinander unterschieden werden, dies bestätigt das Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung. Besonders die Unterscheidung von Wasser und Schatten und von Wiese und Wald bereitet Probleme.

Ein diffuses Ergebnisbild liefert die überwachte Klassifizierung mit 48 Klassen. Zwar zeigt die Untersuchung der contingency matrix eine zufriedenstellende spektrale Trennbarkeit der Klassen, dieses Verfahren berücksichtigt jedoch lediglich die eintrainierten Bereiche und vergleicht diese mit dem Ergebnis der Klassifizierung.

Bei der Klassifizierung können die einzelnen Bäume nicht voneinander unterschieden werden. Der Beispielbaum Eiche zeigt sich nach der Klassifizierung als eine diffuse Pixelwolke, die Krone wird zehn verschiedenen Klassen zugeordnet. Nicht trennbar sind auch Schatten, Wege und Wasser. Eindeutig abgrenzbar sind Wege und Treppen von der Umgebung, allerdings nicht als einzelne Klassen. In den Kronen einzelner Bäume (Platane, Kastanie) finden sich fehlklassifizierte Treppenpixel.

7.6.5 Maskierungen zur Verbesserung der Klassifizierung

Zur Verbesserung der Klassifizierung wurde versucht, überflüssige Informationen mit Hilfe des Oberflächenmodells herauszufiltern. Um lediglich das Waldgebiet des Parks näher zu untersuchen, konnte auf die Bodeninformation verzichtet werden, um die Komplexität des Datensatzes zu reduzieren.



Abb. 57: Mit Hilfe des DOM maskierter Datensatz

Bei der Maskierung war die Qualität des Oberflächenmodells die limitierende Größe. Insbesondere in den dicht bewachsenen Gebieten des Parks konnten die schmalen Wege nicht von den Baumkronen unterschieden werden. Ferner blieben auch nach der Maskierung die verschiedenen Farbsäume sichtbar, die sich insbesondere am Rand der Baumkronen sichtbar bilden.

Aufgrund der beschriebenen Einschränkungen kann die Komplexität des Datensatzes nur bedingt verringert werden, da Bereiche der Wiesen, Wege etc. nach wie vor im Datensatz zu finden sind (Abb. 57).

7.7 Zusammenfassung

Die Untersuchung verschiedener standardmäßig angewendeter Analyseverfahren der Fernerkundung zeigt die Problematik der Auswertung hochauflösender Daten. Die vorgestellten zumeist pixelweise arbeitenden Verfahren stoßen sehr schnell an Grenzen, die Ergebnisse sind unbefriedigend.

Die Klassifizierung von Daten beruht auf einer Reihe grundsätzlicher Annahmen über die Daten selbst und die Objekte, die abgebildet werden. Hildebrandt (1996) faßt diese grundsätzlichen Hypothesen zusammen:

Annahme 1: Die spektralen Reflexionseigenschaften bestimmter Objekte bzw. Objektklassen sind gleichartig. Sie unterscheiden sich von denen anderer Objekte oder Objektklassen.

Annahme 2: Bei gleichartigen Beleuchtungsverhältnissen und Aufnahmebedingungen zeigen – infolge der ersten Annahme – bestimmte Objekte/Objektklassen im Rahmen einer objektspezifischen Varianz in einem oder mehreren Spektralbereichen der Aufzeichnung gleichartige spektrale Signaturen

Annahme 3: Verschiedenartige Objekte/Objektklassen, deren spektrale Signaturen weitgehend gleich sind, können durch Einführung künstlicher Kanäle mit topographischen oder/und thematischen Informationen unterschieden werden.

Annahme 4: Auf unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse und Aufnahmebedingungen zurückgehende Signaturunterschiede innerhalb einer Objektklasse können durch digitale Bildverbesserungen und/oder Hinzunahme von Zusatzinformationen ausgeglichen werden (Hildebrandt 1996).

Diese Bedingungen werden von hochauflösenden Daten nur eingeschränkt erfüllt. Die Komponenten, aus denen sich die Objekte zusammensetzen, sind nur bedingt spektral zu unterscheiden, so limitiert beispielsweise die gleiche Beschaffenheit von Strassen und Hausdächern die Unterscheidbarkeit, auch ein künstlicher Kanal kann hier nicht helfen. Ohne die zusätzliche Information über Form oder Nachbarschaften kann kein eindeutiges Ergebnis erzielt werden. Abbildung 58 verdeutlicht die Problematik. Der gezeigte Ausschnitt aus einer Eichenkrone hat eine Ausdehnung von 12 mal 18 Pixeln und entspricht rund 20 m². Die 216 abgebildeten Pixel dieses kleinen Bereiches verteilen sich auf 37 der möglichen 255 Grauwerte im Bereich von 27 bis 255.

Die Heterogenität der gezeigten Baumkrone, die sich in hochauflösenden Daten (15 bzw. 30 cm) aus Blätterwerk, Stamm, Schatten plus eventuell Boden, Frucht, Blüten, Wurzel zusammensetzt, läßt die Erkennung der Einheit „Baum“ nicht zu. Die Krone zerfällt bei einer multispektralen Klassifizierung in die Einheiten Blatt/ Stamm/ Schatten etc., die untere Abbildung zeigt das Ergebnis der überwachten Klassifizierung und die Aufteilung der 216 Pixel in zehn der 47 definierten Klassen. Lösung für dieses Problem ist der Einsatz von Klassifizierungsalgorithmen, die in der Lage sind, größere Strukturen – die nicht ausschließlich spektral definiert sind - zu erkennen und zuzuordnen. Geeignete Algorithmen, die Texturen erkennen können, gibt es bisher nur ansatzweise. Die Entwicklung geeigneter Algorithmen zur Mustererkennung ist zur Zeit ein wichtiger Zweig der Forschung.

Erschwerend zu dem bereits beschriebenen Problem der Klassifizierung hochauflösender Daten kommen die Besonderheiten der HRSC-A-Datensätze, genannt seien die Farbsäume, die bei der Kombination verschiedener Farbkanäle entstehen und die verschiedenen Blickwinkel. Die Pixel liegen nicht exakt übereinander, dies erschwert pixelweise Vorgehensweisen. Eine Signaturanalyse, wie sie bei überwachten Klassifizierungen üblich ist, wird dadurch unmöglich. Egal, ob unüberwacht oder überwacht vorgegangen wird, entstehen bei Klassifizierungen durch die

Farbsäume neue Klassen, die auch bei der weiteren Verarbeitung der Daten nicht sinnvoll zugeordnet werden können.

Die statistischen Verfahren zeigten sich als bedingt aussagekräftig. Im Rahmen der Korrelationsanalyse, der Hauptkomponentenanalyse und der Untersuchung der Grauwertverteilungen für die verschiedenen Kanäle wird vorwiegend die Gesamtmenge der Pixel in den einzelnen Kanälen bearbeitet. Diese Methoden erweisen sich somit als robust gegen Pixelversätze und zur Analyse geeignet. Die Korrelationsanalyse der Daten zeigt eine hohe Redundanz der fünf untersuchten Kanäle der HRSC-A-Daten, dies wird bestätigt durch die Hauptkomponentenanalyse, die durch die verschiedene Geometrie der Daten nur eingeschränkt verwendbare Ergebnisse liefert. Die Pixelsäume, die bei der Kombination verschiedener Farbkanäle entstehen, verschwinden erst bei Auflösungen von einem bis drei Metern, dies konnte durch die Anwendung der PSF gezeigt werden.

Bei der Bestimmung des Vegetationsindex NDVI limitieren die verschiedenen Geometrien in den Kanälen das Ergebnis. Als problematisch erwiesen sich ferner die spektralen Bandbreiten der Kanäle. Da das NDVI-Verfahren pixelweise die beiden Eingangskanäle vergleicht, ist das Ergebnis insbesondere an den Rändern von Objekten nicht zuverlässig. Als hilfreich erweist sich der Einsatz des NDVI erst bei gröberen Auflösungen (> 1 m). Die thematische Unterscheidung zwischen Vegetation und Nichtvegetation läßt eine erhebliche Reduzierung der Auflösung ohnehin sinnvoll erscheinen.

Die unüberwachte Klassifizierung der Daten lieferte ein sehr heterogenes Ergebnisbild, das nicht weiter interpretierbar war. Es konnten weder die groben Einheiten Wasser, Bäume, Wiese, Wege/Treppe, Schatten voneinander unterschieden werden noch einzelne Objekte klassifiziert werden. Das Ergebnis der überwachten Klassifizierung mit 48 Klassen zeigte ebenfalls ein uneinheitliches Bild (salt and pepper), die definierten Klassen konnten nicht wiedergefunden werden, eine Unterscheidung der Grundeinheiten war nicht möglich.

Zu Interpretation von hochauflösenden Datensätze werden Verfahren benötigt, die

- sich robuster bei Pixelversätzen verhalten
- größere semantische Einheiten betrachten als die Pixelebene, aber dennoch im Detail die hohe räumliche Auflösung für die Analyse beibehalten

8 Neue Klassifizierungsmethoden für hochauflösende Daten: Ein per-parcel-Ansatz

Die Problematik der automatisierten Interpretation hochauflösender Daten wurde bereits ausführlich in der Einleitung diskutiert. Bisher standen als Geobasisdaten für Anwendungen in großer Auflösung (> 1:10 000) lediglich Luftbilder zur Verfügung. Zunehmend werden diese analogen Daten abgelöst durch digitale Daten, die von neuartigen flugzeuggetragenen Kamerasystemen aufgenommen werden. Die hohen Auflösungen dieser Sensoren (bis 10 cm) stellen neue Anforderungen an die Auswertungsmethoden. Konventionelle per-pixel-Ansätze zur Landnutzungsklassifizierung von räumlich hochaufgelösten Daten erweisen sich als unbrauchbar, wenn der beobachtete und aufgezeichnete Maßstab der Daten größer ist als der Maßstab der zu erfassenden Landnutzung (Woodcock & Strahler 1987). Dies ist im vorgestellten Beispiel eines Forstgebietes der Fall, die 15-cm-Pixel der Daten bilden lediglich Teile einer einzigen Baumkrone ab.

Bei hohen räumlichen Auflösungen wird eine Maßstabsgrenze überschritten, die Information, die für ein einzelnes Pixel aufgenommen wird, ist nicht mehr verknüpft mit dem Charakter von Objekten oder Gebieten als Ganzes, sondern mit einzelnen Komponenten der Objekte. Dies erfordert eine Neudefinition der Information, die extrahiert werden kann. Einfache pixelbasierte Analysen stellen sich als ungeeignet für bestimmte Aufgaben und Gebiete heraus. Für die Zuordnung zu Klassen wird bei pixelorientierten Verfahren lediglich die spektrale Information jedes einzelnen Pixels genutzt, nicht aber die Information über ihre Lage und ihre Nachbarschaften. Pixelgruppen in thematisch homogenen Regionen werden somit häufig nicht denselben Klassen zugeordnet, Gründe hierfür sind atmosphärische Effekte, Variationen der Oberfläche oder Rauschen. Die Ergebnisse pixelbasierter Auswertungen wirken oft uneinheitlich (salt and pepper Effekt). Die Berücksichtigung von Kontext und räumlichen Zugehörigkeiten in der Analyse verbessert die Ergebnisse von Klassifizierungen. Parcel-orientierte Analysen, die alle Pixel eines definierten Gebietes als zusammengehörig ansprechen, berücksichtigen diese Parameter.

Parcel-basierte Analysen können in einer integrierten GIS-Umgebung durchgeführt werden, in der Rasterdaten, Vektordaten und Zusatzinformationen gemeinsam analysiert werden können. Bisher war es nicht möglich, Rasterdaten und Vektor-Datensätze operationell zu bearbeiten. In Experimenten wurde die Kombination von Vektor- und Rasterkarten zur Verbesserung von Segmentierungen und von Landnutzungsklassifizierungen genutzt (Harris & Ventura 1995, Tso & Mather 1999).

Die Integration von GIS und Fernerkundung, also die gleichzeitige Verfügbarkeit von GIS-Werkzeugen und Bildanalysemethoden, ist eine neue Entwicklung. In dem vorgestellten Ansatz werden die definierten land-parcel als eine Einheit angesehen, die individuellen Pixelwerte innerhalb dieser Einheit werden statistisch ausgewertet und gewichtet. Die per-parcel-Verfahren wurden im Rahmen von Landnutzungsanalysen mit Satellitendaten entwickelt und beispielsweise für die Erstellung der Land Cover Map of Great Britain angewendet (Smith et al. 1998, 2000). Anwendung fand der Ansatz ferner bei der Analyse von Übergangsbereichen von Stadt zu Land (Wang et al. 1997), zur Aktualisierung von Daten im Rahmen des Forstmanagements (Skelsey 1996) und dem Monitoring in städtischen Gebieten (Priestnall & Glover 1997). Die Methode erweist sich auch für andere Anwendungen und große Maßstäbe als vorteilhaft (Smith et al. 2000).

Nachfolgend wird eine Methode zur Klassifizierung hochauflösender Daten in Landnutzungsklassen beschrieben. Ziel ist die automatisierte Interpretation von hochauflösenden Daten, die sich nicht auf Einzelpixel bezieht, sondern in Einheiten (parcel) klassifiziert. Untersucht wurde ein Forstgebiet im Tharandter Wald, die Daten wurden mit dem digitalen Kamerasystem HRSC-A aufgenommen. Der Ansatz wird mit Hilfe des Softwarepaketes „Integrated Geographical Information Systems“ (IGIS) der Firma LaserScan umgesetzt.

8.1 Das Untersuchungsgebiet Tharandter Wald

Der Tharandter Wald ist ein Forstgebiet nahe Dresden, das sich durch heterogene Stände auszeichnet. Es sind sowohl Laubbaumbestände großer Diversität zu finden wie auch Nadelwälder und gemischte Bestände verschiedener Altersstruktur. Der Tharandter Wald eignet sich deshalb besonders gut als Testgebiet zur Untersuchung diverser Forstparameter.

8.2 Verfügbare Daten

8.2.1 Fernerkundungsdaten

Daten der digitalen Kamera HRSC-A

2. September 1998

21. Oktober 1998

5. Mai 1999

Luftbilddaten

Sw-Luftbilder aus der Befliegung vom **23. Oktober 1998**, Streifen 9, (Bilder Nr. 2154, 2155, 2156, 2206, 2207, 2208,) und vom **18. April 1996** (Bilder 1800 und 1807), Aufnahmemaßstab jeweils 1:16 000, zur Verfügung gestellt vom Landesvermessungsamt Sachsen.

Es wurden Vektordaten verwendet, die abgeleitet wurden aus CIR-Luftbildern (Befliegung 1992 und 1993), die Luftbilder selbst waren nicht verfügbar.

Tab. 27: Untersuchungsgebiet Tharandter Wald: Die Datenlage

	HRSC	Luftbildkarte	Luftbilder	Vektordatensatz	Datenbank
	multispektral	s/w	s/w	Biotoptypen	Forstparameter
Aufnahmedatum	21. Okt. 1998 5. Sept. 1999 2. Sept. 1998	23. Okt. 1998	April 1996 Oktober 1998	1992 und 1993, visuelle Interpretation auf Grundlage von CIR- Luftbilder aus 1992	1998 Punktueller Aufnahme (15 m Umkreis)
Flughöhe	3000 m	2500 m	2500 m	2500 m	
geom. Auflösung	25 cm	40 cm	40 cm Abb.- maßstab: 1:16 000)	40 cm	
	Mosaik aus 2 Bildstreifen	Mosaik aus 4 (2) Luftbildern	Einzelbilder	Einzelbilder	
Projektion	Gauss-Krüger	Gauss-Krüger	Gauss-Krüger	keine (unentzerrte Zentralperspektive)	Gauss-Krüger (Koordinaten aus TK25)
Bezugs- ellipsoid	Bessel	Bessel	Bessel	ohne	
Höhen- bezug	NN	HN	HN	ohne	
Gelände- modell	DOM	DGM	DGM	ohne	
Genauig- keit: Höhe	15 – 20 cm	< 2m	< 2m	unentzerrt	
Lage	15 – 20 cm	< 1m	< 1m	unentzerrt	

8.2.2 Kartenmaterial

Topographische Karten

TK 10

Blatt 5046-NO (Hetzdorf), 5047-NW (Tharandt), 5046-SO (Colmnitz), 5047-SW (Klingenberg)

TK 25

5046 Freiberg

5047 Freital

TK 50

L5146 Freiberg

LBK 10

L5146 Freiberg

Digitale **Orthobilddaten** des Blattes entsprechend dem TK 10 Blatt 5047-NW

8.2.3 Zusätzliche Datenquellen

Vektordatensatz (arc info) einer Biotoptypenkartierung auf Grundlage einer visuellen Interpretation von unentzerrten Colorinfrarotbildern (Aufnahme 1992 und 1993)

CIR Blätter der TK 10 AV Blätter 1309111/112/113/114, 1308222/223/224, zur Verfügung gestellt vom sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG), Liste der Kartiereinheiten im Anhang

Die CIR-Daten geben Auskunft über den Ist-Zustand der Landschaftsausstattung (z.B. Lage, Anzahl, Größe, Struktur und räumliche Einbindung von Biotoptypen) in den Jahren 1992 und 1993 im Freistaat Sachsen. Die Daten sind unterteilt in Polygon-, Linien- und in Punktcoverages. Erfassung der Daten im Auftrag des LfUG 1992/93, die Digitalisierung wurde 1998 abgeschlossen.

Datenbank mit punktuellen Einzelbaumaufnahmen (je im Durchmesser von 15 m) im Tharandter Wald aus einer Geländekampagne der TU Dresden.

8.2.4 Geländeuntersuchungen

Das Testgebiet im Tharandter Wald wurde im Rahmen von zwei Geländebegehungen mit Mitarbeitern der TU Dresden in Tharandt aufgenommen.

Ferner konnte der im Jahr 1999 von Studenten im Gelände erhobene Datensatz genutzt werden. Geländeaufnahme der TU Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften in Tharandt, Fachrichtung Forstwissenschaften, vom Herbst 1998.

8.2.5 Beurteilung der Daten

Zur Verfügung stand ein Mosaik aus zwei Flugstreifen der digitalen Kamera HRSC-A, das den zentralen Bereich des Tharandter Waldes abdeckt. Der Datensatz wurde in Nord-Süd-Richtung im Photometrie-Modus aus einer Flughöhe von 3000 m aufgenommen, der Nadir hat eine Auflösung von 15 cm. Das ausgewählte Testgebiet liegt vollständig im westlichen Streifen. Aufgrund eines technischen Problems mit den Navigationsdaten konnten die Daten der ersten Befliegung vom September 1998 nicht prozessiert werden, somit waren lediglich die Rohdaten verfügbar, die für eine Klassifizierung/Verknüpfung mit anderen Daten nicht geeignet sind. Die Wiederholungsbefliegung fand am 21. Oktober 1998 unter relativ schlechten windigen Bedingungen statt. Die Befliegungszeit war mit 15.30 Uhr für diese Jahreszeit sehr spät, der Sonnenstand niedrig. Vor diesem Hintergrund haben die Daten eine gute Qualität. Objekte sind visuell gut differenzierbar, die Waldbereiche wirken kontrastreich, obwohl der Grauwertbereich des Datensatzes mit 70 DN nicht groß ist. Zahlreiche unterschiedliche Kronenformen und -farben sind zu sehen. In den Baumkronen sind Differenzierungen möglich, die einzelnen Kronen sind eindeutig voneinander unterscheidbar, die Schattenbereiche lassen Details erkennen. Der Datensatz wirkt ausgewogen belichtet.

Ferner lagen Schwarz-weiß-Luftbildaufnahmen vor. Diese Luftbilder wurden im Rahmen einer Nachbefliegung am 23. Oktober 1998 aufgenommen, zwei Tage nach der Datenaufnahme mit der HRSC-Kamera. Mit Hilfe dieser Luftbilder wurde auch ein Teil des Vergleichs der beiden Systeme realisiert. Die zeitliche Nähe macht den Vergleich der beiden Produkte verlässlicher, jahreszeitliche Differenzen der Daten können weitgehend ausgeschlossen werden. Aufnahmemaßstab war 1:16000. Die Luftbilder wurden mit einer Auflösung von 40 cm gescannt, für die Auswertung wurde das digital vorliegende Orthobildmosaik aus vier Luftbildern verwendet. Die gescannten Luftbilddaten haben einen Grauwertumfang von knapp 100 DN.

8.2.6 Grundlagen der verwendeten Orthobilder

Grundlage der topographischen Landesaufnahmen des Landesvermessungsamtes Sachsen bilden Luftbilder im Maßstab 1 : 16 000. Zur Aktualisierung topographischer Karten wird jährlich ein Fünftel des Landes befliegen, in Siedlungsräumen mit reger Bautätigkeit ist dieser Zyklus kürzer. Geflogen wird in 2 500 m Höhe, die Genauigkeit der Luftbilder wird vom Landesvermessungsamt mit bis zu 25 cm angegeben. Das Orthobild im verwendeten Blattschnitt TK 10, Blatt 5047-NW Tharandter Wald, wurde aus vier Luftbildern mosaickiert.

Die geodätischen Grundlagen des Datensatzes: Bezugsellipsoid ist das Besselipsoid, die Abbildung erfolgt üblicherweise im 3°-Meridianstreifensystem, Mittelmeridian ist in diesem Fall der 15°-Meridian östlich Greenwich (Streifen 5). Koordinatensystem ist Gauss-Krüger, Bezugspunkt ist Höhennull (HN, Kronstädter Pegel.) Die Differenz zu Normalnull (NN, Amsterdamer Pegel) beträgt durchschnittlich +0,1m (NN = HN + 0,1 m). Der HRSC-Datensatz wurde ebenfalls im Gauß-Krüger Koordinatensystem prozessiert, Bezugsellipsoid ist ebenfalls Bessel, Bezugspunkt ist dagegen NN.

8.2.7 Überlagerung mit Vektordaten

Für die Bearbeitung der Tharandt-Daten waren Datensätze zu kombinieren, die auf drei verschiedenen Geometrien beruhen: Orthobilderstellung mit Grundlage eines Geländemodells, eines Höhenmodells und unentzerrte Originaldaten. Die Zusammenführung der verschiedenen Datensätze bereitete demzufolge erwartungsgemäß Probleme. Als besonders schwierig erwies sich die Überlagerung von digitalen Kameradaten und dem Vektordatensatz, der auf der Grundlage unentzerrter Luftbilder entstanden war (Abb. 59). Durch die aufnahmebedingten geometrischen Verzerrungen der Luftbilder im Kronenbereich (radiale Versätze) paßten die digitalen Kameradaten nicht mit den gescannten Orthobilddaten zusammen, die Übereinstimmung auf Geländeneiveau war hingegen sehr gut (Abb. 59).

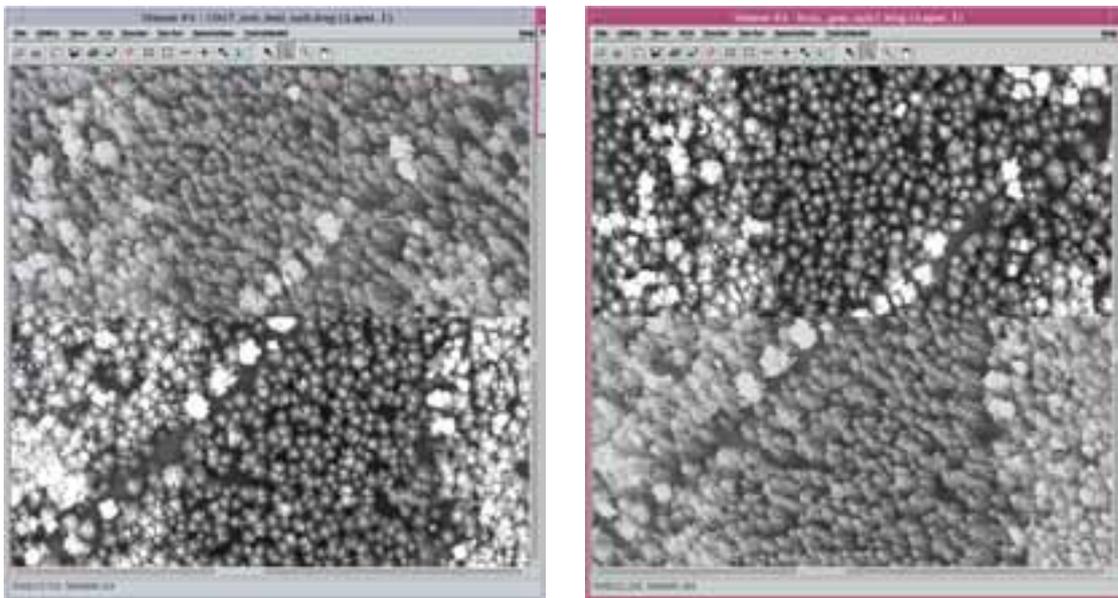


Abb. 59: Forstgebiet Tharandter Wald: Beide Bilder zeigen jeweils denselben Ausschnitt, links mit HRSC-A (Nadir) oben und Luftbild unten, rechts zeigt oben Luftbild, unten HRSC-A-Daten. Radiale Versätze in den Luftbilddaten erschweren die Auswertung.

Die sächsische Landesregierung gab 1992 erstmalig eine Biotoptypenkartierung in Auftrag. Grundlage waren Colorinfrarot-Luftbilder, die im Sommer 1992 bzw. 1993 aufgenommen wurden. Die Interpretation erfolgte stereoskopisch nach einem Biotoptypenschlüssel (siehe Anhang). Die Flächen wurden anschließend umgezeichnet und mit dem Softwarepaket AUTOCAD digitalisiert. Die Topologiebildung und Attributierung erfolgte schließlich in arc/info, die Digitalisierungsarbeiten wurden 1998 abgeschlossen.

Die Luftbilder, die als Auswertungsgrundlage dienten, waren geometrisch nicht entzerrt. Somit waren auch die Vektordatensätze, die aus der Interpretation der Daten resultierten, unentzerrt. Dies machte eine Überlagerung mit den vorliegenden Orthobildern von HRSC und Luftbild nur bedingt sinnvoll, die Verzerrungen aus den unentzerrten Luftbildern setzen sich als unsystematischer Fehler in den Vektordatensätzen fort (s. Abb. 60). Neben der unentzerrten Interpretationsgrundlage bereiteten die luftbildtypischen radialen Versätze Probleme. Je nach Bildhauptpunkt klappen die Bäume in den Luftbildern radial zu den unterschiedlichen Seiten. Die Biotoptypenkartierung konnte somit lediglich als Anhalt dienen.

Diese Vektordaten dienten ursprünglich als Referenz für die Klassifizierung, sie definierten die Landeinheiten (parcel). Im Verlauf der Analyse stellte sich heraus, daß neben den verschiedenen Geometrien der beiden Datensätze auch der Inhalt des Vektordatensatzes problematisch war, eine Aktualisierung war nötig, um eine verlässliche Referenz verfügbar zu haben.

Somit wurde der HRSC-A-Datensatz nach dem Interpretationsschlüssel zur Biotopkartierung neu visuell interpretiert, die neu definierten Polygone wurden anschließend digitalisiert und attribuiert.

8.2.8 Exkurs: Grundsätzliche Anmerkung zum Problem der Projektionen

Projektionsdifferenzen schaffen erhebliche Probleme in GIS-Applikationen bei der Verschneidung von Daten verschiedenster Quellen und bei der Kombination von Raster- und Vektordatensätzen, wenn das präzise Überlagern von Daten essentiell für die Gewinnung von Zusatzinformationen ist. Im Testgebiet Tharandter Wald wurden Datensätze mit drei verschiedenen Höhenbezügen und Projektionen verwendet. Die Umrechnung dieser Datensätze ist kompliziert.

Für die Transformation von einem Datum in ein anderes sind sieben Transformationskoeffizienten vonnöten, um eine weitgehend genaue Umrechnung zu garantieren. Diese Koeffizienten werden von den Vermessungsämtern berechnet und sind oft nicht erhältlich. Selbst bei Kenntnis der Umrechnungsparameter bleibt ein Restfehler z.B. durch Rundungen.

Ferner ist das **Potsdamer Datum**, Standarddatum für das Besselellipsoid und somit das am häufigsten verwandte Datum in Deutschland, nicht einheitlich definiert. Diese unterschiedlichen Definitionen hängen mit den verschiedenen Kampagnen zusammen, in welchen die Parameter für das Potsdamer Datum festgelegt wurden. Genaue Informationen, welche Datumparameter benutzt wurden, sind oft nicht erhältlich. So kommt es vor, daß beispielsweise die im Softwarepaket festgelegten Parameter nicht mit denen der verwendeten Karte übereinstimmen oder verschiedene Programme die Parameter für das Potsdamer Datum unterschiedlich definieren.

Besondere Probleme bereiten Übergangsbereiche der Meridianstreifen im Bessel-System. Bei dem Tharandter Datensatz erwies sich dies als besonders zeitaufwendige Problematik, das Trainingsgebiet liegt im Wechsel zweier Meridianstreifen (12 und 15 Grad, 4 und 5), d.h. Referenzdatensätze lagen in verschiedenen Koordinaten vor und mußten durch Umrechnung vereinheitlicht werden.

In einer rasant wachsenden Welt der Geoinformationssysteme, die sich aus verschiedensten Datenquellen speisen, ist die Festlegung einer einheitlichen Projektion erforderlich, so daß zumindest lokal Datensätze desselben Gebietes aus verschiedenen Quellen deckungsgleich sind.

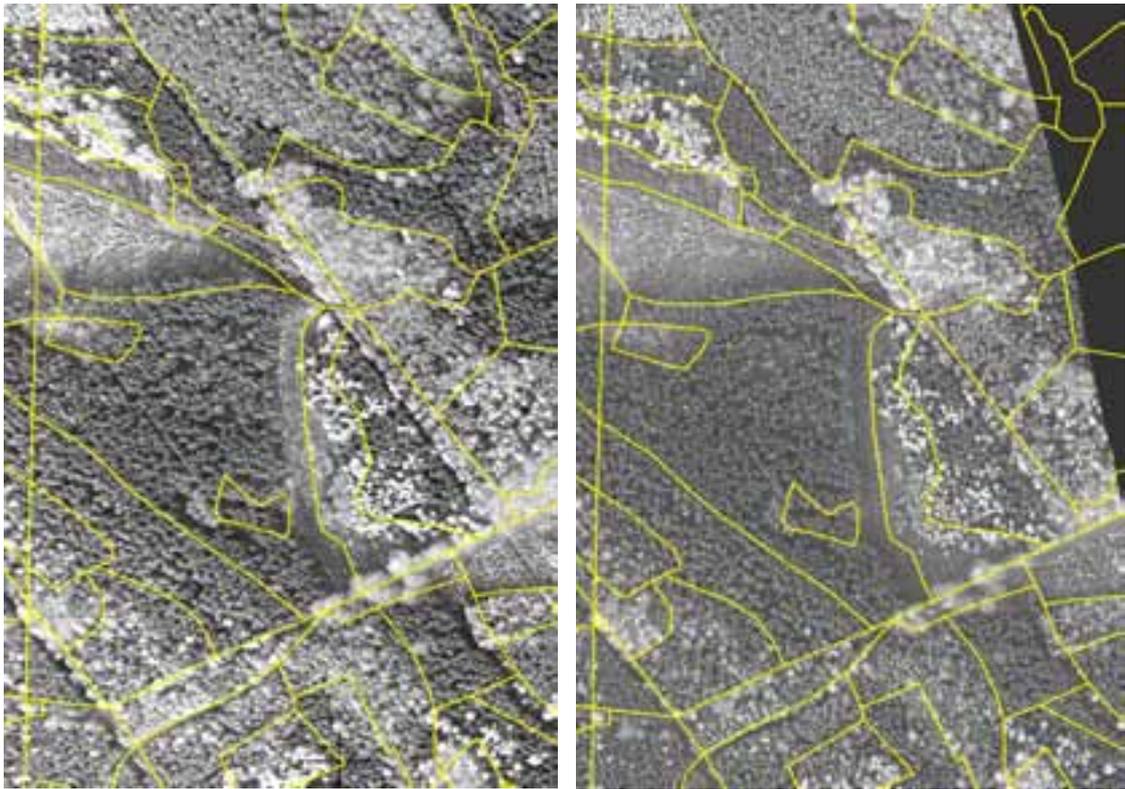


Abb. 60: Mit dem Vektordatensatz der Biotoptypenkartierungen überlagerte Luftbilddaten (links) und HRSC-A-Daten (rechts)

Bei der parallelen Nutzung von HRSC-A und Luftbilddaten gibt es ein weiteres Problem der Erdanbindung. Die Orthobildgenerierung der Luftbilder hat als Grundlage ein Digitales Geländehöhenmodell. Die zentralperspektivische Abbildung des Luftbildes wird mittels dieses Geländemodells in die Orthogonalprojektion einer topographischen Karte überführt. Aufgrund der Lageverzerrungen bei Höhenunterschieden im abgebildeten Gelände liefert ein Luftbild keine genauen Maße. Eine differentielle Entzerrung (Orthoprojektion) liefert eingeschränkt lagegenaue Luftbilddarstellungen. Voraussetzung für dieses Verfahren ist die genaue Kenntnis der Reliefformen des abgebildeten Geländes. Diese Information liefert das Digitale Geländehöhenmodell (DGM). Es liegt bundeseinheitlich gestaltet als ATKIS-DGM 25 mit 20 m-Gitter vor, der mittlere Punkthöhenfehler wird mit $< 2\text{m}$ angegeben (bzw. $< 1\text{ m}$ nach einer mündlichen Angabe des Landesvermessungsamtes Sachsen). Die Genauigkeit der Orthobilddaten ist durch einen Lagefehler $< 0,5\text{ m}$ bestimmt (LVA Sachsen 1998).

Hier gilt jedoch eine wichtige Einschränkung: Diese Genauigkeitsangaben gelten nur für die Geländehöhe, darüber aufragende Objekte bleiben unentzerrt. Das heißt, Gebäude, Bäume und sonstige Stadt- und Landschaftselemente bleiben unentzerrt, auch der durch das Aufnahmeprinzip verursachte radiale Versatz von Objekten wird nicht korrigiert. Sie werden nicht lagegenau abgebildet, die Position dieser Objekte ist eher zufällig bestimmt durch ihre Lage auf dem Bild (Mitte oder Rand). Die Orthobilder aus HRSC-Daten werden mit Hilfe eines Digitalen Oberflächenmodells gewonnen. Ergebnis der Prozessierung sind Orthobilder, die mit einer Genauigkeit von 15 cm (x,y,z) die Erdoberfläche abbilden. Verzerrungen, die sich durch die Geländeneigungen/Höhenunterschiede ergeben, werden weitgehend eliminiert, Häuser und Geländeoberflächen geometrisch weitgehend richtig abgebildet.

Für Anwendungen, die sich mit Objekten oberhalb der Erdoberfläche beschäftigen, sind die HRSC-Daten somit besser geeignet, da Geometrie und Lage dieser Objekte realistisch wiedergegeben werden. Ein visueller Vergleich von Luftbild und HRSC-A-Daten zeigt, daß Objekte auf Geländeniveau wie z. B. Straßen geometrisch sehr genau übereinstimmen (Abb. 24). Objekte, die über der Geländeoberfläche aufragen (Bäume, Gebäude, etc.) sind nicht deckungsgleich, dies führt zu Versätzen.

8.2.9 Vorbereitung der Daten, Zielsetzung

Für die per-parcel-Analyse werden Rasterdatensätze benötigt und ein (Vektor-)Datensatz, der die Eingangsdaten in Einheiten „vorsortiert“. Hierfür diene zunächst der Vektordatensatz der CIR-Interpretation.

Da die Ergebnisse der Biotoptypenkartierung nicht zur Definition dieser Einheiten genutzt werden konnten, wurde zunächst der multispektrale Datensatz der HRSC-A anhand des vorhandenen Interpretationsschlüssels visuell interpretiert. Hierbei wurden verschiedene Einheiten unterschiedlicher Forstnutzung, Infrastruktur, Acker etc. unterschieden (Interpretationsschlüssel siehe Anhang). Anschließend wurden die Ergebnisse digitalisiert, Topologiebildung und Attributierung erfolgten in arc/info.

Im Rahmen der Untersuchung des per-parcel-Ansatzes sollten verschiedene Forststände je nach Anteil von Laub- und Nadelbäumen unterschieden werden. Zwei Probleme waren bei der Bearbeitung der Daten zu lösen:

- wie können räumlich sehr hoch auflösende Daten in sinnvolle Klassen sortiert werden ?
- wie kann die durch die Klassifizierung gewonnene detaillierte Information in nutzbare Klassen und angemessene Maßstäbe überführt werden ?
- Weiterentwicklungen des Integrated Geographical Information Systems (IGIS) haben die Entwicklung neuer automatisierter Verfahren ermöglicht, die Rasterdaten auf einer per-parcel-Basis statt der bisher üblichen per-pixel-Basis analysieren (Smith & Fuller 2000). Dieser Ansatz bietet eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber pixelweisen Methoden:
- Informationsaggregation innerhalb einer Region
- Berücksichtigung von Kontext (innerhalb einer Region und in der Nachbarschaft)
- die Einbeziehung und Anwendung von wissensorientierten Regeln auf parcel-Ebene aus anderen Datensätzen (Expertensysteme)

8.3 Beschreibung der Methode

Jedes Pixel innerhalb eines zu klassifizierenden Gebietes enthält für die Analyse sinnvolle Information. Es wird im allgemeinen nicht möglich sein, dieses isolierte einzelne Pixel als definitive Landnutzungsklasse zu interpretieren, es wird stattdessen als Szenekomponente genutzt. Der Sensor nimmt nicht Einheiten wie „Baum“ oder „Forstgebiet“ auf, sondern Kronenkomponenten wie Blätter, Äste, Schatten, Boden etc. Benachbarte Pixel können zu einer gemeinsamen Region, derselben Landnutzung oder sogar zu demselben Objekt gehören und dennoch in völlig verschiedene Klassen sortiert werden. Dies macht das übliche Training für eine überwachte Klassifizierung unmöglich.

Der erste Schritt der vorgeschlagenen Methode ist daher eine konventionelle unüberwachte pixelweise Klassifizierung. Mittels dieses Isodata-Verfahrens sollen die einzelnen Komponenten des zu untersuchenden Datensatzes und deren räumliche Verteilung festgestellt werden. Dieser Ansatz wird einer Festlegung von a priori Landnutzungsklassen vorgezogen, da die tatsächliche Anzahl und Beschaffenheit der Szenekomponenten im Untersuchungsgebiet meist unbekannt ist. Diese hängt sowohl von dem Charakter des abgebildeten Gebietes (z.B. großflächig strukturierte ländliche Gebiete oder im Gegensatz heterogene städtische Umgebung) als auch von der räumlichen Auflösung des Sensors ab. Der Bilddatensatz eines urbanen Raums mit einer Auflösung von 2 Metern würde Komponenten wie verschiedene Typen von Gebäudedächern, Straßenpflaster, Fahrzeuge, Grünflächen, Baumkronen, Wasser etc. enthalten. Mit Hilfe der unüberwachten Klassifizierung sollen Klassen identifiziert werden, die alle vorhandenen Komponenten repräsentieren. Um die sich oft nur wenig unterscheidenden Komponenten differenzieren zu können, sollte die mit Hilfe der unüberwachten Klassifizierung erkannte Anzahl der Klassen und spektralen Clustern signifikant größer sein als die erwartete Komponentenanzahl.

Da die unüberwachte Klassifizierung mehr Klassen als vorhandene Bildkomponenten liefert, ist es in einem weiteren Arbeitsschritt notwendig, die Einzelklassen zusammenzufassen, die dieselbe Komponente repräsentieren. Das ist insbesondere dann erforderlich, wenn mehrere Varianten einer Komponente auftreten, beispielsweise Dächer mit verschiedener Neigung, Ausrichtung und Beschaffenheit, oder wenn Objekte durch eine große Bandbreite verschiedener spektraler Information repräsentiert werden. Diese Klassen werden zu einer Komponente zusammengefaßt,

somit werden die spektralen Cluster als Objekte der realen Welt sortiert. Das Zusammenfassen der Klassen kann manuell geschehen nach visueller Interpretation der Daten (Vergleich der Originaldaten und des klassifizierten Bildes) oder automatisch durch räumlich/spektrales clustering oder durch den Gebrauch von spektralen Bibliotheken.

Nachdem der Bilddatensatz in sinnvolle Merkmalseinheiten klassifiziert worden ist, folgt eine Prozessierung auf einer „per-parcel-Basis“. Mit Hilfe dieses Verfahrens wird eine Klassifizierung erstellt, die sich nicht unmittelbar aus den vorhandenen Szenekomponenten selbst ableiten läßt. Als Grundlage hierfür dient ein Vektordatensatz, der die Land-Parcel-Einheiten darstellt, also die Landschaft in thematischen Einheiten zusammenfaßt. Bei diesem Vektordatensatz kann es sich entweder um einen bestehenden Datensatz handeln, er kann das Ergebnis einer automatischen Segmentierung sein oder aus einer visuellen Interpretation und Digitalisierung stammen.

Bei dieser „per-parcel-Analyse“ werden die als Szenekomponenten klassifizierten Pixel innerhalb des zu untersuchenden parcels extrahiert und die Gesamtanzahl der gefundenen Komponenten und ihr Verhältnis zueinander berechnet. Ergebnis ist zunächst die prozentuelle Verteilung der Szenekomponenten in den jeweiligen parcel-sets. Mehr Information ist nicht notwendig, wenn die Szenekomponenten selbst beurteilt/geschätzt werden. Beispielsweise kann ein Gebiet innerhalb eines parcel als „bebaute Fläche“ zusammengefaßt werden, indem alle Komponenten mit dem Merkmal „Dach“ zusammengefaßt werden.

Um auf der Parcel-Ebene Oberflächentypen identifizieren zu können, die nicht direkt durch Szenekomponenten repräsentiert werden, ist eine Weiterverarbeitung der Information aus den Szenekomponenten notwendig. Hierfür müssen Zusammenhänge und Beziehungen zwischen den vorhandenen Komponenten und den Oberflächentypen gefunden und definiert werden. Vorstädtische Bereiche sind beispielsweise gekennzeichnet durch ein Konglomerat künstlicher Strukturen und Vegetation. Sind also ähnlich viele künstliche wie natürliche Szenebestandteile vorhanden, kann davon ausgegangen werden, daß das betreffende Land-Parcel einem vorstädtischen Oberflächentyp zugeordnet werden kann. Wie die betreffenden Beziehungen zwischen den Szenekomponenten definiert werden, hängt von den zu klassifizierenden Themen und der Beschaffenheit des Gebietes ab.

So kann ein Regelwerk entwickelt werden, das die verschiedenen Oberflächentypen aufgrund der Zusammensetzung der vorhandenen Szenekomponenten innerhalb des einzelnen Land-Parcels beschreibt. Diese Regeln können beispielsweise Schwellenwerte für die einzelnen Komponenten sein, Ratios zwischen den Komponenten, oder Indizes, die mehrere Komponenten in Beziehung setzen. Die Zusammensetzung der Szenekomponenten pro Parcel kann in einer ähnlichen Weise eingesetzt werden wie die Einzelkanäle in der herkömmlichen überwachten pixelweisen Klassifizierung.

Die Interpretation der Szenekomponenten kann noch verfeinert werden, indem das Muster bzw. die Verteilung der Szenekomponenten innerhalb des Land-parcels berücksichtigt wird. Zum Beispiel könnte ein städtisches Gebiet mit 50% gepflasteter und 50% bebauter Fläche entweder ein Industriegebiet oder ein Wohngebiet sein. Aufschluß hierüber gibt die Verteilung und Größe der Flächen: Wenn die Komponenten zu großen einheitlichen Bereichen angehäuft sind (Fabriken, Warenhäuser und Parkplätze/Straßen), handelt es sich um ein Industriegebiet, für ein Wohngebiet spricht eine gleichmäßige kleinräumige Verteilung (Häuser und Straßen).

Die Analyse der Tharandter Wald-Daten erfolgte in drei Hauptschritten: Generierung der Land-Parcel, Training und schließlich Anwendung auf den gesamten Datensatz.

1. Bildung der Land-parcel

- Generierung von Land-parcel-Einheiten, die die verschiedenen Forststände darstellen
- Zuordnung der parcel durch visuelle Interpretation des Datensatzes (oder Nutzung verfügbarer Geländedaten)

2. Training

- Auswahl eines geeigneten Testgebietes, unüberwachte Klassifizierung dieses Gebietes
- Identifizieren, Zusammenfassen und Recodierung der Isodata-Klassen zu Szenekomponenten (in diesem Fall Unterscheidung von verschiedenen Baumkronen (canopy components) und Nichtwald)

- Klassifizierung des in Einheiten zerlegten Datensatzes (parcels) mit Hilfe der gefundenen Komponenten, Ergebnis: Mischungsverhältnis der verschiedenen Bestandteile innerhalb der einzelnen Polygone
- Untersuchung der jeweiligen Komponenten-Anteile innerhalb der Parcel
- Entwickeln eines Ratios, der die Beziehung zwischen den einzelnen Kronenkomponenten und dem Forsttyp beschreibt, Interpretation der Ratio-Ergebnisse, Entwickeln eines Regelwerkes für die einzelnen Bestände

3. Anwendung der Methode auf das gesamte Gebiet

- Unüberwachte Klassifizierung der gesamten Szene
- Recoding der Klassen zu Komponenten wie im Training
- Übertragen der ermittelten Regeln auf die Gesamtszene

8.4 Bildung der Land-parcel

Um eine parcelbasierte Klassifizierung durchführen zu können, wird ein Vektordatensatz benötigt, der den Datensatz in klassifizierbare Einheiten unterteilt. Im vorliegenden Projekt wurden parcel-Einheiten generiert, die Forststände mit jeweils ähnlichen Charakteristika darstellen. Dieser Vektordatensatz kann entweder das Ergebnis einer Segmentierung sein (aus Daten größerer Auflösung), nach visueller Interpretation digitalisiert worden sein oder es kann auf bestehende Vektordatensätze zurückgegriffen werden. Für die Trainingsphase wurden die Kronencharakteristika (Farbe, Muster, Kronenform) eines kleinen Gebietes visuell interpretiert, diese Forsteinheiten wurden anschließend mit Hilfe des Softwarepaketes Laser-Scan Integrated GIS, IGIS, manuell digitalisiert und als Land-parcel-Polygone attribuiert.

Danach wurden die einzelnen Einheiten visuell interpretiert. Zunächst wurde eine sehr einfache Einteilung gewählt: Unterschieden wurde im Pseudo-Colorinfrarotkomposit zwischen roten Kronen (Nadelbäume) und weißen, grünen und grauen Kronen (Laubbäume). Der Datensatz wurde in sechs Landnutzungseinheiten eingeteilt: Nadelwald (C), Mischwald mit Nadelbäumen dominant Laubwald (Mc), Mischwald mit Laubbäumen dominant (Md), Mischwald (M) und Nicht-Forst (NF).

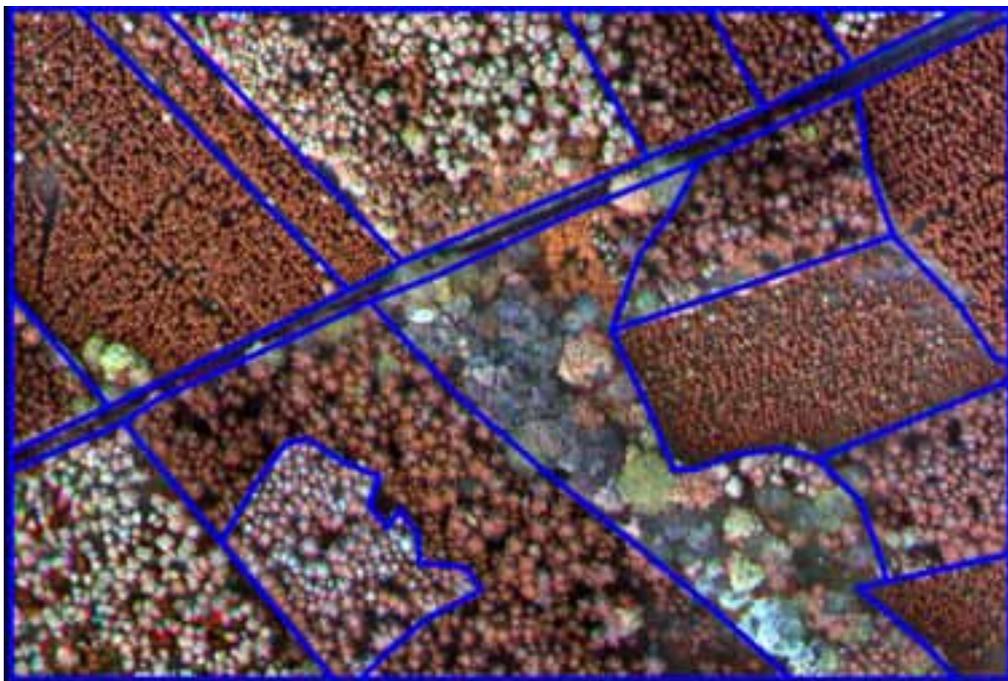


Abb. 61: Der Ausschnitt des Originaldatensatzes Tharandter Wald zeigt das Testgebiet, überlagert mit Landparcel-Polygonen. Der HRSC-A-Datensatz ist ein Farbkomposit aus den Kanälen Grün, Blau und Nadir.

8.5 Training

Das Training ist bei dieser Methode völlig anders als bei der konventionellen überwachten pixelweisen Klassifizierung. In dem Gebiet, das als Trainingsgebiet ausgewählt wurde, sollten alle vorkommenden Landnutzungseinheiten des Datensatzes vertreten sein. Weitere Bedingung war das Vorhandensein vieler verschiedener Pixel, die alle verschiedenen Komponenten des Bildes repräsentieren. Erster Schritt des Trainings ist eine unüberwachte pixelweise Klassifizierung des Testausschnittes (Cluster- oder Isodata-Verfahren). Die Anzahl der Cluster, in die das Bild „vorsortiert“ werden soll und die die Separierung des Datensatzes in alle Einzelkomponenten erlaubt, läßt sich schwer vorhersagen und ist davon abhängig, wieviele Einzelklassen unterschieden werden sollen. Die Klassenanzahl sollte signifikant größer sein als die erwartete Komponentenanzahl, im Beispieldatensatz Tharandter Wald erwies sich eine Klassenzahl von 80 als ausreichend.

Der nächste Schritt ist das Identifizieren und Zusammenfassen der Szenekomponenten. Dies ist ein iterativer Prozeß, durch Vergleich des klassifizierten Datensatzes mit den Originaldaten konnten Klassen identifiziert und zugeordnet werden, die die verschiedenen Szenekomponenten repräsentieren. Alle Klassen, die dieselben Komponenten darstellen, wurden zu einheitlichen Klassen zusammengefaßt (recoding) und farbkodiert (siehe Abbildung 62). Die 80 Klassen aus der unüberwachten Klassifizierung wurden so schließlich zu lediglich sechs Komponenten zusammengefaßt, die die verschiedenen vorkommenden Kronentypen und Nichtwald darstellen.

Folgende Szenekomponenten wurden unterschieden und eingefärbt:

Braun	Hintergrund (Gras, Boden, Wege, etc.) und Schatten (Bgrnd)
Rot	Mischung verschiedener Komponenten 1 (Mix_1)
Violett	Mischung verschiedener Komponenten 2 (Mix_2)
Helles Grün	Kronen Nadelwald (Can_1)
Helles Blau	Kronen Laubwald 1 (Can_2)
Dunkles Grün	Kronen Laubwald 2 (Can_3)

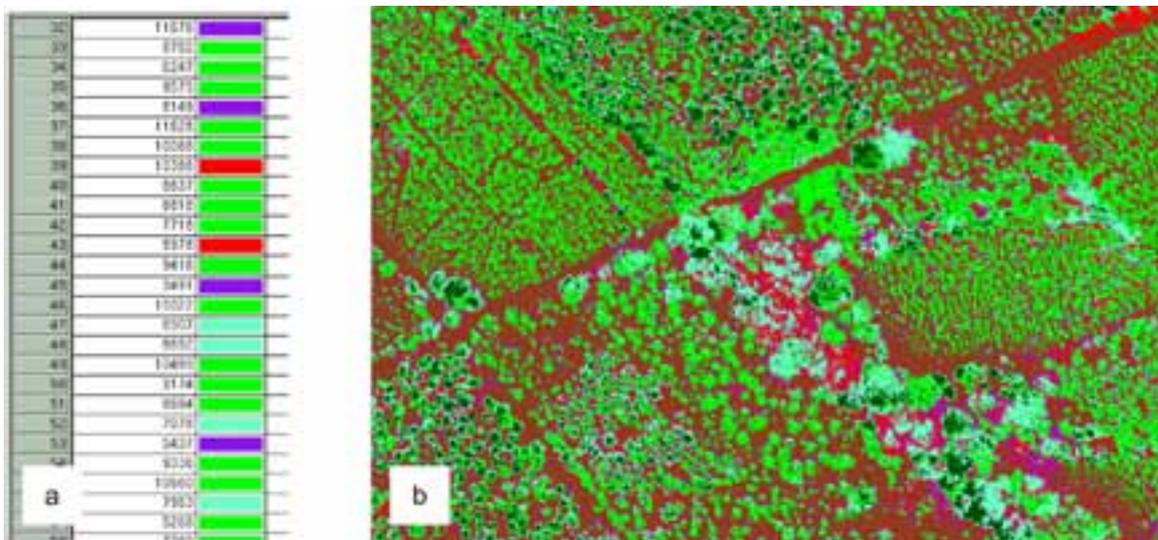


Abb. 62: a) Beispiel für das Zusammenfassen zu einheitlichen Klassen (recoding) aus dem Ergebnis des Isodata-Prozesses (80 Klassen), b) das daraus resultierende Bild mit den unterschiedenen sechs Szenekomponenten

Der Datensatz mit den unterschiedlichen Szenekomponenten wird nun in IGIS importiert und weiterverarbeitet. Nun wird der in Einheiten zerlegte Datensatz (parcels) mit Hilfe der gefundenen Komponenten klassifiziert. Das Programm ermittelt für jedes Polygon das Mischungsverhältnis der

verschiedenen Bestandteile (Komponenten), dieses Verhältnis kann als Tabelle ausgegeben und weiter untersucht werden (Tabelle 28).

Tab. 28: Prozentsätze der sechs Einzelkomponenten für alle 17 Trainingspolygone (parcel).

Class	1	2	3	4	5	6
Bqrnd	49.3	43.9	36.1	20.2	51.4	57.5
Mix 1	5.4	2.2	4.9	5.7	5.0	3.9
Mix 2	9.7	4.9	4.8	5.5	7.8	7.2
Can 1	24.1	43.3	46.5	34.8	26.4	26.6
Can 2	9.4	3.4	3.7	13.3	6.9	3.7
Can 3	2.1	2.3	4.0	20.6	2.5	1.1

Class	7	8	9	10	11	12
Bqrnd	33.7	55.6	31.9	20.1	49.2	12.5
Mix 1	8.7	15.6	8.0	11.7	5.5	15.9
Mix 2	5.2	6.7	6.6	8.2	7.8	10.0
Can 1	26.6	10.7	20.8	30.2	30.5	24.0
Can 2	11.3	9.2	16.8	18.6	5.8	28.0
Can 3	14.6	2.3	15.9	11.3	1.1	9.5

Class	13	14	15	16	17
Bqrnd	35.1	43.4	31.1	20.4	56.5
Mix 1	8.8	3.1	9.7	12.9	5.5
Mix 2	8.3	3.8	8.1	8.7	9.1
Can 1	33.0	43.0	42.8	40.0	25.8
Can 2	11.0	5.3	6.1	13.1	2.8
Can 3	3.8	1.3	2.2	4.9	0.3

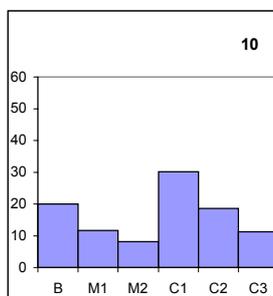


Abb. 63: Prozentsatz der Pixel, die einer jeweiligen Szenekomponente zugeordnet wurden (Beispiel für parcel 10)

Die Prozentsätze jeder Szenekomponente wurden dann verglichen mit den Landnutzungstypen, die den jeweiligen Polygonen zugeordnet wurden. Ziel dieser Untersuchung ist das Definieren von Beziehungen zwischen Zusammensetzung der Polygone und der Landnutzung, es wird versucht, ein Ratio für die Beziehung zwischen den einzelnen Kronenkomponenten und dem Forsttyp zu entwickeln.

Die Untersuchung der Zusammensetzung der Polygone machte eine Beziehung zwischen den drei Kronenkomponenten Can_1, Can_2 und Can_3 und dem Landnutzungstyp deutlich. Eine Reihe von verschiedenen Algorithmen wurde getestet. Das beste Ergebnis brachte ein Ratio von Nadelwald-Kronenkomponente und Summe der beiden Laubwald-Kronenkomponenten:

$$canopy_ratio = \frac{Can_1}{(Can_2 + Can_3)}$$

Ein Vergleich dieses Kronen-Ratio mit dem Landnutzungstyp ergab eine nachvollziehbare Beziehung, auch wenn manche Klassen nur mit wenigen Beispielen vertreten sind. Abbildung 64 zeigt die Verteilung von Ratio und Klassen.

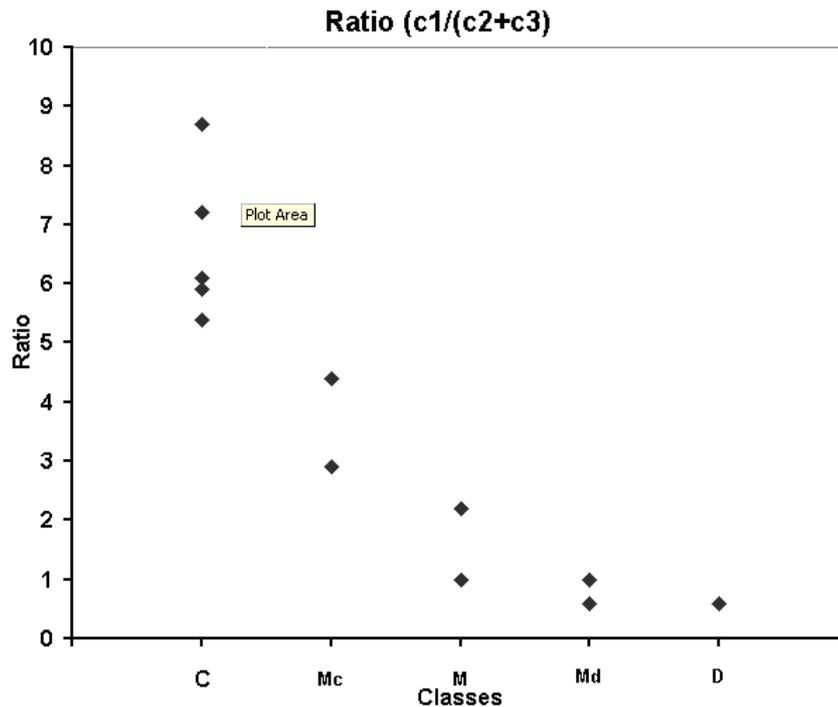


Abb. 64: Verteilung von Kronen-Ratio und Landnutzungs-Klassen.

Mit Kenntnis dieser Kronen-Ratio-Beziehungen können jetzt Regeln für die einzelnen Bestände entwickelt werden

Nadelbestände	(C)	> 5.0
Mischwald mit Nadelbäumen dominant	(Mc)	2.5 - 5.0
Mischwald	(M)	1.0 – 2.5
Mischwald mit Laubbäumen dominant	(Md)	0.6 - 1.0
Laubwald	(D)	< 0.6

8.6 Anwendung auf gesamtes Gebiet

Die per-parcel-Methode wurde schließlich auf die gesamte Szene angewendet. Hierfür wurde der Vektordatensatz aus der Biotoptypenkartierung als parcel-Grundlage verwendet.

Zunächst erfolgte eine unüberwachte Klassifizierung der gesamten Szene. Die gewonnenen Klassen wurden wie im Training sortiert, zugeordnet und zu sechs Komponenten zusammengefaßt. Wiederum wurde die Zusammensetzung der einzelnen parcel aus den verschiedenen Komponenten berechnet. Schließlich wurden die ermittelten Regeln (Kronenratio und Verteilung) auf die Gesamtszene übertragen.

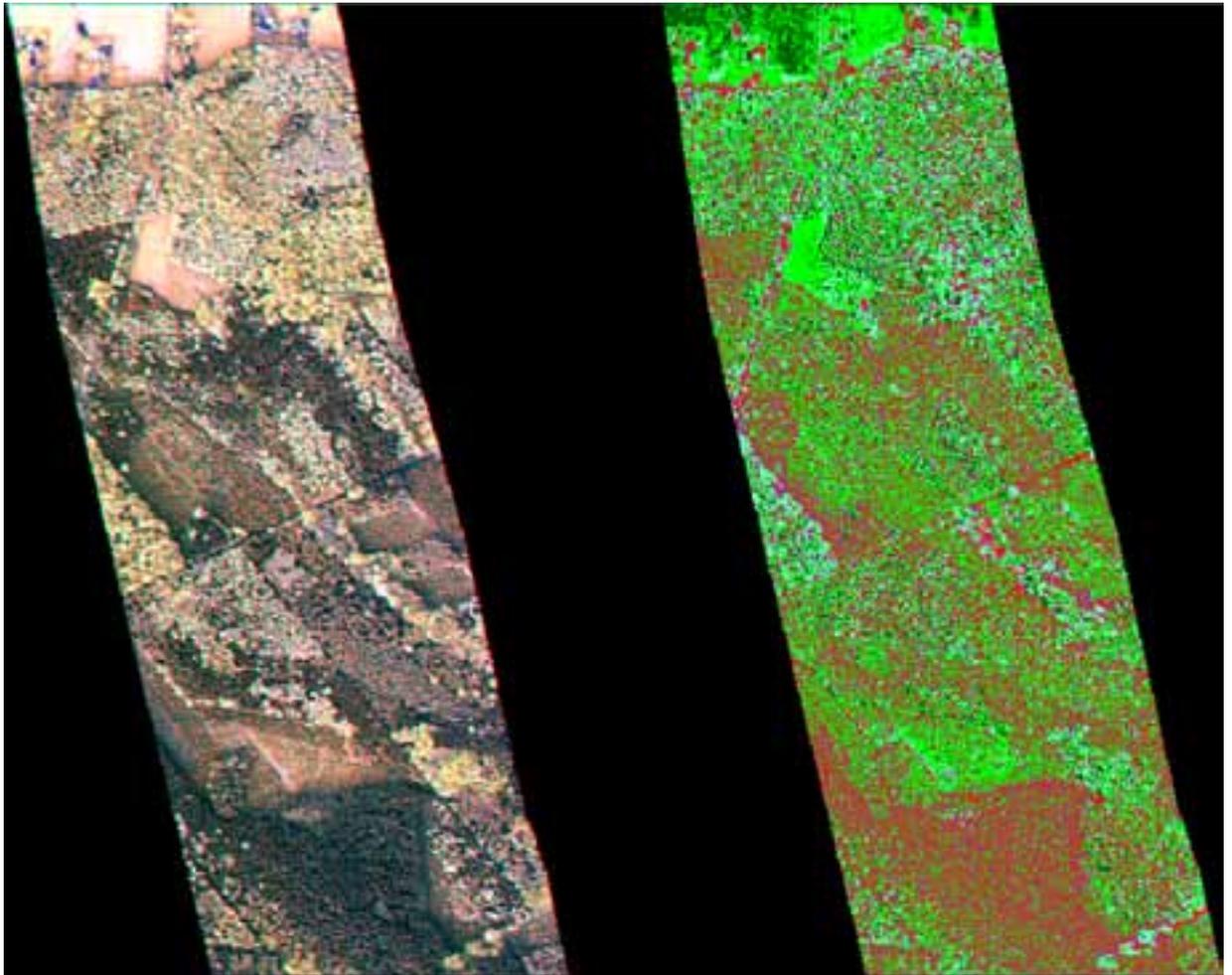


Abb. 65: Der Gesamtdatensatz, auf den die Methode angewendet wurde. Links das Original-HRSC-A-Bild, rechts das klassifizierte Bild, farbkodiert in die sechs Szenekomponenten

Eine zusätzliche Regel wurde für die Unterscheidung von Ackerland (arable) eingeführt:

Arable (A): $(Can_1 > 60)$ oder $(Can_3 > 50)$

Die im Vektordatensatz angegebene Landnutzung wurde mit dem Klassifizierungsergebnis verglichen und zu einer Fehlermatrix zusammengeführt.

Tab. 29: Fehlermatrix für die Klassifizierung des Gesamtgebietes (Nadelwald (C), Mischwald mit Nadelbäumen dominant Laubwald (Mc), Mischwald mit Laubbäumen dominant (Md), Mischwald (M, Nicht-Forst (NF) und Acker (A).

	Predicted					
	C	Mc	M	Md	D	A
C	15	14	6			
Mc	1	6	8			
M		1	9	1		1
Md			1	3	2	
D			1	9	7	
A						6

8.7 Diskussion

Bei der Klassifizierung wurde lediglich eine Genauigkeit von 55% erreicht. Dies ist gemessen an anderen Klassifizierungsverfahren kein gutes Ergebnis. Die Gründe hierfür und mögliche Fehlerquellen sollen nachfolgend diskutiert werden.

Als bedeutende Fehlerquelle erwies sich der Referenzdatensatz. Zwar wurden die Vektoren für den Testdatensatz neu digitalisiert, um die exakten Grenzen der Land-parcel verfügbar zu haben, als Referenz für die Fehleranalyse diente jedoch der Vektordatensatz aus der CIR-Interpretation von 1992. Diese Luftbildinterpretation erfolgte visuell, in einem weiteren Arbeitsschritt wurden die Flächen digitalisiert und attribuiert. Die mangelnde Verfügbarkeit von aktueller Geländeinformation erwies sich für die Analyse als Problem. Der verwendete Vektordatensatz ist veraltet: Die Überprüfung der Daten ergab eine große Fehlerquote. So war jede zweite Fläche, die als Reinbestand angesprochen war, ein Mischwaldbestand (Beispiel siehe Abb. 66). Der Datensatz, der zur Überprüfung der Klassifizierung eingesetzt war, stellte sich also selbst als falsch heraus. Hier war eine völlig neue Datenerhebung vonnöten.

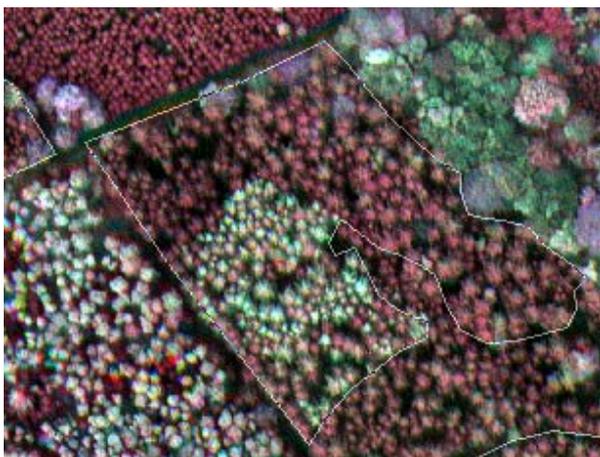


Abb. 66: Beispiel für Veränderungen seit der CIR-Interpretation 1992/Fehlinterpretationen

Der Datensatz wurde neu visuell interpretiert, digitalisiert und attribuiert. Mit Hilfe einer Geländebegehung konnten nicht eindeutig zuzuordnende Flächen identifiziert werden. Für die weitere Analyse stand somit ein aktualisierter Referenzdatensatz zur Verfügung.

Ferner war die Auswahl der Szenekomponenten zunächst sehr grob und geschah ohne Kenntnis der tatsächlichen Verteilung in den jeweiligen Parcel-Einheiten. Die Einteilung in die fünf Kronenklassen und eine Hintergrundklasse erwies sich als zu wenig differenziert.

8.8 Ergebnis der erneuten Klassifizierung

Der Datensatz wurde nach der Überarbeitung des Referenzdatensatzes erneut klassifiziert. Überarbeitet wurde auch die Zuordnung der Szenekomponenten. Der Datensatz wurde ferner im Rahmen der Zuordnung der Cluster in sieben Forst-Szenekomponenten unterschieden, vier Reinbestände und drei gemischte, nach der Zusammenfassung dieser Einzelklassen wurde nach der Klassifizierung schließlich in vier Forstklassen unterschieden.

Bei der Analyse der Klassifizierungsgenauigkeit wurden die Trainingsgebiete nicht mit einbezogen, berücksichtigt wurde der aktualisierte Referenzdatensatz. Die Klassifizierungsgenauigkeit beläuft sich auf 76% (Berücksichtigung von gemischten und reinen Beständen). Eine Analyse der Fehlermatrix zeigt, daß mißklassifizierte Land-Parcel nicht vollständig falsch klassifiziert wurden, sondern durchgängig als etwas jeweils ähnliches angesprochen wurden, es gab lediglich Verschiebungen in thematisch benachbarte Klassen. So gab es Verschiebungen in Richtung der gemischten Klassen. Dies ist wenig überraschend, da die für dieses Projekt definierten Forstklassen ein Kontinuum von Nadelwald zu Laubwald sind. Überlappungen gab es auch bei den Klassen Wiederaufforstung und Nadelbaum.

Tab. 30: Interpretierte Szenekomponenten nach dem Zusammenfassen der Klassen (links) und die verschiedenen Forstklassen des Datensatzes (rechts)

Code	Szenekomponenten	Code	Landbedeckung
CD	Gemischt Laub/Nadel 1	D	Laub 1
D	Laubkrone 1	L	Laub 2
DL	Gemischt Laub/Nadel 2	C	Nadelbaumbestand
L	Laubkrone 2	N	Wiederaufforstung
CL	Dunkle Laubkronen		
C	Nadelbaum		
N	Aufforstung		
U	unklassifiziert		

Betrachtet man die Verschiebung in Richtung einer Nachbarklasse nicht als Fehler und berücksichtigt man, daß solche Mißklassifizierungen in einem gewissen Ausmaß unvermeidbar sind, liegt die Klassifizierungsgenauigkeit bei 90%.

Tab. 31: Ergebnis der Klassifizierung (gesamter Datensatz ohne Berücksichtigung der Trainingsgebiete)

	D	L	CL	C	N	total
CD			1		3	4
D	9		3			12
DL	2					2
L		4	3			7
CL			15	5	1	21
C			2	18	5	25
N				3	9	12
U	2	1	2	2	1	

8.9 Szenekomponenten als Trainingsklassen für eine überwachte Klassifizierung

Die gefundenen Szenekomponenten wurden in dem beschriebenen Ansatz mittels eines Ratios weiter ausgewertet. In einer weiteren Untersuchung wurde getestet, ob diese Komponenten auch als Eingangsdaten für eine überwachte Klassifizierung geeignet sind.

Der HRSC-A-Datensatz wurde mittels einer unüberwachten Klassifizierung erneut in 80 Klassen geclustert (ISODATA-Verfahren). Mittels der visuellen Interpretation einer kleinen Region des Gesamtdatensatzes wurden diese 80 Cluster diesmal zu neun aussagekräftigen Szenekomponenten zusammengefaßt (Tabelle 32). Die unterschiedlichen Szenekomponenten wurden in IGIS importiert und weiterverarbeitet. Der in Einheiten zerlegte Datensatz (parcels) wurde wiederum mit Hilfe der gefundenen Komponenten klassifiziert.

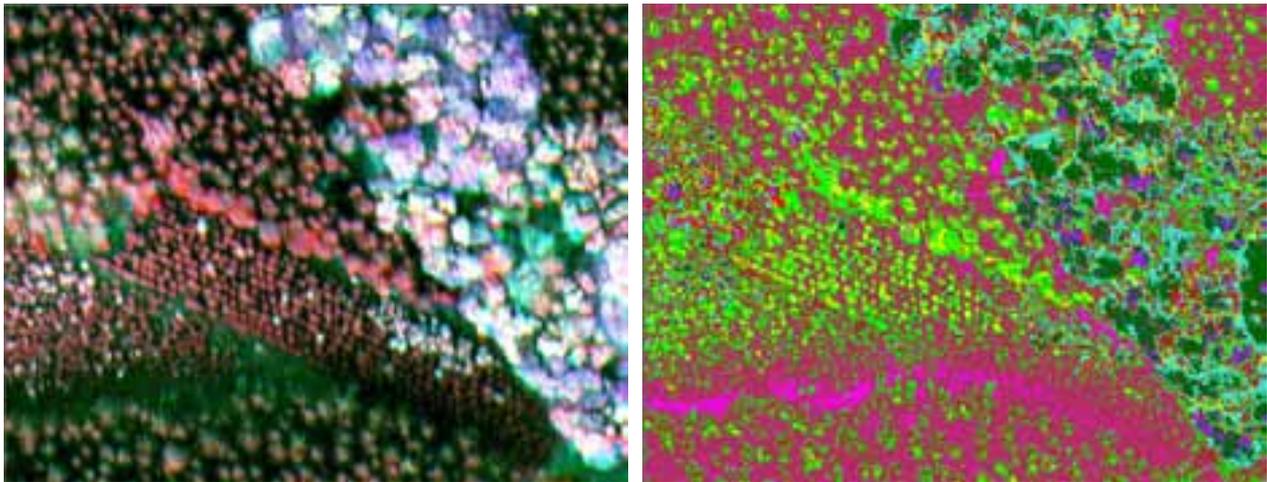


Abb 67: Testdatensatz Tharandter Wald (links, HRSC-A, Farbkomposit aus grün, blau, nadir) und Datensatz nach der unüberwachten Klassifizierung in 80 cluster (rechts)

Ein Vergleich der Anteile der Szenekomponenten innerhalb der Land-parcel mit dem jeweiligen Landnutzungstyp zeigte Regeln für das Verhältnis von Komponenten und Landnutzung. Die Szenekomponenten der Laubbäume waren positiv korreliert mit der Anzahl der Laubkronen der Landbedeckung. Bei den Nadelbaumflächen erwies sich die Kombination von Kronen mit den Anteilen von Schattensegmenten als aussagekräftig. Dies erklärt sich durch die unterschiedliche Kronenform beider Baumarten. Kronen von Laubbäumen sind größer und flacher als die schlankeren kegelförmigen Kronen von Nadelbäumen. Die dichten, oft zusammenwachsenden Kronen der Laubbäume lassen meist nur wenig oder gar keine Sicht auf den Boden, Schatten- oder Bodeninformation ist somit bei den Laubbaumklassen kaum vorhanden. Nadelbäume hingegen stehen meist weiter voneinander entfernt, der Boden ist sichtbar, und die Einzelbäume werfen sichtbare Schatten. Der Anteil der Schatten spielt somit in der Unterscheidung beider Waldklassen eine zentrale Rolle.

Tab. 32: Interpretierte Szenekomponenten nach dem Zusammenfassen der Klassen (links) und die verschiedenen Forstklassen des Datensatzes (rechts)

Code	Szenekomponenten	Code	Landbedeckung
C1	Helle Nadelbaumkronen	D	Laubbaum, gemischt
C2	Dunkle Nadelbaumkronen	L	Birke dominierend
D1	Helle Laubkronen	CL	Gemischt Birke und Nadelbaum
D2	Laubkronen, offen	C	Nadelbaumbestand dominierend
D3	Dunkle Laubkronen	N	Wiederaufforstung Nadelbaum
G	Gras		
B1	Dunkler Hintergrund		
B2	Offene gemischte Kronen		
S	Schatten		

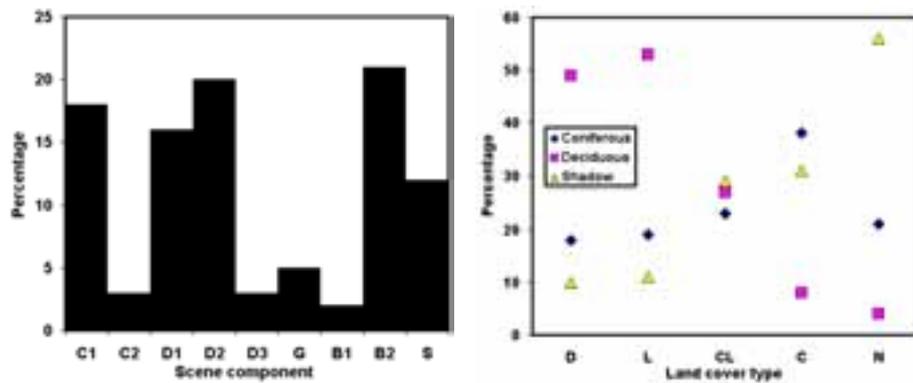


Abb. 68: Beispiel für Anteile von Szenekomponenten eines parcels (links) und das Verhältnis von Szenekomponenten zur Landbedeckung (rechts)

Die Anteile der einzelnen Szenekomponenten wurden als Eingangsdaten für eine überwachte Klassifizierung genutzt. Neun Anteile von Szenekomponenten der 15 ausgewählten Trainings-Land-parcel (drei für jeden Landbedeckungstyp) wurden genutzt, um einen Algorithmus für eine maximum likelihood Klassifizierung zu parametrisieren. Im Anschluß wurden die restlichen Land-parcel klassifiziert und die Ergebnisse schließlich verglichen mit den bekannten Landbedeckungstypen.

Die Genauigkeit der Klassifizierung beläuft sich auf 85%. Eine der Forst-Klassen ist eine Mischklasse, die sowohl auf dem Bild/im Gelände und in der Trainingsphase der Klassifizierung schwierig zu definieren ist. Die Fehlklassifizierungen hängen mit dieser Mischklasse zusammen bzw. den Klassen, die Komponenten der Mischklassen repräsentierten. Bei Einbeziehung dieser fraglichen Land-parcel in die correspondance calculations sind mehr als 90% der Land-parcel richtig klassifiziert. Zu Verwechslungen führten erneut - wie bereits beschrieben - die beiden Nadelbaumklassen (Nadelbaum und Nadelbaum-Wiederaufforstung). Auch diese beiden Klassen sind schwierig zu unterscheiden.

Tab. 33: Ergebnis der Klassifizierung

		Predicted class					Total
		D	L	CL	C	N	
Actual class	D	11		4		3	18
	L		4	3			7
	CL			15	5	1	21
	C			2	18	5	25
	N				3	9	12
						83	

8.10 Untersuchung der Kronenkomponenten

Im Rahmen der Analyse des Testdatensatzes wurden weitere Parameter für die Kronenbeschaffenheit untersucht. Hierfür wurden die jeweils umgebenden Pixel gezählt, die derselben Baumkomponente zugeordnet wurden („clumps“). Sie sind Indikatoren für die Kronendichte und –größe. So konnten Rückschlüsse über die Größe der Baumindividuen in den definierten Land-parcel gezogen werden, in Kombination mit Kenntnis der Baumart dient diese Information auch zur Bestimmung des Alters der Stände. Tabelle 34 zeigt die Prozentwerte von 40 Land-parcel, berücksichtigt sind jeweils zwischen null und acht Baumnachbarnpixel. Abbildung 69 zeigt stellvertretend acht Land-parcel mit den jeweiligen Prozentwerten der Verteilung der Nachbarnpixel. Die obere Reihe läßt auf kleine Kronen schließen, die untere Reihe zeigt große Kronen. Diese Zusatzinformation wurde in den späteren Klassifizierungsprozeß mit einbezogen.

Tab. 34: Ergebnis des „Klumpens“ für 40 Land-parcel, berücksichtigt wurden die Nachbapixel (Anzahl 0 bis 8), die denselben Kronenkomponenten zugeordnet wurden

Clumpo	5035	5033	5031	5029	5027	5025	5023	5021	5019	5017	Clumpo	5015	5013	5011	5009	5007	5005	5003	5001	4999	4997
Zero	0,3	3,9	5,4	3,7	4,1	3,2	3,3	2,5	0,6	3,1	Zero	2,3	3,7	3	2,6	2,9	0,3	2,6	1,9	5,2	3
One	0,9	3,9	4	8,3	7,3	6,6	6,7	5,4	0,5	4,2	One	5,5	7	5,7	4	4,5	0,5	5,6	3,8	8,6	6
Two	2	5,3	5,3	11,3	9,4	9,6	9,6	8,9	0,6	7,4	Two	9,7	9,6	8,6	5,8	6,6	0,6	8,3	5,3	10,8	8,6
Three	2,8	7,2	8,3	13	11,3	12,2	11,9	11,1	0,9	11,1	Three	13,2	11,5	10,8	7,9	8,8	1	10,9	6,9	12,5	10,9
Four	5,7	9,4	9,3	14,7	12,4	13,3	13,6	14,3	1,1	13,6	Four	15,1	13,4	13,3	10,4	11,4	1,5	13,2	8,9	13,4	12,8
Five	8,5	10,9	14	15,3	13,7	14,5	14,4	15,5	1,5	15,3	Five	16,7	14,9	14,9	12,7	13,6	2	15	10	14,4	14,3
Six	7,5	12,8	13,2	13,1	13,8	13,9	13,9	14,6	1,5	14,2	Six	14,8	13,9	13,3	13,7	13,8	1,9	14,4	10,1	14,4	14
Seven	8,9	15,6	14,7	11	14,1	14,2	13,6	13,7	2	13,7	Seven	12,2	13,3	13,5	16,4	15,5	2,2	14	11	12,3	13,8
Eight	63,5	31	25,9	9,5	13,9	12,4	12,9	14	91,2	17,4	Eight	10,5	12,5	16,9	26,5	22,9	90	16	42,2	8,4	16,6
Clumpo	4995	4993	4991	4989	4987	4985	4983	4981	4979	4977	Clumpo	4973	4971	4969	4967	4965	4963	4961	4959	4957	4954
Zero	2,5	2,2	3,2	3,6	3,2	5	2,8	3,6	0,3	1,5	Zero	2,9	2,3	2,2	2,3	2,5	2	2,3	3,2	0,9	2,6
One	5	4,3	6,9	7,7	6,6	7,4	5,9	6,9	0,4	2,3	One	4,7	3,8	4,1	4,6	5,2	3,8	4,4	5,7	1,5	5,6
Two	7,2	6,5	9,5	10,2	9,6	9,2	8,7	9,5	0,6	3	Two	7,5	6,1	6,3	7,8	7,2	6,1	6,6	7,6	1,9	8,5
Three	9,4	9,1	11,4	11,6	12	10,6	10,7	11,2	0,7	3,9	Three	10,6	8,3	9,5	10,9	9,5	8,7	8,6	10	2,2	10,9
Four	11,9	11,9	13,2	13,2	13,3	12,7	12,7	12,4	1	4,6	Four	13,2	11,2	12,4	13,4	11,9	11,5	10,4	11,8	2,7	13,7
Five	13,7	13,9	14,6	14,5	14,3	15,2	14	13,7	1,4	5,5	Five	14,6	13,1	14,8	14,4	14,1	13,3	11,5	13,2	3,3	15,1
Six	13,8	13,7	14	14,1	14,6	16,3	13,9	13,7	1	6,5	Six	13,6	13,1	16	13,2	14,7	13,6	11,1	14	3,8	14,1
Seven	14,6	14,6	13,7	13,3	13,7	14,3	13,8	14,3	1,2	9,7	Seven	14	14,9	16,7	13,1	15,6	15	11,3	14,9	6,5	13,6
Eight	21,8	23,8	13,4	11,8	12,7	9,2	17,6	14,7	93,4	62,9	Eight	18,9	27,3	18	20,2	19,4	26,1	33,8	19,6	77,2	15,8

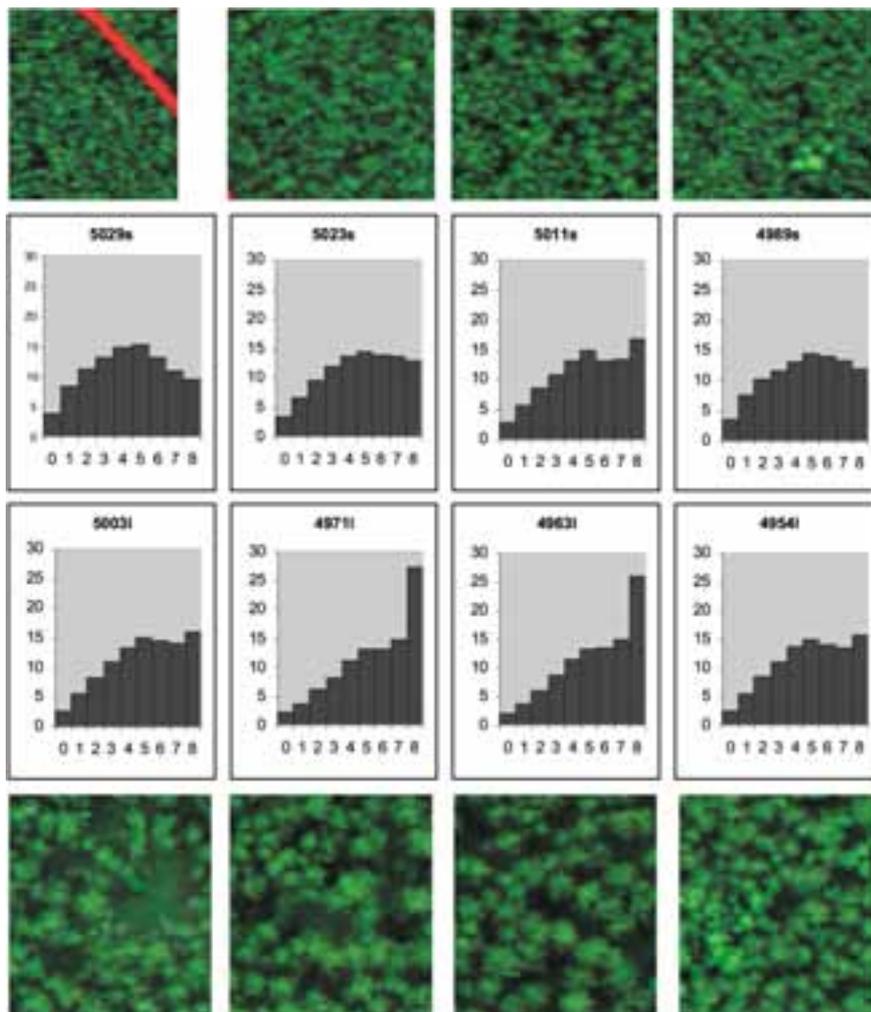


Abb. 69: Graphische Darstellung ausgewählter Kronenclumps, Erläuterung siehe Text

8.11 Ausblick: Übertragung der Methode auf städtische Datensätze

Die beschriebene Methode wurde auch auf einen städtischen Datensatz angewendet. Hierfür diente ein Datensatz der Stadt Potsdam. Die Befliegung fand am 14. Mai 1998 statt, Flughöhe war 3000 m, der Nadir hat eine Auflösung von 15 cm, es wurde im Photometrie-Mode geflogen. Der Datensatz ist strukturiert in offene Flächen, dichte Bebauung und Bebauung mit Vegetation. Ferner gibt es Straßenzüge, die teilweise dicht mit Bäumen bestanden sind und Straßen ohne Vegetation.



Abb. 70: links: Datensatz Potsdam, Aufnahme­datum: 14. Mai 1998, Farb­komposit aus Nadir, Blau, Grün, rechts: unterteilt in die Einheiten urbane Blöcke, Straßenzüge und offene Flächen.

In einem ersten Schritt wurden die parcel definiert und digitalisiert, es wurde grob unterschieden in urbane bebaute Blöcke, Straßen und offenes Gelände. Zur Analyse wurden alle vier Farbkanäle und der Nadir eingesetzt.

Mittels einer unüberwachten Klassifizierung wurden 100 Cluster gebildet. Eine sinnvolle Sortierung der Daten im Rahmen eines recoding, also die Zuordnung der gefundenen Pixelwolken zu einheitlichen Klassen, war zunächst nicht möglich. Dächer, Straßen und andere Oberflächenkomponenten waren aufgrund der gleichen spektralen Eigenschaften nicht trennbar und somit nicht in Einzelklassen unterscheidbar. Erst die Kombination mit der Oberflächeninformation machte die städtischen Einheiten unterscheidbar. Das vorliegende Oberflächenmodell hat eine Auflösung von 50 cm (x,y) bzw. 10 cm (z). Es wurde skaliert in die Grauwerte 0 bis 255 und als zusätzlicher Kanal in die Auswertung einbezogen (auch bei der unüberwachten Klassifizierung).

Im Rahmen des Recoding wurden neun Klassen (plus nicht klassifiziert) unterschieden (siehe Tabelle 35).

Tab. 35: Ergebnis der Zuordnung der Szenekomponenten

	Code	Szenekomponenten	Code	Landbedeckung
1	D	Schatten	D	Schatten
2	S1	Helle Oberfläche (Pflaster, Bürgersteige, Boden)	S	Oberfläche
3	S2	Dunkle Oberfläche (Straßen)		
4	R1	Helle Dächer (helles Material/ zur Sonne gewandte Dächer)	R	Dächer
5	R2	Dunkle Dächer (dunkles Material, sonnenabgewandte Dächer)		
6	T	Bäume	T	Bäume
7	V1	Rasen	V	Grünflächen
8	V2	Spärliche Vegetation		
9	W	Wasser	W	Wasser
10	N	Unklassifiziert		

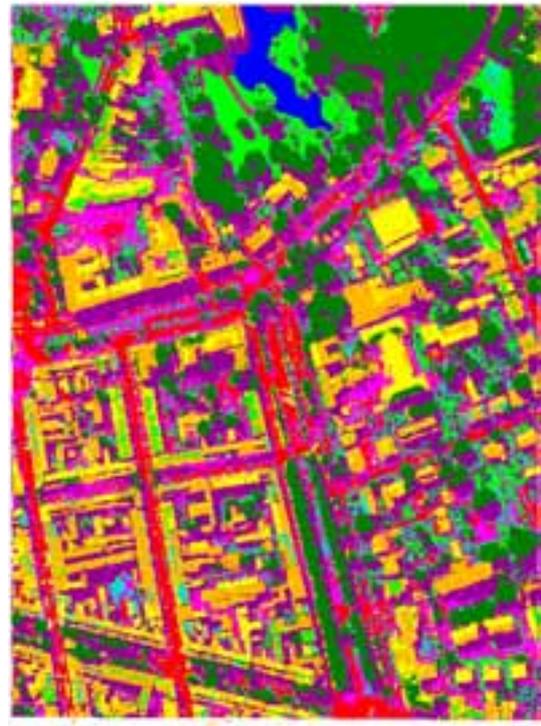


Abb. 71: Ergebnis des Zuordnens der Szenekomponenten (Weiß = keine Daten, violett = Schatten, rot = dunkle Oberflächen, Magenta = helle Oberflächen, gold = dunkle Dächer; gelb = helle Dächer, Dunkelgrün = Bäume; Hellgrün = Rasen, türkis = spärliche Vegetation; blau = Wasser)

	roof	surface	tree	grass	water
0	0,7078	0,1382	0,0282	0,1254	0,0005
1	0,0689	0,8870	0,0061	0,0315	0,0065
2	0,6244	0,1606	0,0751	0,1391	0,0008
3	0,0217	0,5265	0,3123	0,1365	0,0030
4	0,7146	0,1181	0,0596	0,1053	0,0023
5	0,0946	0,8371	0,0082	0,0490	0,0111
6	0,3027	0,2607	0,2017	0,2341	0,0008
7	0,0539	0,3575	0,4900	0,0975	0,0011
8	0,0950	0,8484	0,0025	0,0483	0,0059
9	0,6386	0,1830	0,0620	0,1154	0,0010
10	0,4615	0,2144	0,1788	0,1452	0,0001
11	0,0656	0,7508	0,0744	0,1056	0,0037
12	0,4664	0,2936	0,0894	0,1505	0,0001
13	0,3941	0,2093	0,1998	0,1962	0,0007
14	0,1040	0,6153	0,1931	0,0852	0,0024
15	0,0499	0,7054	0,1543	0,0891	0,0013
16	0,2735	0,2198	0,2732	0,2330	0,0005
17	0,1225	0,6651	0,0787	0,1329	0,0008
18	0,0670	0,6021	0,2362	0,0941	0,0005
19	0,5426	0,1962	0,1390	0,1222	0,0000
20	0,0830	0,7501	0,0931	0,0739	0,0000
21	0,6165	0,1428	0,1107	0,1298	0,0002
22	0,7506	0,1073	0,0160	0,1257	0,0004
23	0,1256	0,2887	0,5283	0,0570	0,0004
24	0,0709	0,8025	0,0775	0,0488	0,0002
25	0,7278	0,1398	0,0349	0,0974	0,0000
26	0,1178	0,2950	0,4970	0,0883	0,0019
27	0,0710	0,7863	0,0406	0,0982	0,0038
28	0,0184	0,9684	0,0014	0,0114	0,0004
29	0,2222	0,6148	0,1045	0,0584	0,0000
30	0,0846	0,6444	0,2137	0,0571	0,0002
31	0,0742	0,7076	0,1156	0,0976	0,0050
32	0,0008	0,0056	0,9651	0,0284	0,0000
33	0,0427	0,0408	0,5913	0,3252	0,0000
34	0,6132	0,3133	0,0071	0,0664	0,0000
35	0,1445	0,1978	0,5816	0,0757	0,0004
36	0,1168	0,0716	0,3936	0,2876	0,1305

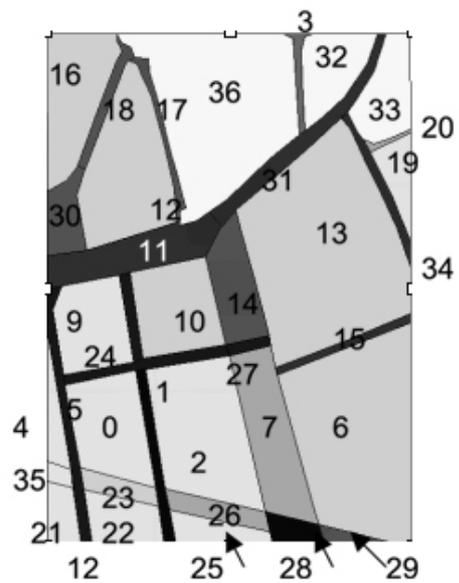


Abb. 72: Prozentuelle Anteile der fünf Szenekomponenten an den jeweiligen parcel-Einheiten, rechts der Originaldatensatz und die Numerierung der parcel.

Diese Klassen wurden im Rahmen einer überwachten Klassifizierung weiter verarbeitet. Ergebnis ist wiederum der prozentuelle Anteil der definierten Szenekomponenten pro parcel. Die Nutzungsart, Bebauungsdichte etc. kann durch die Aufstellung von Regeln definiert werden.

Zur Analyse von städtischem Raum können die sogenannten „fractional scene component images“ herangezogen werden. Diese Bilder zeigen die prozentuellen Anteile ausgewählter Szenekomponenten in den jeweiligen parcel-Einheiten und geben somit Aufschluß über ihre Eigenschaften. Die Einheiten wurden entsprechend der jeweiligen Prozentanteile an den Komponenten in verschiedenen Grauwerten proportional von 0 (weiß) bis 100% (schwarz) eingefärbt (Abb. 73).

Die Bebauungsdichte einer Region wird angezeigt durch den Anteil der Szenekomponente „Dach“, auf den Grad der Urbanisierung kann durch die Komponenten „Dach und Oberfläche“ geschlossen werden, „dunkle Oberfläche und Bäume“ bildet die Potsdamer Alleen ab.

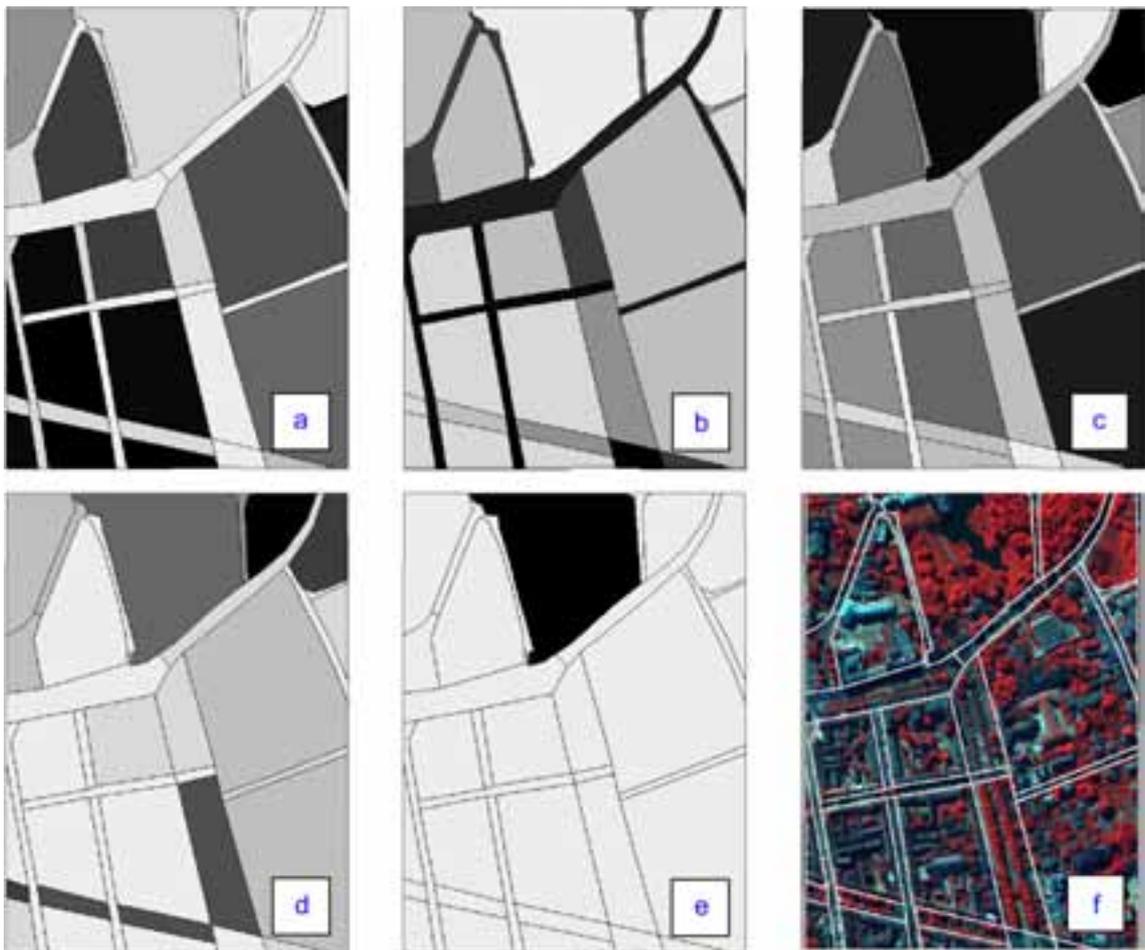


Abb. 73: Die prozentuellen Anteile ausgewählter Szenekomponenten in den Parcel-Einheiten. a zeigt die Dachkomponenten, b die Dach- und Oberflächenkomponenten, c die Baumkomponenten, d die Rasen/Graskomponenten, e die Wasseranteile, und f gibt einen Überblick über das Originalbild.

8.12 Diskussion und Schlußfolgerung

Die Bearbeitung von semantischen Einheiten statt der Einzelpixelanalyse zeigt gute Ergebnisse bei der Auswertung hochauflösender Daten. Beide beschriebenen Ansätze – zum einen die Generierung eines Kronenratios zur Beschreibung der verschiedenen Forststände, zum anderen die Nutzung der gefundenen Szenekomponenten als Eingangsdatensatz zur überwachten Klassifizierung, zeigten gute Ergebnisse, Genauigkeiten bis zu 95% konnten erreicht werden.

Ein großer Vorteil der parcel-basierten Analyse ist die Konformität mit Objekten/Einheiten der realen Welt. Je nach Aufgabenstellung werden Ackerflächen, Forststände oder Blöcke urbaner Bebauung als ganzes in einem realistischen Kontext untersucht. Diese Objekte der echten Welt entsprechen der Basis der Wahrnehmung von Auswertern und Nutzern der Daten.

Die Nutzung von Parcel-Einheiten als Rahmen für die Datenspeicherung und Analyse führt zudem zu einer Unabhängigkeit von räumlicher Auflösung, also auch von der Pixelgröße von Fernerkundungsdaten. Derselbe Satz von Land-parcel-Einheiten kann somit zur Untersuchung von Daten unterschiedlicher Sensoren genutzt werden. Ferner erlaubt diese Art von Analyse die Kombination unterschiedlichster Datenquellen wie Punkt-, Vektor-, Tabellen- und Rasterdaten. Die Verarbeitung und gemeinsame Analyse von GIS- und Rasterdaten in **einer** Software-Umgebung ist eine neue Möglichkeit. Die bisher weitgehend getrennten Welten von GIS und Fernerkundung wachsen zusammen und erweitern so die Analysemöglichkeiten.

Bei der Auswertung der HRSC-A-Daten bietet die per-parcel-Methode einen weiteren Vorteil: Die Blickwinkelunterschiede, die zu Farbsäumen am Rand von Objekten führen und bei pixelweisen Analysen eigene Klassen bilden (wie in Kap. 7 diskutiert), bereiten durch die Betrachtung größerer Einheiten keine Probleme mehr.

Die vorgestellte Methode erlaubt eine umfassende Extraktion des Informationsgehaltes der Daten und liefert ein flexibles Datenspeicherungssystem, das einen guten Startpunkt für weitere Analysen darstellt. Das Aggregieren von Szene-Komponenten auf der per-parcel-Basis liefert einen aussagekräftigen Kontext für die weitere Interpretation. Im Rahmen der weiteren Auswertung wurden die prozentuellen Anteile der Szenekomponenten pro parcel berechnet. Die Kenntnis der Verteilung dieser Bestandteile ermöglicht eine eingehende statistische Analyse der Daten. Manche Schritte des per-parcel-Verfahrens ähneln dabei einem Glätten oder Filtern der Daten, wobei die kontextuelle Integrität der Daten innerhalb der Land-parcel beibehalten wird.

Der beschriebene Ansatz ist nicht vollständig automatisierbar, visuelle Zwischenschritte sind nötig. Eine Grenze der Automatisierbarkeit stellt das Aggregieren der Szenekomponenten dar, das auf visueller Interpretation des Originaldatensatzes beruht. Dies ist ein iterativer Prozeß, der eine Kenntnis des Untersuchungsgebietes erfordert. Das Zusammenfassen zu einheitlichen Klassen ist zeitintensiv und in gewissem Umfang vom Bearbeiter abhängig.

Die Analyse urbaner Datensätze zeigte, daß die Einbeziehung eines Oberflächenmodells als zusätzliche Information unverzichtbar ist, um die verschiedenen Klassen unterscheiden zu können, die sich rein spektral nicht separieren lassen.

Der per-parcel-Ansatz erfordert einen Satz von Vektordaten, der die zu untersuchende Region in Einheiten unterteilt, die für die Analyse relevant sind. Diese Datensätze liegen im allgemeinen nicht vor. Die Definition dieser parcel, also die Ermittlung der zu bearbeitenden Einheiten, ist ein zeitkritischer Teil des Ansatzes. Für die Bearbeitung größerer Einheiten (z.B. Landnutzung) kann – abhängig von der Gebietsgröße – in vertretbarer Zeit ein Vektordatensatz erstellt werden. Sollen jedoch einzelne Objekte oder feinere Einheiten interpretiert werden (Bäume, Häuser etc.) stößt diese Vorgehensweise an Grenzen. Zur feineren Analyse dieser Objekte wird ein Verfahren benötigt, das in einem ersten Schritt Objekte identifiziert und die Grundlage für die weitere Untersuchung liefert und somit eine visuelle Interpretation und manuelle Digitalisierung überflüssig macht.

Die visuelle Interpretation stellt im allgemeinen einen arbeitsintensiven Zwischenschritt dar, der die Grundlagen für das weitere Vorgehen erst schaffen muß. Die visuelle Interpretation erfordert Erfahrung des Bearbeiters und idealerweise auch Kenntnis des Geländes. Insbesondere das Digitalisieren, das Attributieren und die Topologiebildung sind zeitintensive Schritte.

Das Zurückgreifen auf vorhandene Informationen ist vielen Fällen entweder nicht möglich oder nur eingeschränkt umsetzbar.

- Verschiedene Geometrien der Datensätze (das Anpassen benötigt erfahrungsgemäß mehr Zeit als die Neuerstellung)
- Zeitlicher Unterschied zwischen der Erstellung der Datensätze zu groß (mangelnde Aktualität)
- Interpretierte Einheiten entsprechen nicht der Fragestellung der aktuellen Aufgabe

Die Methodologie – selbst in der einfachen Form, die hier beschrieben wurde – liefert eine erheblich reichere Datenquelle als konventionelle per-pixel-Ansätze. Die parcel-orientierte Vorgehensweise löst Probleme der rein pixelweisen Analyse, erlaubt die Integration sehr unterschiedlicher Informationen, liefert attributierte GIS-Datenlayer, die für weitere Analysen verwendet werden können. Ferner entsprechen die resultierenden Datensätze der Struktur der Landoberfläche und somit dem visuellen Eindruck des Betrachters. Es gibt bisher nur wenige Erfahrungen mit der automatisierten Auswertung von hochauflösenden Daten. Die Abkehr von der pixelweisen Betrachtung hin zu einer Interpretation von definierten Einheiten ähnlicher Eigenschaften zeigt neue Möglichkeiten der Informationsextraktion aus diesen Datensätzen und verdient weitere Forschungsanstrengung. Die Ergebnisse aus einer Kombination von Information aus Raster- und Vektor-Datensätzen sind vielversprechend.

9 Objektorientierte Klassifizierung: Multiskalare Segmentation und Klassifizierung mittels fuzzy logic

9.1 Motivation, Ansatz

In der Fernerkundung deutet sich ein Paradigmenwechsel an. Bisher kamen nahezu ausschließlich pixelorientierte Verfahren zur Interpretation von Rasterdaten zum Einsatz. Dieser Ansatz nimmt das einzelne Pixel als Grundlage für eine Klassifizierung, die Zuordnung erfolgt ausschließlich aufgrund der spektralen Eigenschaften des Einzelpixels, andere Eigenschaften wie Form oder Nachbarschaften werden nicht berücksichtigt. Diese Methode der Klassifizierung wird seit Aufkommen der ersten digitalen Satellitendatensätze in den 70ern eingesetzt.

Standardmäßig werden die quadratischen kleinsten Bildelemente der Daten, eben die Pixel, vorverarbeitet (Georeferenzierung, Bildverbesserung etc.) und anschließend mittels unüberwachten oder überwachten Methoden klassifiziert, d.h., ähnliche Pixel werden derselben Klasse zugeordnet. Dabei werden die Bildelemente rein statistisch betrachtet. Ein Pixel mit den gleichen Reflexionswerten irgendwo im Bild fällt nach den definierten Kriterien in die gleiche Klasse wie ein Pixel an ganz anderer Stelle. Naheliegender aber als die rein statistische Analyse ist ein Vorgehen, das von der Annahme ausgeht, daß das untersuchte Pixel zu derselben Klasse gehört wie sein Nachbar. Diese räumliche Abhängigkeit, bekannt als „Tobler's First Law of Geography“, wird bei den rein pixelbasierten Ansätzen nicht berücksichtigt (Blaschke 2000).

Die Problematik der Klassifizierung hochauflösender Daten wurde bereits im ersten Kapitel diskutiert. Eine wichtige Voraussetzung für die Auswertung der detailreichen Daten ist die Definition von Unterobjekten, die das Bild vorstrukturieren. Zusammengehörige Regionen und/oder Objekte werden zusammengefaßt, es wird vom Einzelpixel abstrahiert. Diese so definierten Bereiche können in einem anschließenden Arbeitsschritt unter Berücksichtigung verschiedener zusätzlicher Parameter (Form, Nachbarschaften, etc.) klassifiziert werden.

Der bereits vorgestellte parcel-orientierte Ansatz bietet die Möglichkeit der Einbeziehung von Nachbarschaften durch die zur Verfügung stehende GIS-Funktionalität und berücksichtigt Parameter, die über die rein spektralen Eigenschaften der Einzelpixel hinausgehen. Die Limitationen dieses Ansatzes wurden diskutiert. Die Methode zeigt sich als besonders geeignet zur Beschreibung von Landnutzungseinheiten, vielfältige Zusammensetzungen von Flächen können erfaßt und beschrieben werden. Bei großmaßstäbigen Fragestellungen allerdings, die z.B. einzelne Häuser oder Bäume untersuchen, stößt die beschriebene Methode an Grenzen, u.a. deshalb, weil die parcel-Grenzen für diese Objekte im Allgemeinen nicht vorliegen und erst mittels visueller Definition gebildet werden müssen.

Einen Schritt weiter gehen Ansätze, die homogene Bildobjekte in den Bilddatensätzen definieren und diese gefundenen Komponenten weiterbearbeiten. Auch hier gilt das im vorigen Kapitel gesagte: Erst durch die Entwicklung kombinierter Ansätze aus GIS und Fernerkundung ist diese Vorgehensweise möglich.

Eine Methode zum Definieren von Bildobjekten ist die Segmentierung. Unter Segmentierung versteht man die Aufteilung des Bildes in eindeutig abgegrenzte Regionen nach einem definierten Homogenitätskriteriums.

Die Vorgehensweise der Segmentierung und anschließenden Klassifizierung der gefundenen Segmente soll für die hochauflösenden Kameradaten genutzt werden. Das eingesetzte Softwarepaket eCognition der Firma Definiens setzt als erstes professionelles Produkt auf die objektorientierte Klassifizierung. Das Programm basiert auf einem „Fractal Net Evolution Approach“, das ein selbststrukturiertes dynamisches semantisches Netz benutzt, um die segmentierten Objekte in einem heuristischen Verfahren zu optimieren (Blaschke 2000).

eCognition berücksichtigt bei der Auswertung neben den klassischen Parametern der Fernerkundung (spektrale Werte, Bildstatistik, Textur) auch typische GIS-Funktionen (Grenzlängen von Objekten, ihre topologischen Beziehungen zueinander, Entfernungen zum nächsten Element der gleichen/einer bestimmten anderen Klasse etc.) und leistet so einen Beitrag zum Zusammenwachsen der beiden bisher quasi strikt getrennten Disziplinen GIS und Fernerkundung.

9.2 Verfügbare Segmentierungsverfahren

Neue Verfahren der Fernerkundung zerlegen die Bilddaten zunächst in in sich homogene Objekte und nehmen diese als Basis für die weitere Bearbeitung. Diese Zerlegung kann mittels einer Segmentierung geschehen. Bei diesem Verfahren werden die Einzelpixel aufgrund eines Homogenitätskriteriums gruppiert. Diese erst neuerdings in der Fernerkundung eingesetzten Verfahren sind insbesondere im Bereich der Mustererkennung (z.B. Materialüberwachung) verbreitet (Haralick & Shapiro 1985). Eine rechnergestützte Segmentierung unterteilt das digitale Bild in Bereiche (Segmente, räumlich zusammenhängende Mengen von Pixeln), die in der realen Welt eine Bedeutung haben. Die Segmentierung soll je nach Untersuchungszweck relevante Bildelemente bzw. repräsentierte Landschaftselemente ergeben (Blaschke 2000). Nachfolgend sollen einige Segmentierungsprinzipien vorgestellt werden (Überblick über die gebräuchlichen Verfahren bei Baatz & Schäpe 2000 und Blaschke 2000).

Die Entwicklung von Verfahren zur Bildsegmentierung sind seit Jahren ein Forschungsschwerpunkt in der Bildverarbeitung. Die gebräuchlichen Segmentierungsalgorithmen stammen vorwiegend aus den Werkstoff- und Materialwissenschaften und untersuchen u.a. die Homogenität von Polymeren. Drei Kriterien helfen bei der Einteilung:

- Homogenität innerhalb eines Segments
- Verschiedenheit/Trennstärke gegenüber räumlich angrenzender Segmente
- Formhomogenität (Einfachheit von Segmentgrenzen gegenüber fraktalen Ausprägungen) (Blaschke 2000)

Diese Kriterien widersprechen einander zum Teil, es gibt jeweils nur Annäherungen an alle drei Anforderungen, in den verschiedenen Segmentierungsmethoden werden einzelne Kriterien besonders berücksichtigt.

Die einfachste Annäherung an die Bildsegmentierung sind Schwellenwertverfahren. Bei einer Clusterbildung im Merkmalsraum werden die Pixel zu einer definierten Anzahl von Klassen zusammengefaßt. Die Pixel einer Klasse unterscheiden sich dabei möglichst wenig voneinander (die Summe der Quadrate der Abweichungen der Pixelwerte von den Clustermittelwerten ist minimiert). Die Segmente sind im Bild räumlich zusammenhängende Mengen von Pixeln derselben Klasse. Die spektrale Homogenität der Pixel innerhalb eines Segments ist dabei unbedeutend (Schneider et al. 1997).

Im Gegensatz zur Clusterbildung im Merkmalsraum arbeiten die anderen Segmentierungsverfahren im Bildraum und damit "explizit räumlich" (Blaschke 2000). Es wird unterschieden zwischen regionen-basierten (region-based) Methoden, die sich als toleranter gegenüber Bildstörungen erweisen, und kantenbasierten (edge-based) Methoden. Typische regionen-basierte Segmentierungsmethoden sind Split-and-Merge-Methoden und Region-growing-Methoden.

Gebräuchlich ist der Region-Growing-Algorithmus. Dieser Algorithmus funktioniert nach dem Prinzip, daß ein Pixel an eine Region nur dann angehängt wird, wenn der Unterschied in der Intensität entweder zum vorangegangenen Pixel (single linkage) oder zu dem Mittelwert der Intensitäten der bereits gebildeten Region (centroid linkage) einen bestimmten Schwellenwert in den einzelnen Kanälen nicht übersteigt. Die Region-Growing-Segmentierung beginnt mit sogenannten seed pixels (Saatzellen) als Anfangssegmenten. In jedem Stadium der Segmentierung werden alle Pixel, die einem Segment S benachbart sind und zu keinem anderen Segment gehören, auf Ähnlichkeit mit dem Segment S geprüft. Ist die Ähnlichkeit groß genug, wird das jeweilige Pixel dem Segment S zugeteilt. Die Ähnlichkeit wird ermittelt durch einen Vergleich des neuen Pixels mit dem unmittelbar benachbarten Pixel des Segments S oder durch einen Vergleich des neuen Pixels mit dem Mittelwert aller Pixel des Segments S. Gibt es kein Pixel mehr, das zu S hinzugefügt werden kann, wird ein neues Segment mit einer neuen Saatzeile begonnen. Größe und Anzahl der entstehenden Segmente sind abhängig von dem Verfahren, nach dem die Saatzeilen gewählt werden, und von den Schwellenwerten, die das Homogenitäts-Kriterium bestimmen (Blaschke 2000). Als limitierend erweist sich bei diesen Verfahren eine mangelnde Kontrolle über den Prozeß und die schwierige Definition eines Abbruchkriteriums für das Wachsen der Segmente (Baatz & Schäpe 2000).

Kantenbasierte Segmentierungsverfahren beginnen mit der Suche nach starken Gradienten (Diskontinuitäten) im Bild. Es wird angenommen, daß diese Diskontinuitäten Segmentgrenzen

darstellen. Es gibt verschiedenste Kantendetektoren wie den Laplace-Operator oder den Sobel-Operator. Auch die Watershed-Segmentierung verwendet Kanteninformation. Die Homogenität der Segmente ist bei rein kantenbasierten Segmentierungsverfahren nicht automatisch garantiert (Schneider et al. 1997).

Basierend auf diesen Segmentierungsmethoden wurden zahlreiche Verfahren entwickelt, z.B. für forstliche Anwendungen: Banko et al. 1998, Buck et al. 1999, de Kok et al. 1999, verschiedene Fragestellungen: Hofmann et al. 1998, Steinnocher 1997, Wrbka 1999.

9.3 Das Segmentierungsverfahren in eCognition

Das Softwarepaket eCognition nutzt einen sogenannten "Fractal Net Evolution Approach". Dieser Ansatz nutzt ein selbststrukturiertes dynamisches semantisches Netz, um die segmentierten Objekte in einem heuristischen Verfahren hinsichtlich der Wertheterogenität und der räumlichen Heterogenität zu optimieren. „Fraktal“ ist hierbei weniger im mathematischen Sinne zu verstehen als vielmehr im Sinne der Selbstähnlichkeit (Blaschke 2000). Die patentierte Technik der Multiresolution Segmentation, nachfolgend multiskalare Segmentierung genannt, wurde entwickelt, um Bildobjekte in beliebig wählbaren Auflösungen und aus so unterschiedlichen Datenquellen wie SAR-Daten, Luftbildern, medizinischen Bildern und Satellitenbilddaten zu extrahieren.

Das multiskalare Segmentierungsverfahren beruht auf einem Optimierungsprozeß, der für die gegebene Auflösung die durchschnittliche Heterogenität der Bildobjekte minimiert. Hierbei wird die Heterogenität jedes Objektes mit seiner Pixelanzahl gewichtet und die Summe dieser gewichteten Heterogenitäten aller Objekte minimiert. Diese Optimierung verfolgt zwei Ziele: Die Kontinuität der Werte und die räumliche Kontinuität. Diese werden mittels Parametern, die das Segmentierungsverfahren beeinflussen, erreicht: Ein höherer Schwellwert an Wertkontinuität (object scale parameter) führt zu größeren (und somit "gröberen") Objekten. Höhere Schwellwerte für Formheterogenität münden in komplexeren Formen oder umgekehrt, niedrigere Werte erzwingen relativ kompakte Bildobjekte.

Es gibt folgende Anforderungen an das Ergebnis der Segmentierung:

- Die Segmentierung soll möglichst **homogene** Segmente liefern, die eine optimale Unterscheidung erlauben und die verschiedenen Bildobjekte repräsentieren
- Jede Bildanalyse befaßt sich mit Strukturen, die jeweils in sehr unterschiedlichen Maßstäben abgebildet werden. Die durchschnittliche Größe der Bildobjekte sollte daher angepaßt werden an den gewünschten Maßstab der Auswertung (**freie Anpaßbarkeit der Auflösung**)
- Nahezu alle Attribute von Bildobjekten wie Farbe, Textur, Form und Nachbarschaftsbeziehungen sind maßstabsabhängig. Lediglich die Strukturen in ähnlichen Maßstäben haben vergleichbare Qualität und Attribute. Daher sollte die Größe der resultierenden Bildobjekte ähnlich sein (**ähnliche Skala** in bezug auf die Größenordnung der Bildobjekte)
- Der Segmentierungsprozeß sollte **universell einsetzbar** sein für unterschiedlichste Datentypen und Fragestellungen.
- Die Ergebnisse der Segmentierung sollten **reproduzierbar** sein.
- Die Datensätze in der Fernerkundung sind häufig sehr groß. Eine Segmentierungsmethode sollte in der Lage sein, auch große Datensätze in einer möglichst **kurzen Zeit** bearbeiten zu können.

Es gibt bisher kein Verfahren, das alle diese Anforderungen erfüllt, auch hier gibt es lediglich Annäherungen.

Die multiskalare Segmentierung, die von eCognition genutzt wird, ist ein region-merging-Verfahren, das bottom-up funktioniert. Die Bildbereiche werden über einen paarweisen Verschmelzungsprozeß zusammengesetzt. Die Heterogenität eines Objektes wird durch drei Kriterien beschrieben:

- Die Summe aller Standardabweichungen innerhalb der Spektralwerte der Pixel eines Pixels (Maß für die Einheitlichkeit (Homogeneity) der Farbwerte)
- Die Standardabweichung des Umfangs eines Objektes vom Umfang eines Kreises gleicher Größe (Maß für die Kompaktheit (Compactness) eines Objektes)

- Das Verhältnis der Kantenlänge des Objektes zur Kantenlänge des Rechtecks entlang des Rasters, welches das Objekt beinhaltet (Bounding Box) (Maß für die Glattrandigkeit (Smoothness) eines Objektes)

Jedes Einzelpixel ist quasi gleichbedeutend mit einem Bildobjekt oder einer Region. Mit jedem Segmentierungsschritt wird ein Paar von Bildobjekten zu einem größeren Objekt zusammengefaßt. Dies erfolgt nach einem definierten Homogenitätskriterium, das die Ähnlichkeit von benachbarten Objekten beschreibt. Kleinere Regionen werden so zu größeren zusammengefaßt, bis kein Nachbarpixel mehr den Anforderungen entspricht. Es gibt eine verteilende Bearbeitungsreihenfolge, die Simulation eines gleichmäßigen Wachstums, ausgehend von möglichst vielen Punkten gleichzeitig. Ergebnis sind ähnlich große Segmente.

Auf weitere Details dieses Ansatzes soll im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden, eine Beschreibung des Verfahrens ist nachzulesen bei Baatz & Schäpe 2000. Vom Segmentierungsergebnis wird nicht erwartet, daß es bereits Klassen wie Ackerflächen, Häuser etc. liefert, dieser Anspruch muß aufgrund der Komplexität der Bilddaten/Realität scheitern. Die Segmentierung liefert vielmehr das Rohmaterial, auf das anschließend Intelligenz angewendet wird, um zu Klassen der realen Welt zu kommen. Das Verfahren erlaubt die gleichzeitige Bearbeitung von Daten in verschiedenen Maßstabsebenen. Die gewonnenen Segmente werden nachfolgend als Bildobjekte bezeichnet. Auch nach der Segmentierung bleibt die Information der Einzelpixel erhalten.

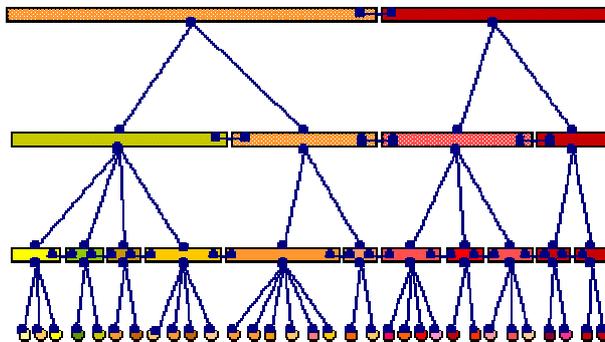


Abb. 74: Prinzip des hierarchischen Netzes von Bildobjekten mit verschiedenen Maßstabsebenen .

Durch die multiskalare Segmentierung entsteht ein hierarchisches Netz von Bildobjekten, in dem feinstrukturierte Objekte Unterobjekte von größeren Strukturen darstellen. Die hierarchische Struktur repräsentiert die Information der Daten gleichzeitig in verschiedenen Auflösungen. Die Objekte sind nachbarschaftlich und hierarchisch miteinander vernetzt, jedes Objekt „kennt“ seine Nachbar- und Unterobjekte.

9.4 Klassifizierung mittels fuzzy logic

Nach der ersten Phase der Bildbearbeitung steht ein hierarchisches Netz von Bildobjekten zur Verfügung, das es ermöglicht, die zugrundeliegende Bildinformation in mehreren Skalen gleichzeitig darzustellen. Die Segmentierung ist nicht Selbstzweck oder lediglich Vorverarbeitungsstufe für eine andere Software. Auf den Bildobjekten aufbauend steht objektorientiert ein Werkzeugset der Klassifikation zur Verfügung. Von den Bildobjekten sind neben den spektralen Werten und deren Statistik (Varianz, Mittel, Median etc) und Maßen für die Textur in den einzelnen Kanälen viele weitere Informationen abfragbar, die zur Interpretation genutzt werden können. Auch in unklassifiziertem Zustand sind für die einzelnen Objekte beispielsweise Grenzlängen zu Nachbarobjekten, Umfang, Fläche, Form, Richtung, Entfernung von anderen Objekten etc. bekannt. Diese Information ist sonst bei der Bildinterpretation generell nicht bekannt, sie ist ein wertvolles Hilfsmittel bei der Analyse und der Suche nach Unterscheidungskriterien der definierten Klassen.

Die Wissensbasis (Regelsatz der Klassifizierung) hat in eCognition die Form einer hierarchischen Klassenstruktur. Die Klassifizierung kann merkmalsorientiert (mittels Zugehörigkeitsfunktionen (membership functions)) oder mit Hilfe eines Nearest Neighbour Klassifikator erfolgen, wie er in Standard-Fernerkundungssoftware üblich ist (Kap. 7).

Die Wissensbasis für die merkmalsorientierte Analyse bildet ein zweites hierarchisches Netzwerk, die Klassenhierarchie. Dieses Netzwerk ist dreiteilig und unterscheidet zwischen der Erbschaft von Merkmalen, der semantischen Gruppierung von Klassen und dem Zusammenfassen von Klassen zu Strukturgruppen zum Zweck der wissensorientierten Objektextrahierung. Durch die Objektorientiertheit können Obergruppen von Objekten gebildet werden, die Eigenschaften der Unterobjekte erben und umgekehrt können Gruppenmerkmale bei der Klassifikation Merkmale auf neue Unterklassen vererben.

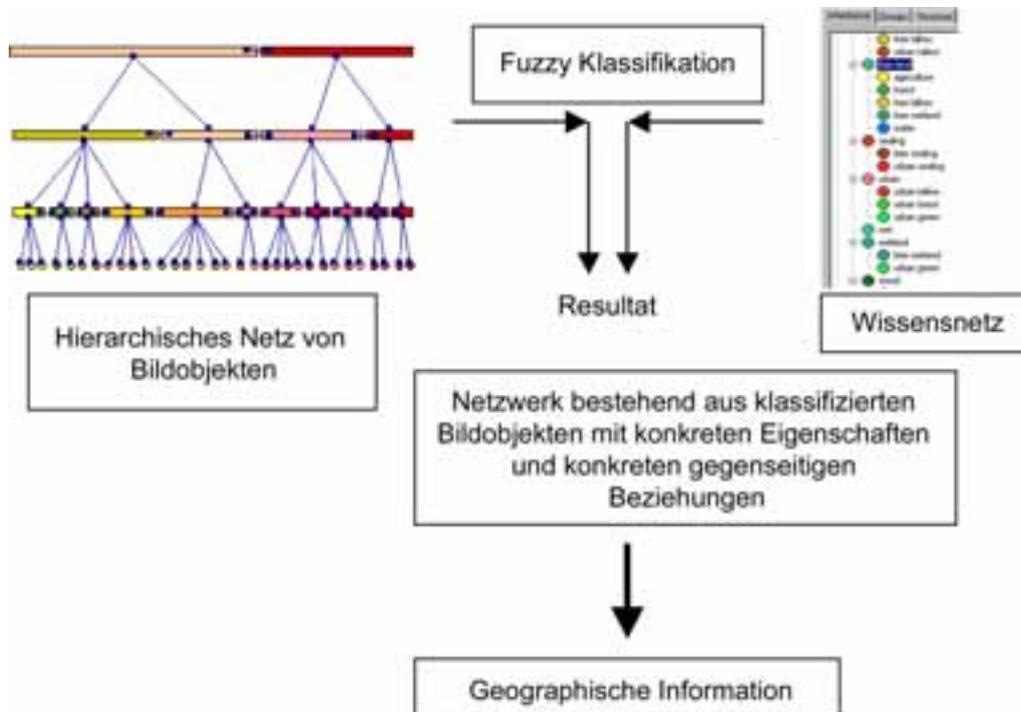


Abb. 75: Ablauf der Klassifikation mittels eCognition (Baatz & Lingenfelder 2000)

Die Klassenmerkmale werden mittels Fuzzy Logic Operatoren beschrieben. Fuzzy Logic bietet durch Nachvollziehbarkeit und Transparenz Vorteile gegenüber anderen Klassifizierungsansätzen wie beispielsweise neuronalen Netzen (Baatz & Schäpe 1999). Der mathematische Ansatz der Fuzzy Logic bietet im Gegensatz zur herkömmlichen mathematischen Logik, die nur „wahre“ oder „falsche“ Aussagen kennt, die Möglichkeit, Aussagen zu formulieren, die zu einem gewissen Grad wahr und gleichzeitig zu einem gewissen Grad falsch sind. Fuzzy Logic entspricht somit dem menschlichen Ansatz, Dinge zu beschreiben. Die strikten Aussagen „Ja“ und „Nein“ werden ersetzt durch eine Spanne von 0 bis 1. 0 ist in diesem Falle gleichbedeutend mit „Nein“ (paßt gar nicht bezüglich der Klassifikation) und 1 mit „Ja“ (paßt vollständig bezüglich der Klassifikation). Alle Werte zwischen 0 und 1 sind ein mehr oder weniger sicherer Zustand von „Ja“ und „Nein“. Ein beliebiger Merkmalsbereich kann so auf einen Wertebereich zwischen 0 und 1 projiziert werden. Fuzzy Logic Verfahren haben sich in zahlreichen Softwareanwendungen bewährt. Im Bereich der Fernerkundung ist Fuzzy Logic in verschiedenen Klassifikationsverfahren zu finden (Schowengerdt 1997).

Die Klassen können mittels vielfältiger Parameter beschrieben werden, es sind Vererbungen von Merkmalen auf andere Klassen möglich. Dies erlaubt beispielsweise die Unterscheidung von Wald und Stadtwald: Beide Klassen haben dieselben spektralen Eigenschaften (die bei der Merkmalsdefinition vererbt werden können), durch die Einbeziehung der Grenzlänge zu Nachbarobjekten Stadt kann dann in der weiteren Klassifikation feiner unterschieden werden. Mit der Definition eines Regelsatzes werden verschiedene hierarchische Ebenen festgelegt, Objekte können in den unterschiedlichen Maßstäben klassifiziert werden, abhängig davon, wo sie am eindeutigsten erkennbar sind. Auch ein minimaler/maximaler Abstand zu anderen Objekten kann definiert werden. Ferner können Klassen aus Unterklassen zusammengesetzt und definiert werden.

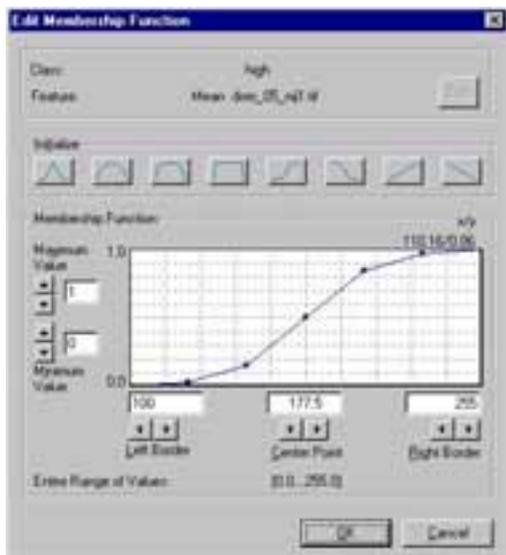


Abb. 76: Eingabefenster zur Definition von Merkmalen, mittels Fuzzy-Logic-Operatoren

Neben der regelbasierten Klassifizierung von Daten liegt ein Vorteil des Programms in der Integration von heterogenen Daten mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen und spektralen Eigenschaften, Daten unterschiedlichster Herkunft können gleichzeitig analysiert werden. Für die Interpretation hilfreich ist die mögliche Einbindung von Vektordatensätzen für die Klassifizierung und Segmentierung. Bildverarbeitungs- und GIS-Funktionen sind somit vollständig integriert.

9.5 Untersuchung des „scale parameter“ bei der Segmentierung

Erster Schritt der verwendeten Methode ist die Segmentierung des Datensatzes. Dies geschieht ohne Vorkenntnis. Einzugeben ist lediglich ein sog. Scale parameter, der ein Heterogenitätsmaß repräsentiert. Dieser scale parameter ist eine abstrakte Zahl und entspricht einer oberen Schranke an Heterogenität, d.h., kleinere Objekte werden so lange zu größeren zusammengefaßt, bis diese Schranke erreicht ist. Der Scale Parameter bestimmt dabei die maximal zugelassene Veränderung der Heterogenität, die bei einer Fusion mehrerer Objekte entsteht mit einer indirekten Relation zu der Objektgröße der gebildeten Objekte. Die Heterogenität hängt dabei direkt linear von der Objektgröße ab: Bei gleichbleibendem Größenparameter erhält man in einem heterogenen Bild kleinere Objekte als in einem weniger heterogenen Bild. Die Heterogenität von Objekten wird mittels Farbe und Form definiert. Bei der Segmentierung können Farb- und Formhomogenität gewichtet werden. Wichtigstes Kriterium für die Bildung der Segmente ist die Farbheterogenität, je nach Charakter der auszuwertenden Daten und Aufgabenstellung können die Parameter „shape“ und „compactness“ wichtige Zusatzinformationen liefern und das Ergebnis der Segmentierung verbessern. Nachteil bei einer erhöhten Berücksichtigung der Kompaktheit ist die damit einhergehende Reduzierung der Reproduzierbarkeit des Ergebnisses.

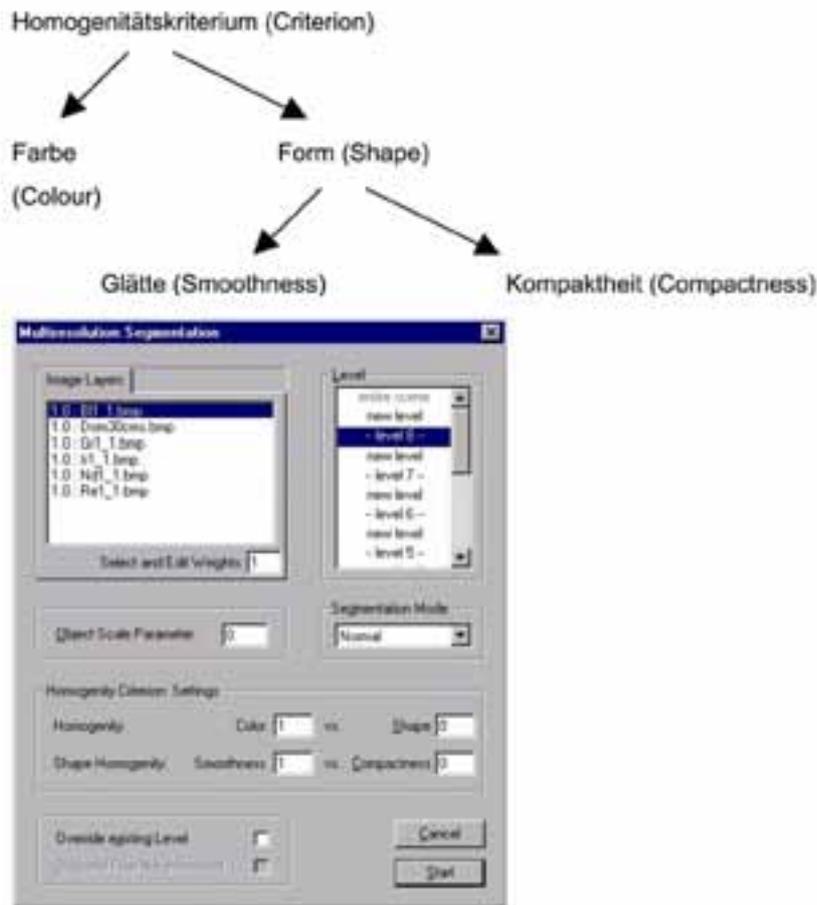


Abb. 77: Parameter für die multiskalare Segmentierung, gewichtet werden können der Einfluß der einzelnen Kanäle auf die Segmentierung, der object scale parameter und die Homogenitätsparameter. Ferner können bereits bestehende Abgrenzungen einbezogen werden.

Ziel ist eine weitgehend automatisierte Auswertung der Daten, die Bearbeitung erfordert somit ein vereinheitlichtes Vorgehen. Fragestellung bei der Segmentierung ist, inwieweit der frei wählbare scale parameter vorhersagbar ist, welche Zusammenhänge es mit der konkreten räumlichen Aggregation gibt und inwieweit die Segmentierung hierbei optimiert werden kann.

Hierfür wurden verschiedene Parameter getestet, geändert wurde jeweils lediglich der scale parameter, die Kriterien Farbe und Form wurden einheitlich gehalten.

Durch den scale parameter wird die Anzahl der Segmente und im Bild und deren jeweilige Größe verändert. An zwei Beispielen soll diese Veränderung der Segmente untersucht werden. Als Testgebiete dienen ein ländliches und ein städtisches Gebiet (Abb. 78), der Ausschnitt hat eine Größe von 2220 mal 1790 Pixeln, die Auflösung beträgt 50 cm.



Abb. 78: Testdatensatz für die Untersuchung verschiedener Scale Parameter

Die fünf Kanäle des gewählten Ausschnitts (Nadir, Grün, Blau, Rot, Infrarot) wurden jeweils einzeln und unter Einbeziehung aller Kanäle segmentiert. Getestet wurden jeweils 16 Scale Parameter (10 bis 150 in Zehnerschritten, 200). Abb. 79 zeigt die Ergebnisse der Segmentierung mit verschiedenen Scale Parametern, eine Tabelle mit den Einzelergebnissen ist im Anhang zu finden.

Es zeigte sich durchgehend, daß bei gleicher Scale Parameter Zahl im ländlichen Datensatz erheblich mehr Segmente gebildet werden als im städtisch geprägten Bild (bis zu 40% mehr). Die größten Unterschiede sind hierbei mit 20.000 Segmenten im blauen Kanal (54.000 Segmente in der Stadt gegenüber 74.000 Segmenten im ländlichen Gebiet, Scale Parameter 10) festzustellen, am geringsten ist der Unterschied im grünen Kanal (53.000 im städtischen Bereich gegenüber 58.000 im ländlichen Bereich).

Dies widerspricht dem optischen Eindruck und einem visuellen Vergleich beider Szenen: Während der urbane Datensatz sehr heterogen wirkt mit einer großen detailreichen Fülle von Formen und Objekten, zeigt das ländliche Datensatz großflächige Einheiten (Felder, Wasser etc.) und wenige feine Strukturen. Die Anzahl der gebildeten Segmente pro Kanal ist unterschiedlich, sie schwankt bei einer Scale Parameter Zahl von 10 im städtischen Bereich zwischen 54.000 (blau) und 61.000 (rot) bzw. Nadir (71.000). Generell ist der Nadir-Kanal aufgrund seiner höheren Auflösung und des somit höheren Detailreichtums der Kanal mit den meisten Segmenten.

Beim Anwachsen des Scale Parameters wird die Anzahl der Segmente erwartungsgemäß kleiner, diese Abnahme ist jedoch in den verschiedenen Kanälen unterschiedlich ausgeprägt und nicht linear (Abb. 80).

Je nach Wahl des Scale Parameters ändern sich auch die Grenzen der Segmente. Dies ist insbesondere in Übergangs- und Schattenbereichen zu beobachten, wo auch ein visueller Auswerter Probleme hätte, eine eindeutige Grenze zwischen Gebieten festzulegen.

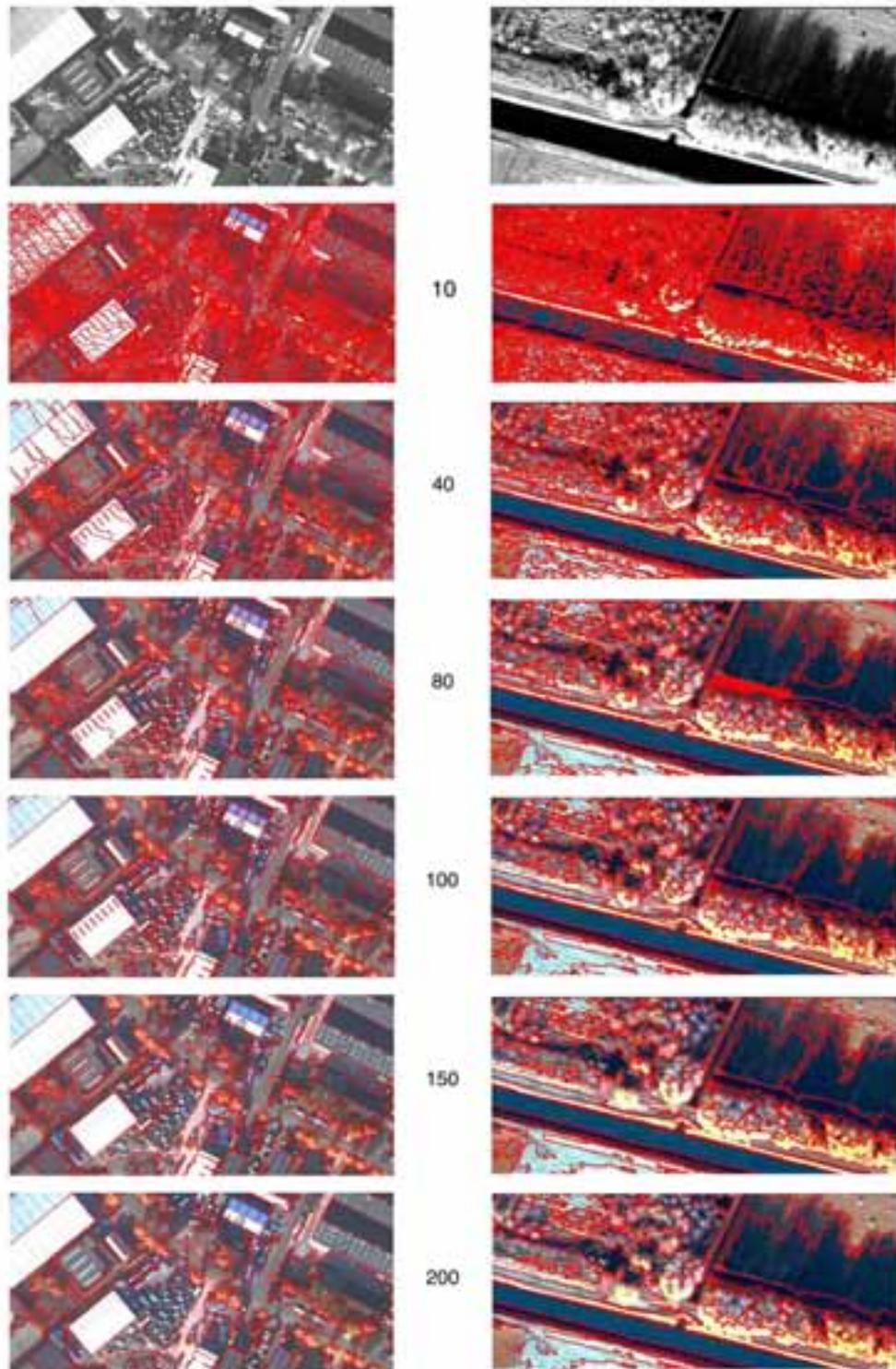


Abb. 79: Ergebnis der Segmentierung mit unterschiedlichen Scale parametern, links ein städtischer, rechts ein ländlicher Bereich, als Grundlage für die Bildbeispiele diente das Ergebnis der Nadirsegmentierung. Die Zahlen geben den jeweiligen scale parameter an.

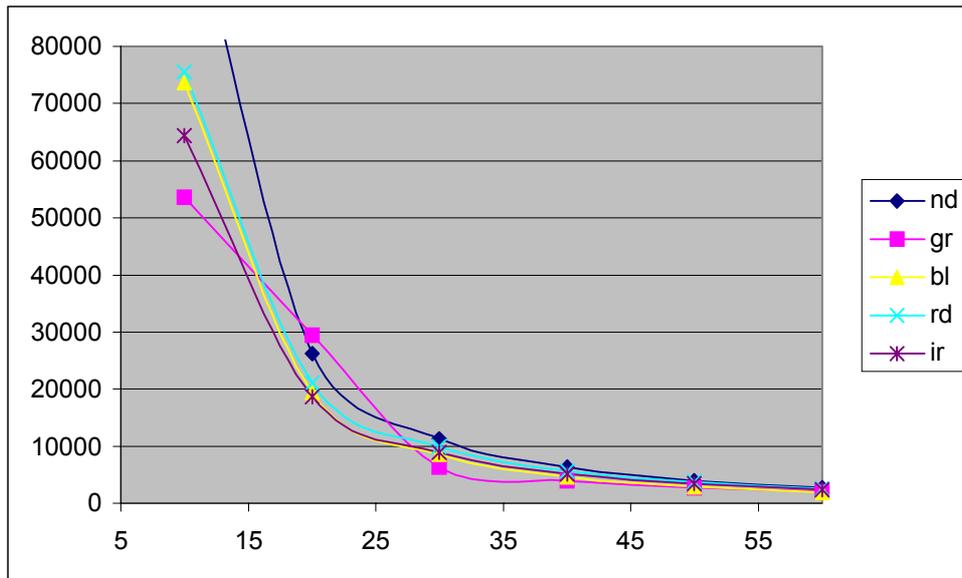


Abb. 80: Vergleich verschiedener scale parameter für die verschiedenen Kanäle, gezeigt ist der Bereich von 10 bis 60 (x) und die Anzahl der Segmente (y).

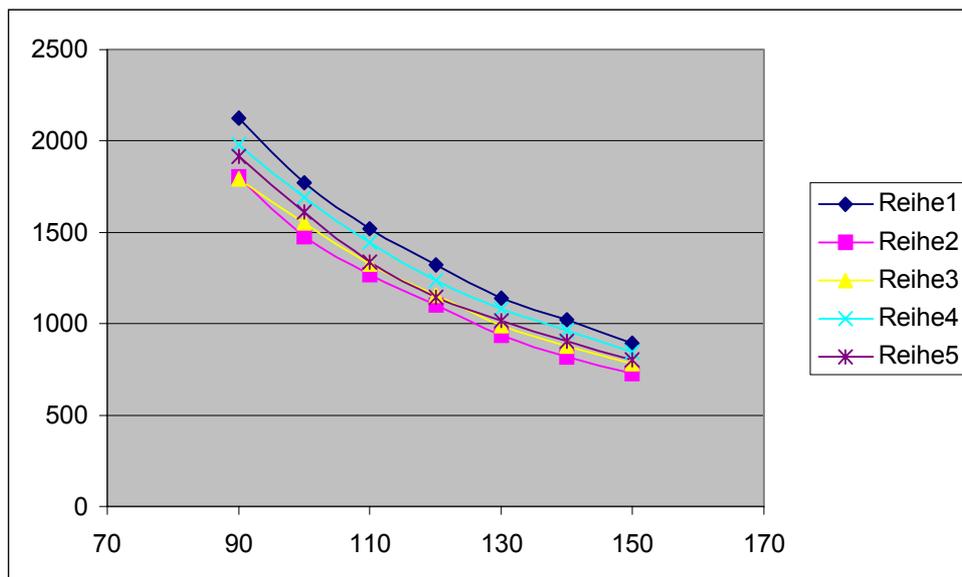


Abb. 81: Vergleich verschiedener scale parameter zwischen 90 und 150. Deutlich ist das unterschiedliche Verhalten der fünf Kanäle.

Somit bleibt die Bestimmung des Maßstabsfaktors ein überwiegend iterativer Prozeß. Die spätere Anzahl und Größe der Segmente ist nur bedingt voraussagbar, selbst bei (vermeintlich) klar strukturierten Datensätzen. Sie hängt u.a. ab von der Struktur des zu bearbeitenden Datensatzes (heterogene oder homogene Flächen). Bei der hohen Auflösung der untersuchten Daten bildet z.B. jede Ackerfurche ein Segment. Je nach Aufgabenstellung müssen zunächst Erfahrungswerte gesammelt werden, welche Einstellung des Scale Parameters das Bild in adäquate Segmente teilt. Dies erschwert automatisierte Vorgehensweisen. Die gesuchten Objekte können zum Beispiel Einzelbäume sein oder Forststände – abhängig von der Zielsetzung der Analyse und dem Bearbeitungsmaßstab. Vorteil des Verfahrens ist die gleichzeitige Verfügbarkeit verschiedener Maßstäbe – es können sowohl die Segmente, die gesamte Forststände repräsentieren wie auch die, die Einzelbäume abbilden, gleichzeitig in der Interpretation berücksichtigt werden.

9.6 Die objektorientierte Analyse von hochauflösenden digitalen Kameradaten: Eine Methode zur automatisierten Aktualisierung einer topographischen Karte

Die hochauflösenden Daten der HRSC-A wurden mittels des vorgestellten Softwarepaketes bearbeitet. Als Testgebiet diente eine Region in den Niederlanden. Aufgabenstellung war die Aktualisierung eines Vektordatensatzes mittels klassifizierter Rasterdaten. Zielobjekte der Auswertung waren zunächst Häuser. Die Untersuchung sollte die Eignung neuer Datenquellen und Methoden für den Aktualisierungsprozeß prüfen. Der Ansatz besteht aus zwei grundlegenden Strategien: Zunächst erfolgt eine Segmentierung des Bildmaterials in verschiedenen Maßstäben. Die Größenordnung von Bildobjekten läßt sich an die Skala der jeweiligen Fragestellung anpassen. Grundidee ist die Schaffung eines hierarchischen Netzes von Bildobjekten, die Bildinformation liegt gleichzeitig in verschiedenen Maßstäben zur parallelen Verarbeitung vor. Die Bildobjekte sind nachbarschaftlich und hierarchisch miteinander vernetzt, jedes Objekt "kennt" seine Nachbarobjekte und Unterobjekte. Dies erweitert die Analysemöglichkeiten (Baatz & Schäpe 1999 und 2000). Anschließend werden die gefundenen Bildobjekte wissensbasiert mittels fuzzy logic Operatoren klassifiziert.

9.7 Das Arbeitsgebiet, verfügbare Daten

Als Testgebiet wurde die niederländische Stadt Nijmegen gewählt, das Gebiet wurde Anfang November 1999 geflogen. Der Datensatz hat eine Auflösung von 15 cm (panchromatisch), das Oberflächenmodell hat eine Auflösung von 50 cm (x,y) bzw 10 cm (z). Zur Verfügung stand ferner ein Vektordatensatz der Top10Vector, Bearbeitungsstand 1998. Der Vektordatensatz lag in arc info vor und wurde für die weitere Verarbeitung transformiert. Zur Bearbeitung wurden Raster- und Vektordatensätze auf eine einheitliche Auflösung von 50 cm heruntergerechnet.

9.8 Der bisherige Herstellungs- und Aktualisierungsprozeß

Der niederländische topographische Dienst (TDN) stellt als nationale Kartenbehörde Karten und Datensätze in den Maßstäben von 1:10 000 bis 1:500 000 her. Eines der Produkte ist die Top10Vector, ein digitaler topographischer Datensatz in Vektorformat, der in den Maßstabbereichen von 1:10 000 bis 1:25 000 eingesetzt wird. Top10Vector besteht aus 1250 Datensätzen, dies entspricht 675 Kartenblättern mit einer Fläche von je 65 km². Jährlich werden zwischen 300 und 400 Datensätze aktualisiert.

TOP10Vector wird auf der Grundlage von Schwarz-weiß-Luftbildern hergestellt und aktualisiert, die im Maßstab 1:18 000 aufgenommen werden. Ferner wird ein großer Teil der Änderungen mittels Geländearbeit ermittelt. Die eingesetzten Luftbilder werden aus einer Höhe von 3800 m mit einer Reihenmeßkammer (Brennweite 150 oder 210 mm) mit einer Überlappung von 50% aufgenommen. Jedes Bild deckt eine Fläche von 17 km² ab. Acht überlappende (entsprechend vier nicht überlappenden) Fotos decken die Fläche eines Kartenblattes der Top10Vector ab. Jedes Frühjahr wird ein Viertel der Fläche der Niederlande geflogen, um die für die Aktualisierung benötigten Luftbilder aufzunehmen. Ein Viertel der Staatsfläche entspricht rund 1350 Luftbildern. Die Aktualisierung basiert auf der Interpretation der Luftbilder und Geländebegehungen. Jährlich wird ein Viertel des Kartenwerkes aktualisiert, nach vier Jahren ist entsprechend der gesamte Datensatz komplett erneuert. Das Datum der Luftbildaufnahme gibt auch den Stand der Aktualisierung an, durch den langen Revisionsprozeß bedingt sind die Daten oft bereits ein Jahr alt, wenn sie ausgewertet werden.

Der jetzige Aktualisierungsprozeß läßt sich in sieben Schritte einteilen, von denen der größere Teil parallel durchgeführt wird:

- Vorbereitung der Luftbilder und Vektordaten
- Aufnahme von Änderungen im Gelände und im Luftbild
- Scannen der Luftbilder
- Photogrammetrische Verarbeitung
- Orthophotoproduktion
- Digitalisierung
- Überprüfung

Eine detaillierte Beschreibung des Aktualisierungsablaufs ist nachzulesen bei Asperen 1996.

Die Aktualisierung (Abb. 77) beginnt mit einem visuellen Vergleich der auf 1:10 000 vergrößerten Luftbilder mit den als transparentem Film ausgegebenen TOP10Vector Daten. Veränderungen werden auf dem Luftbild vermerkt bzw. auf dem Film gestrichen. Dieser Vergleich wird teilweise am Schreibtisch, teilweise im Gelände gemacht. Nach der Überprüfung im Gelände werden die Luftbilder inklusive der auf ihnen vermerkten Änderungen gescannt. Parallel zu der Interpretation/Geländearbeit findet die photogrammetrische Prozessierung der Daten statt, diese beinhaltet Aerotriangulation und Bündelblockausgleich. Mit Hilfe eines Höhenmodells werden schließlich aus den gescannten Luftbildern Orthofotos gerechnet. Auf diesen Orthobildern werden dann die Änderungen digitalisiert und somit der Vektordatensatz aktualisiert. Die digitalisierten Punkte, Linien und Flächen werden mittels eines Schlüssels attribuiert, Polygone automatisch geschlossen. Abschließend werden die Daten mittels automatischer und visueller Verfahren überprüft (Asperen 1996).

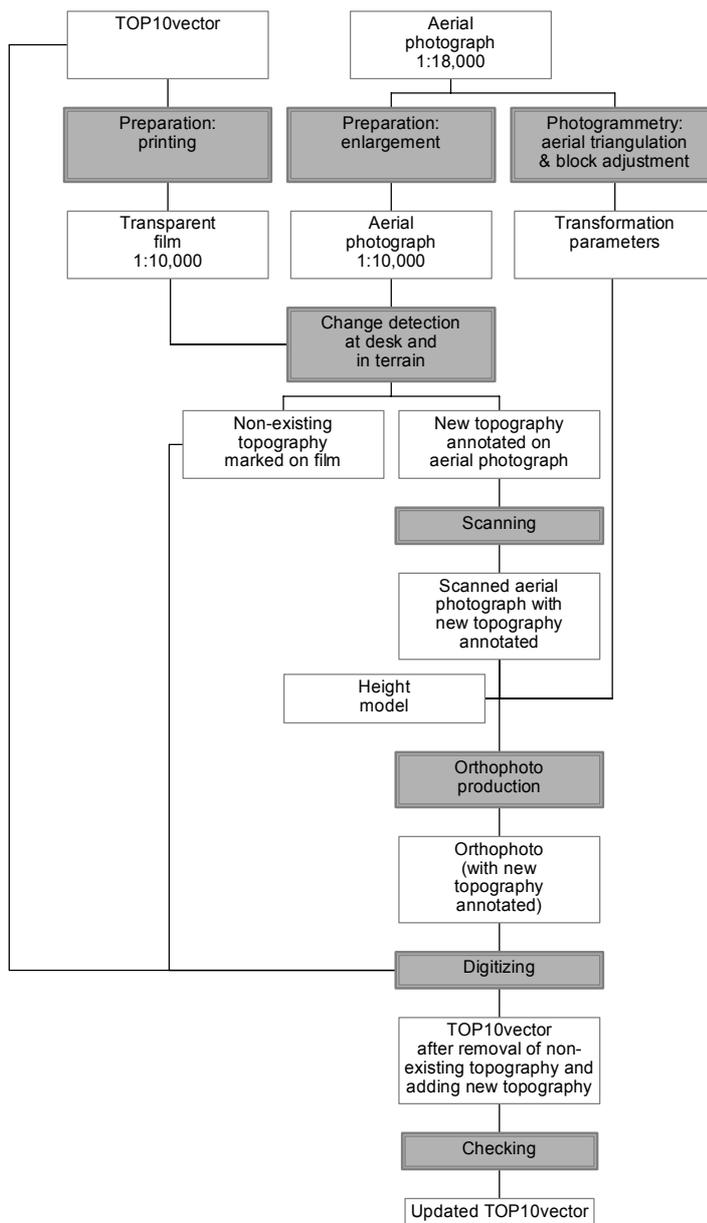


Abb. 82: Übersicht über den Aktualisierungsprozeß für die Top10Vector der Niederlande (Asperen 1996) .

9.9 Die Verschneidung mit Vektordaten

Die unterschiedliche geometrische Grundlage der Datensätze aus Luftbildern und digitalen Kameradaten spielt auch hier eine Rolle. Als Grundlage für die Bearbeitung werden unentzerrte Luftbilder eingesetzt. Die luftbildtypischen radialen Versätze und Mißinterpretationen führen zu falschen Positionen der Hausvektoren (siehe Abb. 84).

Gründe für die Fehlplazierungen der Hausvektoren:

- Mißinterpretationen bei der visuellen Auswertung (z.B. durch Schattenbereiche)
- Radiale Versätze der Objekte

Auftretende Fehler:

Falsche geometrische Position von Hausvektoren

- Rotiert
- Position verschoben

Falsche Form

- Größe falsch (zu groß oder zu klein)

Fehlinterpretation aufgrund von Schatten

- Fehlende Häuser

Es gibt keinen systematischen Fehler in den Vektordaten, der durch ein einfaches Verschieben des Datensatzes behoben werden könnte, die Versätze weisen (radial) in alle Richtungen. Exakte Paßgenauigkeit kann lediglich bei hohen Gebäuden angenommen werden, diese wurden terrestrisch vermessen.

Im Rahmen eines automatisierten Aktualisierungsansatzes muß dies berücksichtigt werden. Die Geometrien der gefundenen Häuser stimmen nicht mit denen der Vorlage überein. Bei einem Vergleich der Datensätze muß somit ein großzügiger Radius für Veränderungen definiert werden. Zum Vergleich von neu gefundenen Häusern und Altbestand konnte somit kein exakter Parameter gesetzt werden, definiert wurde ein Mindest-Überlappungsbereich beider Informationen. Für den Ansatz mit dem Softwarepaket eCognition mußten die Vektordaten rasterisiert werden.



Abb. 83 zeigt die Überlagerung dieser rasterisierten Hausdaten mit dem Bilddatensatz.Nadirbild und überlagerter Vektordatensatz, Vektordaten wurden rasterisiert

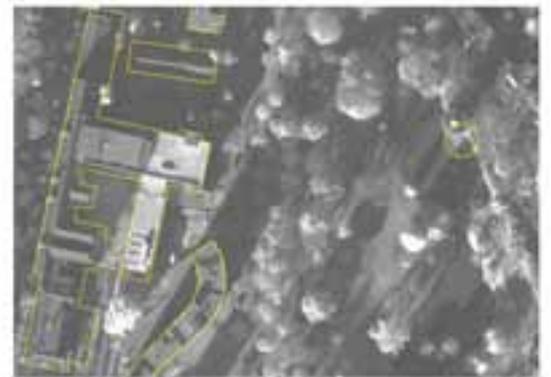
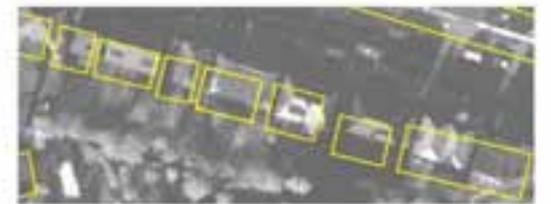
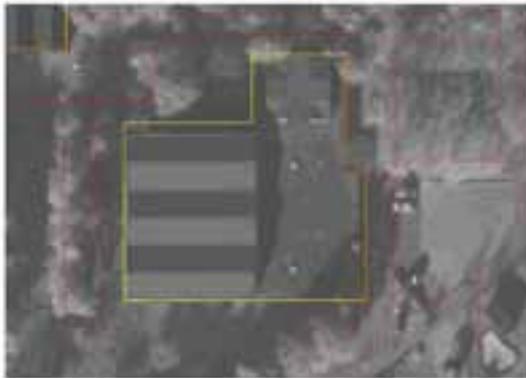


Abb. 84: Verschiedene Fehler bei der Überlagerung von Top10Vector-Daten mit den digitalen Kameradaten: falsche geometrische Position von Hausvektoren (rotiert oder verschobene Position) (obere Reihe, unten rechts), Mißinterpretationen bei der visuellen Auswertung (z.B. durch Schattenbereiche) (Mitte Links), falsche Dimensionen der Hausvektoren (zu groß oder zu klein, Mitte rechts)

9.10 Die automatisierte Aktualisierung von Karten. Ein Ansatz mit eCognition



Abb. 85: Eingangsdaten: Nadir und Digitales Oberflächenmodell (jeweils 50 cm)

Der entwickelte Ansatz zur Hauserkennung lässt sich in vier Teilen gliedern:

- Multiskalare Segmentierung des Datensatzes
- Unterteilung des Datensatzes in relativ hohe und relativ niedrige Bereiche
- Unterteilung der gefundenen hohen Bereiche in bebaute Gebiete und Vegetation
- Kombination von rasterisiertem Vektordatensatz und klassifiziertem Bild, um neue Häuser zu erkennen.

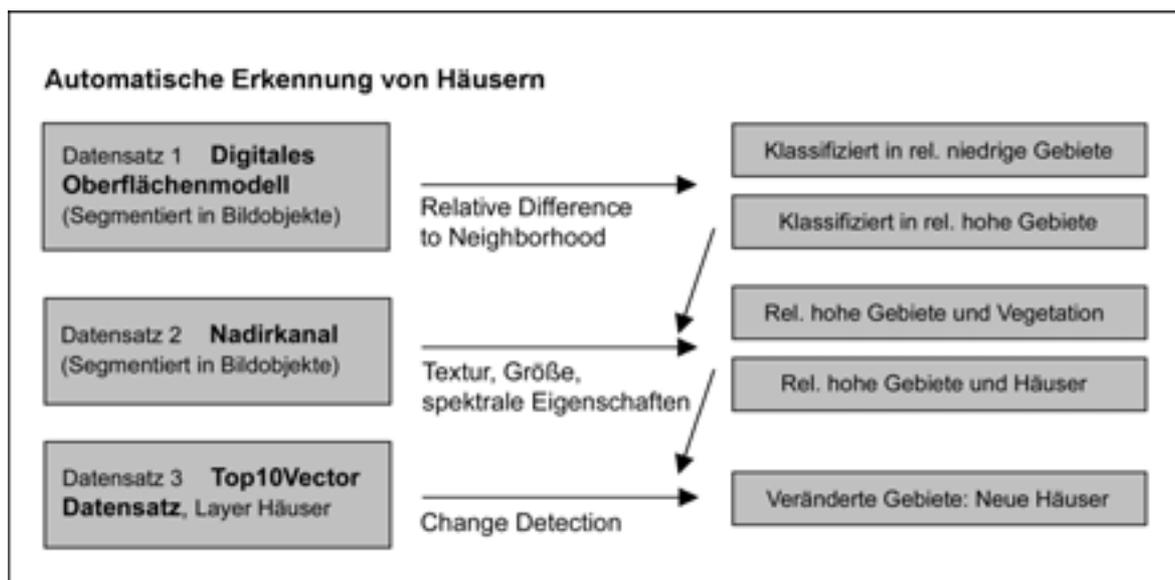


Abb. 86: Strategie zur automatisierten Hauserkennung

Der Datensatz wurde zunächst segmentiert, hierbei wurden beide Kanäle (Digitales Oberflächenmodell und Nadir) gleichgewichtet berücksichtigt. Abbildung 87 zeigt die Originaldaten und das Ergebnis der Segmentierung, das sehr komplexe Eingangsbild wird durch die Segmentierung klar strukturiert. Erste Ansätze, lediglich das DOM für die Segmentierung zu verwenden, zeigten keine guten Ergebnisse, insbesondere die Hauskanten (gerade Linien) wurden unbefriedigend wiedergegeben.

Anschließend wurde ein Regelsatz für die Klassifizierung definiert. Dies geschah in mehreren Schritten. Die Basisinformation zur Erkennung wurde hierbei vom DOM geliefert. Drei Eigenschaften von Häusern waren Grundlage für die Definition der Klasse Haus: Sie sind höher als ihre Umgebung, sie haben eine minimale/maximale Größe und sie haben – verglichen mit Vegetation – eine homogene Textur.

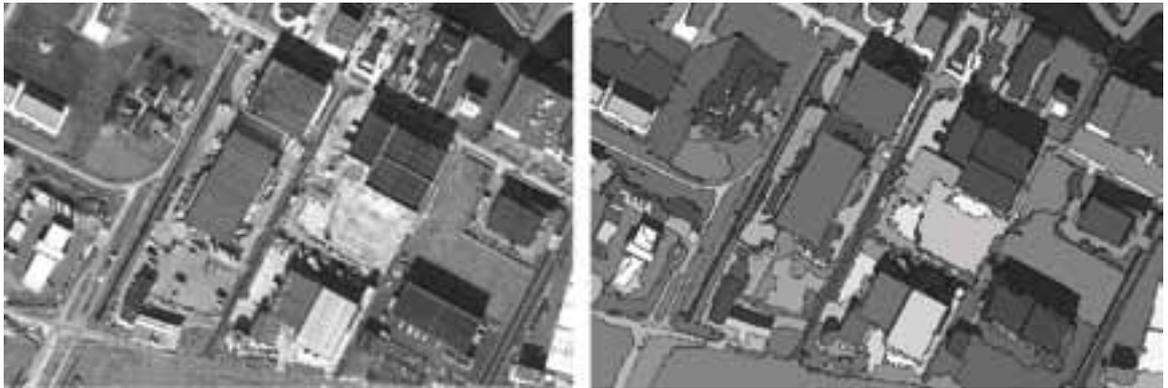


Abb. 87: Resultat der Segmentierung: Originaldatensatz Nadir (links), segmentiertes Bild (rechts)

Erster Schritt war die Unterscheidung des Datensatzes in relativ hohe und relativ niedrige Bereiche. Hierfür wurde die Möglichkeit genutzt, Nachbarschaftsverhältnisse zu definieren. Zur Unterteilung in hohe/niedrige Bereiche diente das DOM, hohe Objekte erscheinen hier heller als niedrige, dies konnte mittels des Parameters "mean difference to darker neighbours" definiert werden. Diese Unterscheidung funktioniert nur, wenn die relative Höhe zueinander berücksichtigt wird, absolute Werte des DOM können hier nicht als Kriterium verwendet werden. Würde man ein normalisiertes DOM verwenden, also die absolute Höhe der Objekte über Grund, könnte an dieser Stelle ein konkreter Wert stehen. Die Generierung dieser Höheninformation geschieht in der Regel über Filterverfahren (üblich z.B. bei der Prozessierung von Lidar-Daten, gleitender Minimumfilter) oder mittels Punktinformation über Gelände und Oberfläche. Die Prozessierung ist nur durch erheblichen Mehraufwand möglich, die entstehenden Fehler durch die innerhalb eines solchen Verfahrens gemachten Annahmen (z.B. lineare oder konstante Höhenvariation) können a priori nicht beziffert werden (DLR 1999). Als zweiter Parameter ging ein Minimalwert für das DSM ein.

In der nächsten Stufe werden die gefundenen hohen Bereiche weiter unterteilt. Zur Unterscheidung zwischen Gebäuden und anderen hohen Objekten (im allgemeinen Vegetation) wurden die verschiedenen Textureigenschaften herangezogen. Zur Unterscheidung zwischen Vegetation und Nicht-Vegetation könnte hier auch die Information aus einem zusätzlichen NDVI-Kanal genutzt werden (Normalised Difference Vegetation Index). Wie in Kapitel 7 diskutiert, eignen sich die HRSC-A-Daten aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften nicht zur Generierung des NDVI, dies wird erst mit der neuen Kamerageneration möglich sein.

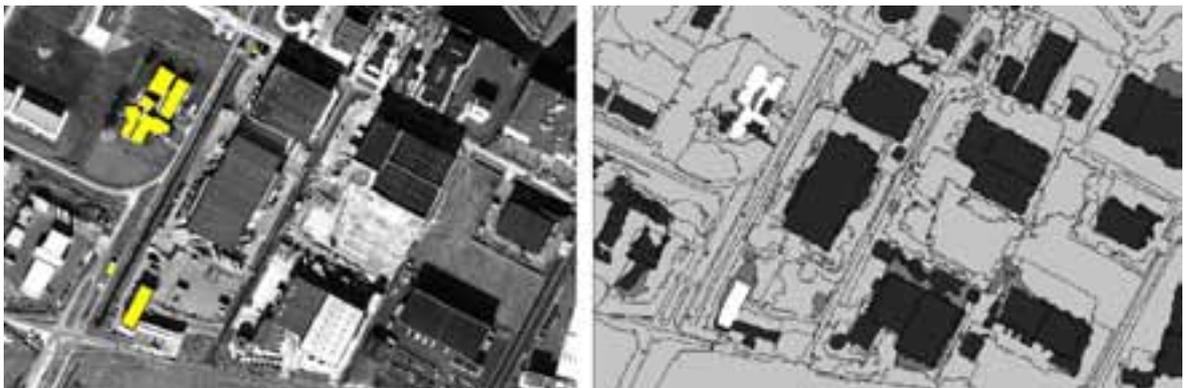


Abb. 88: Nadirdatensatz mit überlagertem Vektordatensatz und Ergebnis der Hauserkennung (weiß: Häuser im Vektordatensatz, helles Grau: niedrige Gebiete, dunkles Grau: neue Häuser, Grau: Schattenbereiche)

Im letzten Arbeitsschritt wurden der rasterisierte Vektordatensatz und die mittels Klassifizierung erkannten Häuser verschnitten und somit Gebiete neuer Bebauung erkannt. Dieses Ergebnis kann als Vektordatensatz exportiert werden.

9.11 Diskussion der Ergebnisse

Die Häuser der Testregion konnten detektiert werden, auch in anderen Gebieten konnten Häuser zuverlässig klassifiziert werden. Durch die Nutzung weniger Parameter zur Beschreibung von Textur, Form und spektraler Eigenschaft erwies sich der Ansatz als stabil. Die Zuverlässigkeit der Hauserkennung hängt im wesentlichen ab von der Qualität der Eingangsdaten, insbesondere des Oberflächenmodells. Sowohl an die Bilddaten wie auch an das Oberflächenmodell werden sehr hohe Anforderungen gestellt. Fehler im DOM wirken sich direkt auf die Güte der Objekterkennung aus. Besonders in dicht besiedelten Stadtgebieten mit engen Straßen führt dies zu Problemen, da die DOM-Generierung hier besonders schwierig ist. Auch der Klassifizierungsansatz hat Probleme mit diesen Regionen, da die Häuser sehr eng zusammenstehen und als Einzelgebilde nicht mehr unterscheidbar sind. Hier kann die Nutzung des vorliegenden Vektordatensatzes helfen. Er kann bereits bei der Segmentierung Grenzen definieren und so zur Unterscheidung einzelner Gebäude beitragen. Für die Erkennung neuer Häuser sind die Innenstadtbereiche/Altstadtbereiche nicht entscheidend, die Gebiete großer Veränderungsdynamik sind außerhalb dieser zentralen Bereiche zu erwarten.

Schwierigkeiten ergaben sich bei der Unterscheidung von Häusern und Nichthäusern durch LKW. Die zweifelsfreie Erkennung von kleinen Häusern wird so erschwert, da ihre Ausmaße und Höhen denen von LKW ähnlich sind. Ferner erschwerten die Schattenbereiche im Bilddatensatz die Auswertung. Als schwierig stellte sich ferner die Erkennung von großen Hausdächern heraus, da sie im Rahmen der Segmentierung in mehrere Einheiten unterteilt wurden. Die Definition eines zusätzlichen Parameters (Grenze zu Häusern) machte es möglich, auch diese Bereiche zu erfassen. Exakte gerade Hauskonturen können aus den Orthobilddaten der HRSC-A nicht generiert werden, die Gründe hierfür sind in Kap. 4 diskutiert. Durch die Nutzung eines sehr hochauflösenden Oberflächenmodells zur Orthobildgenerierung entstehen Ausreißer an Kanten wie Hausdächern, dies wirkt sich auf die Qualität der Segmentierungseinheiten aus.

Als vorteilhaft zeigte sich die gleichzeitige Verfügbarkeit von hochauflösenden panchromatischen Datensätzen und des hochauflösenden Oberflächenmodells (x,y: 50 cm, z: 10 cm) und die hohe Genauigkeit der Datensätze. Oberflächenmodell und Nadirdatensatz haben dieselbe Grundlage, das bei der Nutzung von Daten aus verschiedenen Quellen auftretende Problem der Ko-Registrierung entfällt.

Problematisch war der Abgleich mit dem bestehenden Vektordatensatz, hier limitierten die verschiedenen geometrischen Grundlagen der Daten eine Automatisierung. Die verschiedenen Datenquellen (multitemporale Vektordatensätze aus Luftbildern und digitale Bilddaten) sollten angepaßt werden, um eine weitere Automatisierung zu ermöglichen, eine komplette Neuaufnahme würde eine einheitliche Grundlage schaffen.

Zusammenfassung und Ausblick

Digitale Kartenwerke spielen zunehmend eine wichtige Rolle auf dem Geoinformationsmarkt. Die Nutzbarkeit dieser Basisdaten hängt von der Aktualität dieser Datensätze ab. Es gibt einen großen Bedarf an schnellen, kostengünstigen, verlässlichen und automatisierten Aktualisierungsverfahren, um diesen Ansprüchen gerecht zu werden.

Hochauflösendes Bildmaterial kann mittels objektorientierten Ansätzen interpretiert werden, die Ansätze haben das Potential, auch komplexe Fragestellungen, die komplizierte Klassendefinitionen erfordern, zu bearbeiten. Die objektorientierte Bearbeitung von Bildinformation kommt zudem dem menschlichen kognitiven Prozeß sehr nahe. Durch die Segmentierung der Daten wird die große Anzahl der zu klassifizierenden Einheiten reduziert. Völlig neu in der Bildverarbeitung ist die Möglichkeit, gleichzeitig auf verschiedenen Maßstabsebenen arbeiten zu können. Im Bereich der Geoinformation/GIS wird im Allgemeinen mit Vektor-coverages gearbeitet, die die realen Grenzen von Objekten/Gebieten repräsentieren.

Die Kombination von neuen Auswertungsansätzen (multiskalare Segmentation, hierarchische Netzwerke) und den hochauflösenden multispektralen Daten der digitalen Kamera HRSC-A mit einem genauen Oberflächenmodell zeigt überzeugende Resultate und ist ein wichtiger Schritt zur automatisierten Aktualisierung von Karten und zur Integration von Fernerkundung und GIS.

Die Erkennung von Einzelhäusern war möglich durch den Einsatz von spektraler Information und Oberflächeninformation, beides geliefert durch die digitale Kamera. Von Vorteil für die Interpretation der Daten waren die Abbildungseigenschaften der Kameradaten im Vergleich zu den

bisher genutzten Luftbildern. Durch die Nutzung eines Oberflächenmodells zur Orthobildgenerierung können über das Terrain aufragende Objekte genauer abgebildet werden, ferner tritt der bei Luftbildern übliche radiale Versatz von Objekten nicht auf, was eine verbesserte geometrische Genauigkeit der abgebildeten Häuser bewirkt.

Als problematisch bei der jetzigen Aktualisierung der Top10Vec erweist sich die mangelnde Verfügbarkeit von Orthofotos für die Geländearbeit und die visuelle Interpretation. Die geometrisch genauen Daten stehen erst zum Abschluß des Verfahrens zur Verfügung. Der Einsatz digitaler Kameradaten erweist sich hier als vorteilhaft, durch die vollständig digitale Datenaufnahme und automatisierte Prozessierung stehen die Orthobilddaten umgehend zur Verfügung. Die Geschwindigkeit der Orthobildgenerierung aus 1350 Luftbildern bei den Topographischen Diensten ist durch die begrenzte Verfügbarkeit von Geräten und Personal nicht steigerbar. Diese Aussage trifft im Allgemeinen auch für andere Nutzer von Luftbilddaten zu. Die bessere geometrische Abbildung von Objekten in den Datensätzen der digitalen Kamera macht das Ergebnis der Interpretation zudem präziser und wiederholbarer. Dies könnte bei Luftbildern durch den Einsatz eines Oberflächenmodells erreicht werden, gegen die radialen Versätze könnte eine Befliegung mit sehr großer Überlappung helfen, so daß lediglich die zentralen Bereiche des Fotos prozessiert werden. Dies ist jedoch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und des Mehraufwandes (Scannen einer großen Anzahl von Bildern, Prozessierung) keine gangbare Alternative. Der Einsatz digitaler Daten bietet somit bereits ohne Automatisierung des Verfahrens Vorteile.

Die automatisierte Aktualisierung von Karten ist eine anspruchsvolle komplexe Aufgabenstellung. Es gilt, zahlreiche Parameter zu berücksichtigen, viele der zu interpretierenden Objekte sind nur durch die Einbeziehung von Zusatzinformationen detektierbar. Dies gilt beispielsweise für Straßen und Wege, Fuß- und Radwege unterscheiden sich nicht durch die spektralen Eigenschaften, sondern durch die unterschiedliche Nutzung. Einer vollständigen Automatisierung sind somit Grenzen gesetzt.

10 Diskussion und Ausblick

Neue digitale Kamerasysteme schaffen neue Möglichkeiten der Datenakquisition und –prozessierung, stellen aber auch neue Ansprüche an die Auswertungsmethodik. Mit dem digitalen Kamerasystem HRSC-A und der speziell für die Prozessierung dieser Daten entwickelten Software steht den Geoinformationsnutzern erstmals ein operationelles System zur Verfügung, das vollständig digital und vollautomatisch hochauflösende Orthobilddaten und Oberflächenmodelle produziert. Die Eigenschaften der Daten und des Aufnahmesystems wurden diskutiert und im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Interpretation der Daten untersucht. Die beschriebenen Blickwinkelunterschiede erschweren die weitere automatisierte Auswertung der Kameradaten. An den Rändern der abgebildeten Objekte entstehen Säume, die bei pixelweisen Klassifizierungen schwer handzuhabende Pseudoklassen entstehen lassen.

Für Anwendungen in großmaßstäbigen Bereichen standen bisher lediglich Luftbilder zur Verfügung. Diese analogen Systeme werden zunehmend von digitalen Systemen abgelöst. Als Vorteile der neuen Systeme erweisen sich die hohen geometrischen Genauigkeiten, die flexible Datenaufnahme in unterschiedlichen Farbkanälen und die vollständig digitale Aufnahme und Prozessierung und die radiometrische Kalibrierbarkeit. Die schnelle Verfügbarkeit hochauflösender Orthobilddaten ermöglicht eine zeitnahe Aktualisierung von Karten – sowohl von Luftbildkarten wie auch von Produkten, die als Nachfolgeprodukte aus diesen Datengrundlagen resultieren (Vektordatensätze etc.).

Tiefgreifend unterschiedlich sind bei beiden Systemen ferner die Art und Weise der Bestimmung der Position und Lage des Kamerasystems zum Zeitpunkt der Aufnahme. Ein hochgenaues kombiniertes GPS/INS-System mißt direkt die Daten der äußeren Orientierung, dies wirkt sich positiv aus auf den Arbeitsaufwand für Datenaufnahme und Prozessierung und die erzielbaren Genauigkeiten.

Digitale Kameradaten zeigten sich als operationell einsetzbar zur Herstellung von Orthobildkarten. Hier sei insbesondere die schnelle Verfügbarkeit durch die automatisierte Prozessierung und Bildung auch sehr großer Bildmosaiken und die hohe Genauigkeit der digitalen Daten erwähnt, beides läßt sich mit Luftbildern nur unter großem Aufwand erreichen. Eine Untersuchung der Maßstabsbereiche läßt den Schluß zu, daß mit einer Auflösung von 15 cm Karten im Maßstab bis zu 1:500 (bzw. 1:250) realisiert werden können. Orthobildkarten stellen ein wichtiges Produkt zwischen den Nachführungen topographischer Karten dar, ferner liefern sie eine Grundlage für die Aktualisierung von Geoinformation. Die Auswertung kann visuell geschehen, erstrebenswert sind automatisierte Analyseverfahren.

Die vorliegende Arbeit diskutiert die Problematik einer automatisierten Auswertung hochauflösender Daten. Herkömmliche Methoden der pixelweisen Analysen zeigten sich als ungeeignet, da sie die Detailfülle der aufgezeichneten Daten nicht verarbeiten können. Die einzelnen Bestandteile von Objekten wie Bäumen oder Häusern stellen eine nicht zu beherrschende Vielfalt dar, die mit der Ansprache einzelner Pixel nicht adäquat bearbeitet werden kann. Eine Untersuchung klassischer Methoden der Fernerkundung wie überwachte/unüberwachte Verfahren zeigte unbefriedigende Ergebnisse.

Als neue Verfahren wurden das vorwiegend flächenhaft arbeitende per-parcel-Verfahren und die objektorientierte Klassifizierung diskutiert.

Die per-parcel-Methode zeigte gute Ergebnisse bei der Auswertung der Daten. Die Farbsäume durch die Blickwinkelunterschiede bereiteten bei der statistischen Analyse der parcel keine Schwierigkeiten mehr. Das Verfahren ermittelt zunächst mittels einer unüberwachten Klassifizierung Szenekomponenten, die den Inhalt des Datensatzes repräsentieren. Die klassifizierten Pixel innerhalb der definierten parcel-Einheiten werden anschließend extrahiert und ihr Verhältnis zueinander weiter ausgewertet. Ergebnis ist zunächst die prozentuelle Verteilung der Szenekomponenten in den Einheiten, anschließend werden Zusammenhänge zwischen den vorhandenen Komponenten und der Landoberfläche definiert. Grenzen findet das Verfahren bei der Interpretation feingliedriger Strukturen. Zwar können Einzelobjekte mittels der identifizierten Szenekomponenten interpretiert werden und z.B. im Rahmen der Untersuchung von Kronengrößen angesprochen werden, das Verfahren ist jedoch primär zur Untersuchung der Zusammensetzung größerer Einheiten geeignet. Einzelobjekte bleiben Teile der definierten parcel-Einheiten und somit statistische Größen.

Eine objektorientierte Analyse hingegen erlaubt die Interpretation von Einzelobjekten. Hierbei wird das Bild in homogene Objekte segmentiert, diese bilden die Grundlage für die weitere Analyse.

Der diskutierte Ansatz besteht aus zwei Strategien: Mittels multiskalarer Segmentierung wird der Bilddatensatz zunächst in Einheiten strukturiert, verschiedene Maßstabsebenen sind gleichzeitig verfügbar. Grundidee ist die Schaffung eines hierarchischen Netzes von Bildobjekten. Diese gefundenen Einheiten werden anschließend spektral mittels Nearest Neighbour oder wissensbasiert mittels Fuzzy Logic Operatoren klassifiziert. Der Ansatz zeigte überzeugende Ergebnisse bei einer automatisierten Hauserkennung und der Aktualisierung bestehender Vektordatensätze .

Es wurde ferner gezeigt, daß für die Analyse in städtischen Räumen die Einbeziehung von Oberflächeninformation unbedingt erforderlich ist. Durch die spektrale Ähnlichkeit von Bildelementen (gleiche Materialien wie z.B. bei Dächern und Straßen) bietet die Einbeziehung des Oberflächenmodells die Möglichkeit, mittels einer zusätzlich bekannten Information über die Höhe der Objekte, diese Klassen zu trennen. Texturelle Eigenschaften der Objekte helfen hier nur bedingt weiter, sie sind meist nicht signifikant unterschiedlich.

Daten der neuen digitalen Kamerasysteme werden die Grundlage für fernerkundliche und kartographische Anwendungen der Zukunft bilden. Neue Methoden der Auswertung schöpfen die Potentiale dieser neuen Datengeneration aus. Zukünftige Verfahren wie die objektorientierten Ansätze kombinieren das bisher gewonnene Wissen der spektralen Einzelpixelanalyse mit neuen zusätzlichen Auswertungsmöglichkeiten. Die vorgestellten Ansätze sind erst möglich geworden durch eine Annäherung vormals strikt getrennter Welten: GIS und Fernerkundung, die Methoden der Bildverarbeitung sind kombiniert mit der Funktionalität von GIS-Systemen und schaffen qualitativ verbesserte Analysewerkzeuge.

Literaturverzeichnis

- Achen, M, 1993: Untersuchungen über Nutzungsmöglichkeiten von Satellitenbilddaten für eine ökologisch orientierte Stadtplanung: Am Beispiel Heidelberg. Dissertation, Heidelberger Geographische Arbeiten, *Heft 91*, Universität Heidelberg.
- Albertz, J. 1991: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern: Eine Einführung in die Fernerkundung, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- Albertz, J.; Scholten, F.; Ebner, H.; Heipke, C., Neukum, G. 1992. The Camera Experiments HRSC and WAOSS on the Mars94 Mission. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 29, Part B 1, pp 216-227
- Allewelt, L., 1987: Aussagekraft multitemporaler Satellitendaten (Landsat-MSS,-TM, SPOT), vergleichende Gegenüberstellung von visueller Interpretation und digitaler Klassifizierung, Dissertation des Fachbereichs Geowissenschaften der FU Berlin, Berlin
- Anys, H., Bannari, A., He, D. C. & Morin, D. 1994. Texture analysis for the mapping of urban areas using airborne MEIS-II images. *Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition (III)*, Straßburg, pp 231-245.
- Aplin, P., Atkinson, P. & Curran P.J. 1999. Fine Spatial Resolution Simulated Satellite Sensor Imagery for Land Cover Mapping in the United Kingdom, *Remote Sens. Environ.* 68, pp 206-216
- Aplin, P., Atkinson, P.M. & Curran, P.J., 1997, Fine spatial resolution satellite sensors for the next decade. *International Journal of Remote Sensing*, 18, pp 3873-3881.
- Asperen, P. van, 1996, Digital updates at the Dutch Topographic Service, *IAPRS*, Vol. 31, Part B4, Wien, pp 891-900.
- Azimi-Sadjadi, M. R., Ghaloum S., & Zoughi, R. 1993. Terrain classification in SAR images using principal components analysis and neural networks, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 31, (2), pp 511-515.
- Baatz, M. & Lingenfelder, I. 2000: Objektorientierte Bildauswertung mit eCognition, unveröffentlichte Schulungsunterlagen, München.
- Baatz, M. & Schäpe, A. 1999. Object-oriented and multi-scale image analysis in semantic networks. *Proc. 2nd International Symposium on Operationalisation of Remote Sensing Conference and Exhibition*, CD.
- Baatz, M. & Schäpe, A. 2000: Multiresolution Segmentation an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. Strobl, J., Blaschke, T. & Griesebner G. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, Karlsruhe.
- Baltsavias, E.M., 1999: On the Performance of Photogrammetric Scanners. *Photogrammetric Week 99*, eds. D. Fritsch & D. Spiller, Wichmann, Heidelberg, pp 155-173
- Banko, G., Burger, H. & Schneider, W., 1998: Forstliche Anwendungsmöglichkeiten hochauflösender Satellitenbilddaten (<http://ivflserver.boku.ac.at/Mission - VGI.html>) (03/2000).
- Baraldi, A. & Parmiggiani, F. 1990. Urban area classification by multispectral SPOT images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 28, pp 674-680.
- Barber, D.G. & LeDrew, E.F, 1991: SAR Sea Ice Discrimination using texture Statistics: A multivariate Approach. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 57, No. 4, pp 385-395.
- Barnsley, M. J. & Barr, S. L. 1996. Inferring urban land use from satellite sensor images using kernel-based spatial reclassification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62, pp 949-958

- Barr, S. and Barnsley, M.J., 1999, Improving the quality of very high spatial resolution remotely-sensed land cover maps for the inference of urban land use maps. Proceeding of the 25th Annual Conference of the Remote Sensing Society: RSS '99 - From Data to Information, University of Wales, Cardiff, pp 111-118.
- Baudouin, Y. Cavayas, F. & Marois, C. 1995. Vers une nouvelle methode d'inventaire et de mise a jour de l'occupation/utilization du sol en milieu urbain, Can. J. Remote Sens., vol. 21, no. 1
- Bauer, C. 1994: Digitale Bildverarbeitung von großräumigen Satellitenbild-Verbänden: Mosaikbildung, multitemporale Analyse und Klassifizierung, Berlin
- Bessettes, V., Desachy, J. & Cubero-Castan, E. 1996. Applying co-operative operators for urban area detection using SPOT imagery. Proc. Europto Conf. Image and Signal Processing for Remote Sensing III, Taormina, Italy, Proc. SPIE, vol. 2955, pp 106-117
- Bill, R., 1992: Zur Erfassung raumbezogener Daten. Kilchenmann (Hrsg.): Technologie Geographischer Informationssysteme, Berlin Heidelberg, New York, pp 12-32
- Blaschke, T. 2000: Objektextraktion und regelbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten: Neue Möglichkeiten für GIS-Anwender und Planer, 5. Symposium "Computergestützte Raumplanung", www.corp.at (08/2000).
- Bruniquel-Pinel, V. & Gastellu-Etchegorry, J. P. 1998. Sensitivity of texture of high resolution images of forest to biophysical and acquisition parameters. Remote Sensing of Environment, 65, pp 61–85.
- Buck, A., de Kok, R., Schneider, T., Ammer, U. 1999: Integration von Fernerkundungsdaten und GIS zur Beobachtung und Inventur von Schutzwäldern in den Bayerischen Alpen. Strobl, J. & Blaschke, T. (Hrsg.), Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XI, Wichmann, pp 94-101.
- Coenradie, B., 1992: Waldklassifizierung und Totholzkartierung im Nationalpark Bayrischer Wald unter Verwendung von Landsat-TM- und digitalen Zusatzdaten, DLR-FB 92-10, Oberpfaffenhofen
- Cramer, M. 1999: Direct Geocoding – is aerial triangulation obsolete? Photogrammetric Week, 99, eds. D. Fritsch & D. Spiller, Wichmann, Heidelberg, pp 59-70.
- Cramer, M., Stallmann, D. & Haala, N. 2000: Direct Georeferencing using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B2, pp 198-205, Amsterdam.
- Csaplovics, E., 1992: Methoden der regionalen Fernerkundung, Anwendungen im Sahel Afrikas, Berlin Heidelberg New York.
- De Kok, R., T. Schneider, U. Ammer 1999: Object-Based classification and applications in the alpine forest environment. Intern. Archives of Photogram. and Remote Sensing, Vol. 32, Part 7-4-3 W6.
- DLR 1999: Erstellung der ersten digitalen Orthobildkarte 1:5000 auf der Grundlage digitaler Kameradaten (HRSC-A), Untersuchung des Potentials der Daten zur Aktualisierung der ALK, unveröffentlichter Endbericht, Berlin
- Donker, N.H.W. & Mulder, N.J., 1976: Analysis of MSS digital imagery with the aid of Principal component transformation, XIII Congres of ISP, Helsinki
- Dornier Satellitensysteme 1999: Prosmart Endbericht (EB), unveröffentlichter Endbericht.
- Dutra, L.V. & Mascaranhas, N.D.A, 1984: Some experiments with spatial feature extraction methods in multispectral classification. International Journal of Remote Sensing, Vol. 5, No 2, pp 303-313.
- ECognition Handbuch 2000: Online-Dokumentation www.delphi2.de/ecognition/guide (07/2000).
- EEC 1991: Anwendungen der Fernerkundung zur Beurteilung des Gesundheitszustandes des Waldes, Manual of EEC, Belgium

- ERDAS 1997: Field Guide, Version 8.2, third edition, Atlanta
- ERDAS 1997b: Production Guide, Version 8.2, third edition, Atlanta
- Flury, b. & Riedwyl, H., 1983: Angewandte multivariate Statistik, Computergestützte Analyse mehrdimensionaler Daten. Stuttgart
- Foschi, P.G. 1994: A Geometric Approach to a Mixed Pixel Problem: Detecting Subpixel Woody Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 50, pp 317-327.
- Fritz, L.E., 1996. The era of commercial Earth observation satellites. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, pp 39-45.
- Fung, T. & Chan, K. C. 1994. Spatial composition of spectral classes: A structural approach for image analysis of heterogeneous land-use and land-cover types. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60, pp 173-180.
- Gahn, M., 1994: Umweltdokumentation mit Hilfe von Color-Infrarot-Bildern. *Umwelt-Information und Karte, Tagungsband*, 43. Deutscher Kartographentag, Trier, pp 81-93.
- Gao, J. & Skillcorn, D , 1998. Capability of SPOT XS data in producing detailed land cover maps at the urban-rural periphery. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (15) pp 2877-2891
- Gastellu-Etchegorry, J.P. 1990: An Assessment of the SPOT XS and Landsat MSS Data for digital Classification of near-urban Land Cover. *International Journal of remote Sensing*, 11, pp 225-235.
- Gleitz, C.-D., 1984: Biomathematik und Medizinische Statistik, Neckarsulm.
- Gong P., Miller, J.R. & Spanner, M., 1994. Forest canopy closure from classification and spectral unmixing of scene components – multisensor evaluation of an open canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32, pp 1067-1080.
- Gong, P. & Howarth, P. J. 1990. The use of structural information for improving land-cover classification accuracies at the rural-urban fringe. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56, pp 67-73.
- Gong, P. & Howarth, P.J., 1989: Performance Analysis for Probabilistic Relaxation Methods for Land Cover Classification. *Remote Sensing of Environment*, 30, pp 33-42.
- Gong, P., Marceau, D.J. & Howarth, P.J., 1992: A Comparison of Spatial Feature Extraction Algorithms for Landuse Classification with SPOT HRV Data. *Remote Sensing of Environment*, 40, pp 137-151.
- Grunicke, J.-M., 1990: Methodische Untersuchungen zur digitalen Bildverarbeitung von Fernerkundungsdaten (Lithologie und Tektonik der zentralen Lechtaler Alpen, Tirol, Österreich), Berlin
- Grunicke, J.-M., 1993: Methods of Desertification Monitoring in Cold Semiarid Regions by Cartographic Application of Remote Sensing Data, Meissner, B. & Ripke, U. (Hg.): *Examples of Remote Sensing Cartography in Arid and Semiarid Regions*, Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, pp 217-247
- Haala, N. 1999. Combining multiple data sources for urban data acquisition. *Photogrammetric Week*, 99, eds. D. Fritsch & D. Spiller, Wichmann, Heidelberg, pp 329-339.
- Haberäcker, P., 1987: *Digitale Bildverarbeitung - Grundlagen und Anwendungen*. Hanser Verlag (Wien, München)
- Hake, G. & Grünreich, D. 1994: *Kartographie*, 7. Auflage, Berlin, New York
- Haralick, R. & L. Shapiro, 1985: Image segmentation techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 29, pp 100-132.
- Harris, P. M. & Ventura, S. J., 1995. The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61: pp 993-998.

- Heipke, C. et al. 2000: Integrated Sensor Orientation – An OEEPE-Test. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B2, pp 373-380, Amsterdam
- Hese, S., Hoffmann, A., Lehmann, F., 2000: Vergleich digitaler Waldoberflächenmodelle der HRSC-A mit Laserscannerdaten zur Bestimmung von bestandesspezifischen Parametern. Vorträge der 19. Wissenschaftlich-technischen Jahrestagung der DGPF; Publikation der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung pp 345-357.
- Hese, S., 2001. Anwendung von hochauflösenden Daten der High Resolution Stereo-Camera - Airborne (HRSC-A) zur Klassifizierung von Forstbestandesstruktur unter besonderer Berücksichtigung geostatistischer Verfahren. Dissertation, Berlin, in Druck
- Hildebrandt, G., 1996. Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Wichmann, Heidelberg.
- Hoffmann, A. & Lehmann, F. 2000. Vom Mars zur Erde – die erste digitale Orthobildkarte Berlin mit Daten der Kamera HRSC-A. Kartographische Nachrichten , 50 2/2000.
- Hoffmann, A. 1995: Vegetation Monitoring Map Bishri Mountains 1 : 250.000, Erfassung und kartographische Darstellung der Veränderung der Vegetationsbedeckung unter besonderer Berücksichtigung des Regenfeldbaus mittels Fernerkundungsdaten in der syrischen Wüstensteppe, Bishri Mountains, unveröffentlichte Diplomarbeit
- Hoffmann, A., Smith, G., Hese, S. & Lehmann, F., 2000: Die Klassifizierung hochauflösender Daten: Ein per-parcel-Ansatz mit Daten des digitalen Kamerasystems HRSC-A. Vorträge der 19. Wissenschaftlich-technischen Jahrestagung der DGPF; Publikation der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 8, pp 357-375
- Hofmann, O. 1976: Zwischenpräsentation für ein opto-elektronisches Satellitenaufnahmegerät im sichtbaren und nahen IR-Bereich, MBB Ottobrunn, maschinenvervielfältigt
- Hofmann, O., Navé, P. & Ebner, H., 1982: DPS – A digital photogrammetric System for Producing Digital Elevation Models and Orthophotos by Means of Linear Array Scanner Imagery. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 24, Part 3, pp 363-370.
- Hofmann, T., J. Puzicha & J. Buhmann, 1998: Unsupervised Texture Segmentation in a Deterministic Annealing Framework. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), 20(8).
- Hutton, J. & Lithopoulos, E., 1998: Airborne Photogrammetry Using Direct Camera Orientation Measurements. Photogrammetrie - Fernerkundung – Geoinformatik, pp 363-370.
- Itten, K., 1980: Großräumige Inventuren mit Landsat-Erderkundungssatelliten, dargestellt am Beispiel der Schweiz, Bonn-Bad Godesberg
- Jähne, B., 1997: Digitale Bildverarbeitung, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Johnsson, K., 1994. Segment-based land use classification from SPOT Satellite data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 60(1), pp 47-53.
- Kappas, M., 1994: Fernerkundung nah gebracht. Leitfaden für Geowissenschaftler. Dümmler Verlag (Bonn)
- Kenneweg, H., 1979: Luftbildauswertung von Stadtbaumbeständen – Möglichkeiten und Grenzen. Mitteilungen der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft 71, pp 159-192.
- Kerner, G. 1997: Die Luftbildkarten des Bayerischen Vermessungsamts. KN 2/97, pp 59-65
- Khorrarn, S., Brockhaus, J. A. & Cheshire, H. M 1987. Comparison of Landsat MSS and TM data for urban land-use classification. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 25, pp 238-243
- Konecny, G. 1999. The Impact of High Resolution Satellite Data on the Operationalisation of Remote Sensing for Mapping from Space. Proc. 2nd International Symposium on Operationalisation of Remote Sensing Conference and Exhibition, CD

- Kramer, H. J. 1996: *Observation of the Earth and its Environment*. Berlin, Springer
- Kraus, K. & Schneider, W. 1988: *Fernerkundung. Band 1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. (Bonn)
- Kraus, K. 1990: *Fernerkundung. Band 2: Auswertung photographischer und digitaler Bilder*. Dümmler Verlag (Bonn)
- Kraus, K., 1994: *Photogrammetrie I*. 5th edition, Dümmler Verlag, Bonn.
- Latty, R.S, Nelson, R., Markham, B., Williams, D., Toll, D., Irons, J., 1985: Performance Comparisons between Information Extraction Techniques using variable spatial Resolution Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 51, No. 9, pp 1459-1470.
- Lehmann, F., Hoffmann, A., Renouard, L. & van der Vegt, J.W. 2000: Fully digital and automatic Production of accurate Geodata: The High Resolution Stereo Camera –Airborne (HRSC-A), *GIM international 7/2000*.
- Lehmann, F.; Brand, M.; Bucher, T., Hese, S.; Hoffmann, A.; Mayer, S.; Oschütz, F.; Sujew, S.; Roatsch, T.; Wewel, F.; Zhang, Y. 1998. Data Fusion of HYMAP Hyperspectral and HRSC Multispectral Stereo and DTM Data: Remote Sensing Data Validation and Application in Different Disciplines. *Proc. 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Paris*.
- Lehmann, F.; Bucher, T.; Hese, S.; Hoffmann, A.; Mayer, S.; Oschütz, F.; Zhang, Y. 1999. Die Kombination von hyperspektralen HyMap-Daten und HRSC-A-Multispektral- und DGM-Daten zur Validierung und Nutzung in verschiedenen Anwendungsgebieten. *Vorträge der 18. Wissenschaftlich-technischen Jahrestagung der DGPF; Publikation der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 7, pp 89-105*
- Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W. 1994: *Remote Sensing and Image Interpretation*, 3rd edition, New York
- Lithopoulos, E. 1999: The Applanix Approach to GPS/INS Integration. *Fritsch & Hobbie (Hrsg.): Photogrammetric Week 1999, Wichmann Verlag, pp 53-57*
- LVA Sachsen 1998: *Orthobilder und Luftbildkarten*. Faltblatt, Sachsen
- Markham, B.L. & Townshend, J.R.G., 1981. Land cover classification accuracy as a function of sensor spatial resolution. *Proc. Of the 15th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, MI, 1075-1090*.
- Meinel, G., Knapp, C., Gössel, J., Buchroithner, M.F. & Prechtel, N., 1996: Kartierung von Flächennutzungsänderungen mittels Landsat-TM-Daten: Methodische Untersuchungen im Raum Dresden. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 5/1996, pp 163-175*.
- Müller, F., 1991: *Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras*. Deutsche Geodätische Kommission, Serie C, Nr. 372, München
- Munehika, C.K., Warnick, J.S., Salvaggio, C. & Schott, J.R., 1993: Resolution Enhancement of Multispectral Image Data to Improve Classification Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 61, No. 11, pp 1339-1344.
- Neukum, G. & Lehmann, F. 1998. HRSC-A: Eine hochauflösende, multispektrale CCD-Stereo-Kamera, *DGPF-Tagungsband, Frankfurt, pp 203-209*.
- Neukum, G. & the HRSC - Co-Investigator and Experiment Team. 1999. The High Resolution Stereo Camera (HRSC) onboard the European Mars Express Mission. *ESA, 12 p*.
- Neukum, G. 1999. The Airborne HRSC-A: Performance Results and Application Potential. In: *Photogrammetric Week, 99*, eds. D. Fritsch & D. Spiller, Wichmann, Heidelberg, , pp 83-88
- Neukum, G.; Oberst, J.; Schwarz, G.; Flohrer, J.; Sebastian, I.; Jaumann, R.; Hoffmann, H.; Carsenty, U.; Eichertopf, K.; Pischel, R. 1995. The Multiple Line Scanner Camera Experiment for the Russian Mars96 Mission: Status Report and Prospect for the Future. *Photogrammetric Week, 95*, eds. D. Fritsch & D. Hobbie, Wichmann, Heidelberg, , pp 45-61

- Paola, J. D. & Schowengerdt, R. A. 1990. A detailed comparison of backpropagation neural network and maximum-likelihood classifiers for urban land use classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 33, pp 981-996, July 1995.
- Pillmann, W. & Klar, J., 1995: Biotopmonitoring: Systementwicklung zur Erfassung des städtischen Grüninventars. Kremers, H. & Pillmann, W. (Hrsg.): *Space and Time in Environmental Information Systems*, 9th International Symposium on Computer Science für Environmental Protection CSEP, pp 543-550.
- Prinz, T. & Bischoff, L. 1995: Lokalisierung hydrothermal veränderter Gesteine im Gebiet um Portrerillos (Nordchile) mit Hilfe multispektraler Landsat TM-Daten. *Münst. Forsch. Geol.-Paläontl. (Münster)*, pp 105-120.
- Prinz, T. 1998: Einführung in die digitale Fernerkundungsmethodik in den Geowissenschaften. Vorlesungsskript, Münster
- Quiel, F., 1985: Digitale multispektrale Klassifizierung. Bähr, H.-P. (Hrsg): *Digitale Bildverarbeitung. Anwendung in Photogrammetrie und Fernerkundung*, pp 293-315, Karlsruhe (Wichmann)
- Radermacher, W., 1989: Statistisches Informationssystem zur Bodennutzung. Markwitz, W. & Winter, R. (Hrsg.): *Fernerkundung Daten und Anwendungen Leitfaden 1*. Karlsruhe, pp 19-31.
- Reid, D.B., Lithopoulos, E., Hutton, J., 1998: Automatic Sensor Orientation System Using Integrated Inertial/GPS: The POS/DG System. *Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 3/1, pp 87-90
- Renner, D., 1985: *Biomathematik*. Weinheim
- Renouard, L. & Lehmann, F., 1999. High Resolution Digital Surface Models and Orthoimages for Telecom Network Planning. *Photogrammetric eds. D. Fritsch and D. Spiller. Wichmann, Heidelberg*, , pp 241-247.
- Richards, J.A., 1986: *Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction*. Berlin-Tokyo.
- Ryherd, S. & Woodcook, C. 1996. Combining spectral and texture data in the segmentation of remote sensed images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62, pp 181-194
- Sabins, F. 1997. *Remote Sensing, Principles and Interpretation*, New York
- Schenk, T. 1999: *Digital Photogrammetry*. Terra Science, Ohio.
- Schneider, W., Suppan, F., Steinwendner, J. & Bartl, R. 1997: Automatic Extraction Of Landscape Ecology Features from Satellite Imagery by Computer Vision Techniques. *Proc. Geospatial Information Age*, vol. 4, pp 630 - 639.
- Scholten, F.; 1996: Automated Generation of Coloured Orthoimages and Image Mosaics Using HRSC and WAOS Image Data of the Mars96 Mission. *Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31, Part B2, pp 351-356.
- Schowengerdt, R., 1997: *Remote sensing models and methods for image processing*. Academic Press, San Diego.
- Schwarz, K.P. 1995: Integrated Airborne Navigation Systems for Photogrammetry. Fritsch & Hobbie (Hrg): *Photogrammetric Week 1995*, Wichmann Verlag, pp 139-154
- Smith, G.M. and Fuller, R.M. 2000. Per-parcel classification of land cover in Jersey. *International Journal of Remote Sensing*, In press.
- Smith, G.M., Fuller, R.M., Amable, G., Costa, C., Devereux, B.J., Briggs, J., Murfitt, P., Cowen, L. & Hines, S., 1998: CLEVER-Mapping: Classification of environment with vector – and raster mapping. Final Report. Institute of Terrestrial Ecology Report to the British National Space Centre Earth Observation LINK Programme. Monks Wood.

- Smith, G.M., Fuller, R.M., Hoffmann, A. & Wicks, T., 2000: Parcel-based approaches to the analysis of remotely sensed data. Proceedings of the Remote Sensing Society Conference, Adding Value to Remotely Sensed Data, Remote Sensing Society, Nottingham, CD-ROM.
- Smith, M. & Hoffmann, A. 2000. Parcel-based approaches to the classification of fine spatial resolution imagery: Example methodologies using HRSC-A data. IAPRS Vol. XXXIII Amsterdam 2000.
- Smits, C. & Annoni, A. 1999. Updating Land-Cover Maps by Using Texture Information from Very High-Resolution Space-Borne Imagery, IN: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, pp 1244-1254
- Solf, K.-D., 1986: Fotografie – Grundlagen, Technik, Praxis. Frankfurt
- Steinnocher, K. 1997: Texturanalyse zur Detektion von Siedlungsgebieten in hochauflösenden panchromatischen Satellitenbilddaten. Dollinger, F. und J. Strobl (Hrsg.), Salzburger Geograph. Materialien 26, Salzburg.
- St-Onge, B. A. & Cavayas, F. 1997. Automated forest structure mapping from high resolution imagery based on directional semivariogram estimates. Remote Sensing of Environment, 61: pp 82-95.
- Strathmann, F.-W., 1988: Kosmos KFA-1000: Beispiel Soester Börde. Satellitenbilddatenauswertung: Methodische Grundlagen und ausgewählte Beispiele, Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe A, Band A 38, pp 114-123.
- Su, Y., Chen, S., Zhao, Y., Chen, L., & Hang, Z., 1992: Monitoring Urban Development of Hangzhou City by using Multitemporal Data. Geo-Information-Systeme, 2/1992, pp 8-13
- Tempelmann, U., et al, 2000: Photogrammetric Software for the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B2, pp 552-559, Amsterdam
- Toll, D.L., 1984. An evaluation of simulated TM-data and Landsat MSS data for determining suburban and regional land use and land cover. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 50 (12,) pp 1713-1724
- Townshend, T.E., 1987: A Comparison of Landsat MSS and TM Imagery for interpretation of Geological Structure.- Photogramm. Eng. Rem. Sens., 53, 9, pp 1245 –1249, Falls Church
- Townshend, J.R., 1981: Terrain Analysis and Remote Sensing,
- Townshend, J.R.G., Huang, C., Kalluri, S.N.V., Defries, R.S. & Liang, S., 2000: Beware of per-pixel characterization of land. Int. J. Remote Sensing, vol. 21, no 4, pp 839-843.
- Tso, B. & Mather, P.M., 1999: Crop Discrimination using multi-temporal SAR imagery. International Journal of Remote Sensing, 20, pp 2443-2460.
- Wang, L. & He, D.C., 1990: A new statistical Approach for texture Analysis. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 56, No. 1, pp 61-66.
- Wang, M. & Howarth, P.J., 1993: Modeling Errors in Remote Sensing Image Classification. Remote Sensing of Environment, 45, pp 161-171.
- Werner, C. 1996: Digitale Klassifizierung und GIS-Analyse von MOMS-02/D2-Bilddaten eines tropischen Regenwaldgebiets in Mindanao (Philippinen). Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe D, Bd. 11.; Berlin.
- Wewel, F. & Brandt, M. 1999. Geometrische Validierung des hochauflösenden multispektralen Mehrzeilenstereoscanners HRSC-A. Vorträge der 18. Wissenschaftlich-technischen Jahrestagung der DGPF; Publikation der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 7, Hrsg. J. Albertz und S. Dech, pp 245-253.
- Wewel, F. & Scholten, F. 1998. Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation 6/1998, E.Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, pp 337-348.

- Wewel, F. & Scholten, F. 1999. High Resolution Stereo Camera (HRSC): Multispectral Data Acquisition and Photogrammetric Data Processing. Proc. 4th International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Vol. I, pp 263-271.
- Wewel, Franz, 1996: Determination of Conjugate Points of Stereoscopic Three Line Scanner Data of Mars96 Mission. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, Part B3, pp 936-939.
- Wewel, Franz, 2000: Genauigkeitsuntersuchungen der Daten der Digitalen Kamera HRSC-A. Unveröffentlichter Bericht.
- Wharton, S. W., 1987. A spectral knowledge-based approach for urban landcover discrimination, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE-25, no. 3, pp 272-282.
- Wicks, T.E., Smith, G.M. & Curran, P.J., 1999: Landscape Partitioning for regional ecological analysis. Proceedings of the 25th Annual Conference of the Remote Sensing Society: RSS'99 – From data to information, University of Wales, Cardiff, pp 167-174.
- Witt, W., 1979: Lexikon der Kartographie, Band B der Enzyklopädie der Kartographie, Wien.
- Woodcock, C.E. & Strahler, A.H., 1987. The factor of scale in remote sensing. Remote Sensing of Environment, 21, pp 311-332.
- Wrbka, T. (Hrsg.), 1999: Endbericht des Forschungsprojektes SINUS.
<http://vegworld.pph.univie.ac.at/intwo/endbericht/> (02/2000).
- Zhang, Y. 1998. Aufbau eines auf Satellitenfernerkundung basierten Informationssystems zur städtischen Umweltüberwachung: Das Beispiel Shanghai. Dissertation, FU Berlin, Berl. Geow. Abh., C17.

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Advanced Digital Camera
CCD	charge coupled device
CIR	Colorinfrarot
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhenmodell
DN	Digital Number
DOM	Digitales Oberflächenmodell
ERDAS	Earth Resources Data Analysis System
GIS	Geoinformatiossystem
GPS	Global Positioning System
HKA	Hauptkomponenten-Analyse
HN	Höhennull (Kronstädter Pegel)
HRSC-A	High Resolution Stereo Camera – Airborne-
HRSC-AXW	High Resolution Stereo Camera – Airborne - Wideangle
IFOV	Instantaneous Field of view
INS	Inertial System
ISODATA	Iterative Self Organizing DATA Analysis Technique
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NN	Normalnull (Amsterdamer Pegel)
PCA	Principal Component Analysis
RGB	Red Green Blue
RMK	Reihenmeßkammer
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vergleich der räumlichen Auflösung von Landsat-TM und HRSC-A-Daten	3
Abb. 2: Die digitale Kamera HRSC-A (links) und die spin-off-Entwicklung HRSC-AX (rechts), die seit Herbst 2000 verfügbar ist	12
Abb. 3: Vegetationsspektren und die Bandbreiten der HRSC-A-Multispektralkanäle.	17
Abb. 4: Auswirkungen des Resamplings mittels Nearest neighbour	20
Abb. 5: Auswirkungen des Resamplings mittels Nearest neighbour: Die Abbildung zeigt jeweils denselben Baum, dargestellt in verschiedenen Kanälen.	21
Abb. 6: Aufnahmeprinzip des multispektralen Stereo-Zeilenscanners HRSC-A	22
Abb. 7: Photogrammetrische Prozessierungslinie für die HRSC-A-Daten	24
Abb. 8: Unkorrigiertes und lagekorrigiertes HRSC-A Bild mit dazugehörigen Fluglagedaten (Wewel & Brandt 1998)	25
Abb. 9: Die verschiedenen Datenprodukte aus einer Befliegung: hochauflösendes panchromatisches Bild, Echtfarbenbild, Color-Infrarot, Oberflächenmodell und Anaglyphe	29
Abb. 10: Die verschiedenen Prozessierungsstadien: Rohdaten, geometrisch korrigierte Daten, Digitales Oberflächenmodell als Grundlage für die Generierung von Orthobildern, multispektrales Orthobild	30
Abb. 11: Auswirkungen der Blickwinkelunterschiede am Beispiel von zwei Gebäuden. Die Abbildung zeigt die Abbildungsstrahlen der beiden äußeren Kanäle rot und infrarot(Blickwinkel +/- 15,9?). Deutlich wird das Problem insbesondere bei hohen Häusern, jeder Kanal liefert eine unterschiedliche Ansicht desselben Objektes.	32
Abb. 12: Der Zeitfaktor bei der Datenaufnahme.	33
Abb. 13: Befliegung eines Waldgebietes bei windigen Bedingungen, Farbsäume und Unschärfe bei der Kombination der Kanäle durch Bewegung der Bäume in den verschiedenen Kanälen und die Blickwinkelunterschiede der Farbkanäle. Die Unschärfe in den Bildern der einzelnen Sensoren ist abhängig von der Scanrate.	34
Abb. 14: Farbsäume an Hausrändern durch Blickwinkelunterschiede der Farbkanäle, Kanäle Nadir, Grün, Blau.	35
Abb. 15: Schematischer Querschnitt durch eine Reihenmeßkammer (RMK) (aus Albertz 1991)	40
Abb. 16: Aufbau und Funktionsweise eines opto-elektronischen Zeilenabtasters (nach Hofmann 1976, aus: Hildebrandt 1996)	41
Abb. 17: Aufnahmemodus eines opto-elektronischen Zeilenabtasters. Die zeitliche Aufnahmefolge t für die Streifen wird vom Verhältnis der Fluggeschwindigkeit zur Flughöhe und dem Aufnahmewinkel für das einzelne Bildelement bestimmt. t ist dabei vom Verhältnis der Seitenlänge der Detektorfläche zur Brennweite der Aufnahmeoptik abhängig (Hildebrandt 1996).	42
Abb. 18: Prinzip der flächenhaften Luftbildaufnahme mit überdeckenden Längs- und Querstreifen (Albertz 1991)	46
Abb. 19: Testtafel zur Bestimmung des Auflösungsvermögens (aus Albertz, 1991)	48
Abb. 20: Schematische Darstellung der Abbildungsgeometrie der wichtigsten Fernerkundungssysteme: Links: Fotografische Systeme, Mitte: Scanner-Systeme, Rechts: Radar-Systeme. Der untere Teil der Abbildung zeigt die Wirkung der verschiedenen Geometrien bei der Aufnahme einer ebenen Geländefläche mit zwei Hochhäusern und einer Pyramide. (aus Albertz 1991)	51

Abb. 21: Abbildung des Geländes in Karte und Luftbild, linke Spalte: senkrechte Parallelprojektion in der Karte, rechte Spalte: Zentralprojektion in die Bezugsebene eines Luftbildes, deutlich werden die Veränderungen in Form, Größe, Schatten und Position der Bäume (oben: nach Albertz 1991, unten: nach Lillesand & Kiefer 1994)	52
Abb. 22: Radiale Versetzung durch Höhenunterschiede (aus Albertz 1991)	53
Abb. 23: Verzerrungen im Scannerbild durch flugbedingte Einflüsse: a= orthogonale Situation, b= ungestörtes Scannerbild, c= Verzerrung durch Querneigung (Rollbewegung), d=Verzerrung durch Längsneigung (Nickbewegung), e=Verzerrung durch Verkantung (nach Lillesand und Kiefer 1994)	53
Abb. 24: Vergleich der Geometrie eines Luftbilds vom 23.10.98 aus 2500 m Höhe mit 40 cm Auflösung (rechts) mit Daten des Nadir-Kanals der HRSC-A vom 21.10.98 aus 3000m Höhe, Auflösung 25 cm (links)	54
Abb. 25: Abbildungsgeometrie eines Luftbildes (Albertz 1991)	56
Abb. 26: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 1000 bis 1: 5000, Auflösungen 15 und 24 cm	69
Abb. 27: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 500 bis 1: 100, Auflösungen 15 und 24 cm	70
Abb. 28: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 5000 bis 1: 1000, Auflösungen 15 und 24 cm	71
Abb. 29: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 500 bis 1: 100, Auflösungen 15 und 24 cm	72
Abb. 30: Simulation verschiedener Maßstäbe im ländlichen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 1000 bis 1: 5000, Auflösungen 15 und 24 cm	73
Abb. 31: Simulation verschiedener Maßstäbe im ländlichen Bereich (Testdatensatz Nijmegen) mit den Maßstäben 1: 500 bis 1: 100, Auflösungen 15 und 24 cm	74
Abb. 32: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Berlin) mit den Maßstäben 1: 5000 und 1: 2500, Auflösungen von 15 Zentimetern bis zu einem Meter.	75
Abb. 33: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Berlin) mit den Maßstäben 1: 1000 und 1: 500, Auflösungen zwischen 15 Zentimeter und einem Meter.	76
Abb. 34: Simulation verschiedener Maßstäbe im städtischen Bereich (Testdatensatz Berlin) mit den Maßstäben 1: 250 und 1: 100, Auflösungen zwischen 15 Zentimetern und einem Meter.	77
Abb. 35: Mosaik aus neun Flugstreifen	78
Abb. 36: Luftbildkarte 1:5000, Blatt 423 C	79
Abb. 37: Schematische Darstellung der Kartenproduktion	80
Abb. 38: Ausschnitt aus der Orthobildkarte 423C	82
Abb. 39: Testgebiet Park Sansouci, CIR-Darstellung (Nd, Bl, Gr), Einzelbäume Eiche (a), Platane/Roteiche (b)	84
Abb. 40: Verschiedene Oberflächen zeigen verschiedene typische Reflexionseigenschaften. (Lillesand & Kiefer 1994)	86
Abb. 41: Aufbau des elektromagnetischen Spektrums (Albertz 1991)	87
Abb. 42: Schematischer Ablauf eines unüberwachten Klassifizierungsprozesses	88
Abb. 43: Punktwolken mit unterschiedlichen Korrelationen (nach Renner 1985)	89

Abb. 44: Die verschiedenen Farbkanäle am Beispiel einer Eiche im Park Sansouci (oben von links nach rechts: ein RGB-Komposit aus Nadir, Grün, Blau; und die Einzelkanäle Rot, Grün, Unten von links: Blau, Nadir und Infrarot.	90
Abb. 45: Histogramme der Kanäle des Datensatzes Sanssouci (von links): rot, grün, blau, nadir, infrarot	91
Abb. 46: Prinzip einer zweidimensionalen Hauptkomponenten-Transformation. Erläuterung im Text (Kappas 1994)	93
Abb. 47: Ergebnisse der Hauptkomponenten-Transformation. Oben die fünf Hauptkomponenten für das gesamte Untersuchungsgebiet, unten der Ausschnitt einer Buchengruppe	97
Abb. 48: Ergebnis der verschiedenen Pixelauflösungen, die Datensätze sind mittels des Oberflächenmodells maskiert (von rechts nach links 15 cm bis 10 m)	98
Abb. 49: Zusammenwirken von Differenz, Summe und Ratio im Vegetationsindex. Unter Ratiobildung wird die Kombination mehrerer Kanäle eines multispektralen Bildes zur Hervorhebung bestimmter spektraler Eigenschaften verstanden (z.B. die Division zweier Kanäle oder komplexere Rechenformeln (Kappas 1994)	99
Abb. 50: NDVI für die gesamte Szene, Erläuterungen im Text	101
Abb. 51: NDVI am Beispiel der zwei Testbäume (IR-Darstellung)	102
Abb. 52: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung mit drei Klassen	104
Abb. 53: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung mit 10 Klassen	105
Abb. 54: Ergebnis der unüberwachten Klassifizierung mit 50 Klassen für den gesamten Datensatz und im Detail am Beispiel der Eiche	106
Abb. 55: Ergebnis der überwachten Klassifizierung: links die grobe Einteilung in 5 Klassen (blau = Wasser, rot = Weg, türkis = Bäume und Büsche, grün = Wiese, schwarz = Schatten u.a., gelb = Treppe), rechts das Ergebnis aus der Klassifizierung mit 48 Klassen	107
Abb. 56: Schematische Definition von Pixel-Klassen über Ellipsoide gleicher Wahrscheinlichkeit (Albertz 1991)	109
Abb. 57: Mit Hilfe des DOM maskierter Datensatz	110
Abb. 58: Die Problematik hoher Auflösungen am Beispiel eines Baumes: die obere Abbildung zeigt die Krone einer Eiche, in der Mitte im Detail (wie im roten Viereck oben) die Grauwerte dieses Bereiches (hohe Werte: helle Bereiche) und unten das Ergebnis der Klassifizierung dieser Krone mit 10 Ergebnisklassen.	113
Abb. 59: Forstgebiet Tharandter Wald: Beide Bilder zeigen jeweils denselben Ausschnitt, links mit HRSC-A (Nadir) oben und Luftbild unten, rechts zeigt oben Luftbild, unten HRSC-A-Daten. Radiale Versätze in den Luftbilddaten erschweren die Auswertung.	117
Abb. 60: Mit dem Vektordatensatz der Biotoptypenkartierungen überlagerte Luftbilddaten (rechts) und HRSC-A-Daten (links)	119
Abb. 61: Der Ausschnitt des Originaldatensatzes Tharandter Wald zeigt das Testgebiet, überlagert mit Landparcel-Polygonen. Der HRSC-A-Datensatz ist ein Farbkomposit aus den Kanälen Grün, Blau und Nadir.	122
Abb. 62: a) Beispiel für das Zusammenfassen zu einheitlichen Klassen (recoding) aus dem Ergebnis des Isodata-Prozesses (80 Klassen), b) das daraus resultierende Bild mit den unterschiedenen sechs Szenekomponenten	123
Abb. 63: Prozentsatz der Pixel, die einer jeweiligen Szenekomponente zugeordnet wurden (Beispiel für parcel 10)	124
Abb. 64: Verteilung von Kronen-Ratio und Landnutzungs- Klassen.	125

Abb. 65: Der Gesamtdatensatz, auf den die Methode angewendet wurde. Links das Original-HRSC-A-Bild, rechts das klassifizierte Bild, farbkodiert in die sechs Szenekomponenten	126
Abb. 66: Beispiel für Veränderungen seit der CIR-Interpretation 1992/Fehlinterpretationen	127
Abb. 67: Testdatensatz Tharandter Wald (links, HRSC-A, Farbkomposit aus grün, blau, nadir) und Datensatz nach der unüberwachten Klassifizierung in 80 cluster (rechts)	129
Abb. 68: Beispiel für Anteile von Szenekomponenten eines parcels (links) und das Verhältnis von Szenekomponenten zur Landbedeckung (rechts)	130
Abb. 69: Graphische Darstellung ausgewählter Kronenclumps, Erläuterung siehe Text	131
Abb. 70: links: Datensatz Potsdam, Aufnahme datum: 14. Mai 1998, Farbkomposit aus Nadir, Blau, Grün, rechts: unterteilt in die Einheiten urbane Blöcke, Straßenzüge und offene Flächen.	132
Abb. 71: Ergebnis des Zuordnens der Szenekomponenten	133
Abb. 72: Prozentuelle Anteile der fünf Szenekomponenten an den jeweiligen parcel-Einheiten, rechts der Originaldatensatz und die Numerierung der parcel.	134
Abb. 73: Die prozentuellen Anteile ausgewählter Szenekomponenten in den Parcel-Einheiten	135
Abb. 74: Prinzip des hierarchischen Netzes von Bildobjekten mit verschiedenen Maßstabsebenen	141
Abb. 75: Ablauf der Klassifikation mittels eCognition (Baatz & Lingenfelder 2000)	142
Abb. 76: Eingabefenster zur Definition von Merkmalen mittels Fuzzy-Logic-Operatoren	143
Abb. 77: Parameter für die multiskalare Segmentierung, gewichtet werden können der Einfluß der einzelnen Kanäle auf die Segmentierung, der object scale parameter und die Homogenitätsparameter.	144
Abb. 78: Testdatensatz für die Untersuchung verschiedener Scale Parameter	145
Abb. 79: Ergebnis der Segmentierung mit unterschiedlichen Scale parametern, links ein städtischer, rechts ein ländlicher Bereich, als Grundlage für die Bildbeispiele diente das Ergebnis der Nadirsegmentierung. Die Zahlen geben den jeweiligen scale parameter an.	146
Abb. 80: Vergleich verschiedener scale parameter für die verschiedenen Kanäle, gezeigt ist der Bereich von 10 bis 60 (x) und die Anzahl der Segmente (y).	147
Abb. 81: Vergleich verschiedener scale parameter zwischen 90 und 150. Deutlich ist das unterschiedliche Verhalten der fünf Kanäle.	148
Abb. 82: Übersicht über den Aktualisierungsprozeß für die Top10Vector der Niederlande (Asperen 1996)	149
Abb. 83: Nadirbild und überlagerter Vektordatensatz, Vektordaten wurden rasterisiert	150
Abb. 84: Verschiedene Fehler bei der Überlagerung von Top10Vector-Daten mit den digitalen Kameradaten: falsche geometrische Position von Hausvektoren (rotiert oder verschobene Position) (obere Reihe, unten rechts), Mißinterpretationen bei der visuellen Auswertung (z.B. durch Schattenbereiche) (Mitte Links), falsche Dimensionen der Hausvektoren (zu groß oder zu klein, Mitte rechts)	151
Abb. 85: Eingangsdaten: Nadir und Digitales Oberflächenmodell (jeweils 50 cm)	152
Abb. 86: Strategie zur automatisierten Hauserkennung	152
Abb. 87: Resultat der Segmentierung: Originaldatensatz Nadir (links), segmentiertes Bild (rechts)	153
Abb. 88: Nadirdatensatz mit überlagertem Vektordatensatz und Ergebnis der Hauserkennung (weiß: Häuser im Vektordatensatz, helles Grau niedrige Gebiete, dunkles Grau neue	153

(weiß: Häuser im Vektordatensatz, helles Grau: niedrige Gebiete, dunkles Grau: neue Häuser, Grau: Schattenbereiche)

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Die technischen Daten der Kamerasysteme	14
Tab. 2: Mögliche Befliegungsmodi	15
Tab. 3: Die Spektralbereiche der verschiedenen Systeme im Überblick	18
Tab. 4: Wellenlängenbereiche und Blickwinkel der verschiedenen Kanäle	18
Tab. 5: Die Bodenpixelgröße bei verschiedenen Flughöhen	23
Tab. 6: Grobe Schätzung des Zeitbedarfs der verschiedenen Prozessierungsschritte der Orthobilder bei der derzeitigen Rechnerkonfiguration	27
Tab. 7: Zeitverzug zwischen der Aufnahme der verschiedenen Kanäle je nach Flughöhe, Meter/Sekundenangaben gelten jeweils für die Differenz zwischen Nadir und Kanal, zur Feststellung des gesamten Zeitversatzes sind die Zahlen jeweils zu verdoppeln	36
Tab. 8: Die Blickwinkelunterschiede des alten und des neuen Systems im Überblick.	38
Tab. 9: Eigenschaften der Datensätze, die zum Vergleich dienten	39
Tab. 10: Bildmaßstäbe bei verschiedenen Kartierungsmaßstäben und Flughöhen	45
Tab. 11: Wiedergabe von Objekten in verschiedenen Bildern (aus Albertz 1991)	47
Tab. 12: Auflösungen für verschiedene Luftbilddaten verschiedener Maßstäbe	49
Tab. 13: Gegenüberstellung der Zeichengenauigkeit und der Auflösung von Luftbildern in verschiedenen Maßstäben	50
Tab. 14: Zeichengenauigkeit und Auflösungen der digitalen Kamera	50
Tab. 15: Technische Parameter	62
Tab. 16: Aufnahmeprinzip	62
Tab. 17: Auflösung	63
Tab. 18: Eigenschaften der Daten	64
Tab. 19: Verarbeitung der Daten	65
Tab. 20: Pixelauflösungen und mögliche Maßstäbe und der jeweilige maximale Lagefehler	68
Tab. 21: Abschätzung der Datenmengen bei verschiedenen Pixelgrößen, Maßstab 1:5000	81
Tab. 22: Korrelationskoeffizienten der HRSC-Kanäle (File 35_rgbndir_03m_subwald.img)	90
Tab. 23: Statistik File Potsdam-Sanssouci (35_rgbndir_03m_subwald.img)	92
Tab. 24: Eigenvalues	95
Tab. 25: Eigenvektoren	95
Tab. 26: Statistik File PCA Potsdam-Sanssouci (pca_potsdam.img)	95
Tab. 27: Untersuchungsgebiet Tharandter Wald: Die Datenlage	115
Tab. 28: Prozentsätze der sechs Einzelkomponenten für alle 17 Trainingspolygone (parcel).	124
Tab. 29: Fehlermatrix für die Klassifizierung des Gesamtgebietes (Nadelwald (C), Mischwald mit Nadelbäumen dominant Laubwald (Mc), Mischwald mit Laubbäumen dominant (Md),	126

Mischwald (M, Nicht-Forst (NF) und Acker (A).

Tab. 30: Interpretierte Szenekomponenten nach dem Zusammenfassen der Klassen (links) und die verschiedenen Forstklassen des Datensatzes (rechts)	128
Tab. 31: Ergebnis der Klassifizierung (gesamter Datensatz ohne Berücksichtigung der Trainingsgebiete)	128
Tab. 32: Interpretierte Szenekomponenten nach dem Zusammenfassen der Klassen (links) und die verschiedenen Forstklassen des Datensatzes (rechts)	129
Tab. 33: Ergebnis der Klassifizierung	130
Tab. 34: Ergebnis des „Klumpens“ für 40 Land-parcel, berücksichtigt wurden die Nachbarpixel (Anzahl 0 bis 8), die denselben Kronenkomponenten zugeordnet wurden	131
Tab. 35: Ergebnis der Zuordnung der Szenekomponenten	133

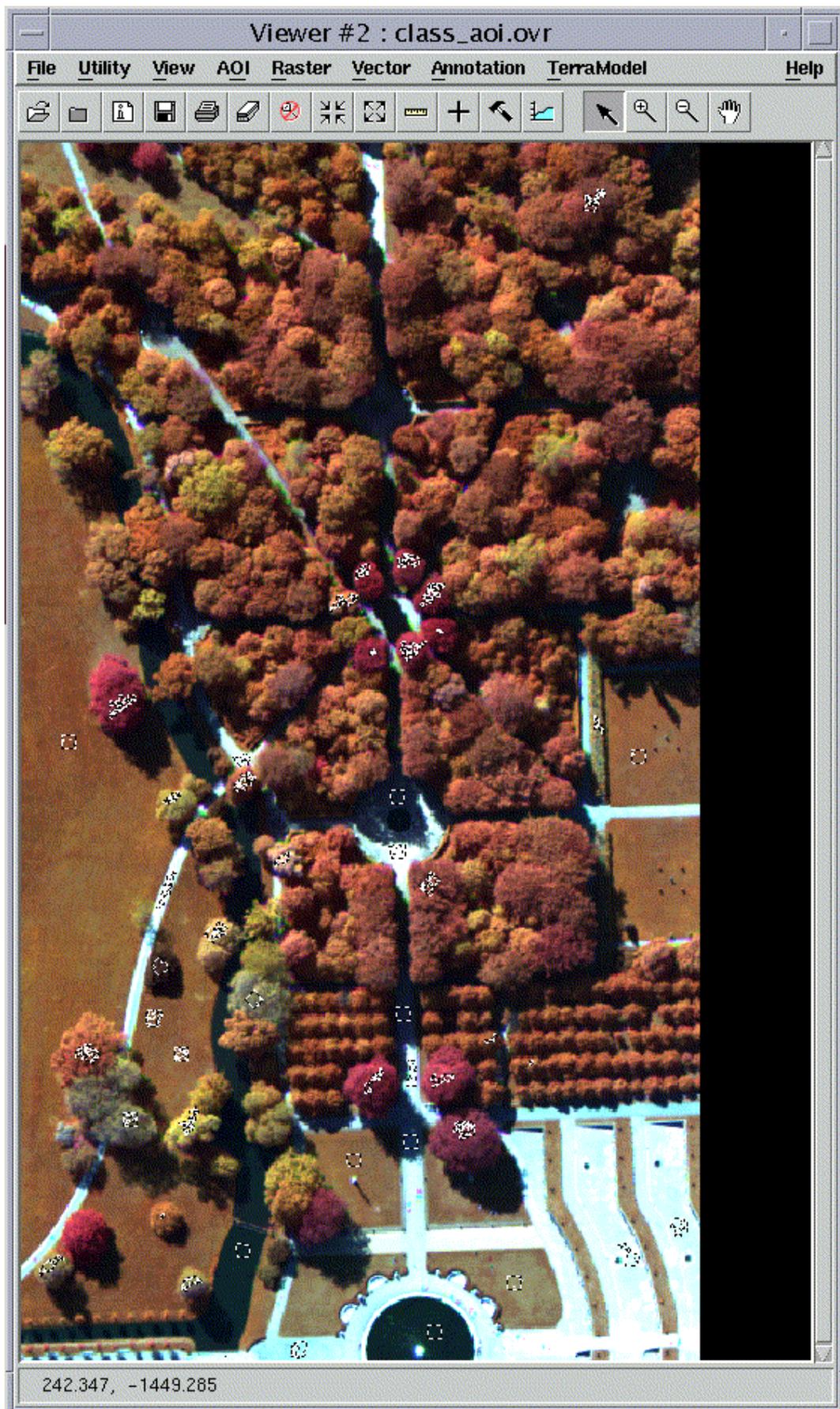
Anhang

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Liste der eintrainierten Klassen im Rahmen der überwachten Klassifizierung	ii
Anhang 2: Lage der Trainingsgebiete im Testgebiet Sanssouci	iii
Anhang 3: Contingency Matrix der überwachten Klassifizierung	iv
Anhang 4: Kartiereinheiten der CIR-Biotypen- und Landnutzungskartierung Sachsen	viii
Anhang 5: Polygone der Biotypenkartierung im Testgebiet Tharandt	xiv
Anhang 6: Neue Einteilung und Digitalisierung des Testgebietes Tharandt in parcel-Einheiten	xv
Anhang 7: Polygon-Attributtabelle der parcel im Testgebiet Tharandt	xvi
Anhang 8: Verhältnis von Scale Parameter und der Anzahl der Segmente, städtisches Gebiet	xvii
Anhang 9: Verhältnis von Scale Parameter und der Anzahl der Segmente, ländliches Gebiet	xviii

Signature Editor (sans_3.sig)														
File Edit View Evaluate Feature Classify Help														
Class #	>	Signature Name	Color	Red	Green	Blue	Value	Order	Count	Prob.	P	I	H	A
1		blutbuche1		0.714	0.414	0.655	1	1	658	1.000	X	X	X	X
2		blutbuche2		0.631	0.357	0.533	2	2	330	1.000	X	X	X	X
3		baumreihe1		0.818	0.503	0.649	3	3	162	1.000	X	X	X	X
4		baumreihe2		0.900	0.691	0.897	4	4	35	1.000	X	X	X	X
5		baum_u_li3_cl1		0.926	0.608	0.808	5	5	35	1.000	X	X	X	X
6	>	blutbuche_cl2		0.593	0.405	0.570	6	6	1000	1.000	X	X	X	X
7		esche_cl3		0.857	0.869	0.925	7	7	704	1.000	X	X	X	X
8		rasen1		0.641	0.523	0.604	8	8	1000	1.000	X	X	X	X
9		rasen2		0.596	0.506	0.576	9	9	1000	1.000	X	X	X	X
10		roteiche_cl4		0.672	0.461	0.608	10	10	1000	1.000	X	X	X	X
11		platane_cl5		0.413	0.543	0.463	11	11	1000	1.000	X	X	X	X
12		wasser1		0.061	0.343	0.156	12	12	1000	1.000	X	X	X	X
13		weg1		0.297	1.000	0.673	13	13	1000	1.000	X	X	X	X
14		weg2		0.233	1.000	0.953	14	14	12	1.000	X		X	X
15		treppe1		0.386	1.000	0.865	15	15	1000	1.000	X	X	X	X
16		treppe2		0.378	1.000	0.845	16	16	1000	1.000	X	X	X	X
17		rasen3		0.515	0.690	0.646	17	17	1000	1.000	X	X	X	X
18		wasser2		0.062	0.353	0.156	18	18	1000	1.000	X	X	X	X
19		weg3		0.509	1.000	1.000	19	19	1000	1.000	X	X	X	X
20		weg4		0.526	1.000	1.000	20	20	1000	1.000	X	X	X	X
21		weg+schatten		0.092	0.309	0.168	21	21	1000	1.000	X	X	X	X
22		weg5		0.447	1.000	0.937	22	22	1000	1.000	X	X	X	X
23		weg+schatten2		0.091	0.371	0.178	23	23	1000	1.000	X	X	X	X
24		buche		0.580	0.347	0.506	24	24	1000	1.000	X	X	X	X
25		buche2		0.679	0.378	0.618	25	25	952	1.000	X	X	X	X
26		buche3		0.596	0.306	0.472	26	26	69	1.000	X	X	X	X
27		buche4		0.759	0.382	0.674	27	27	103	1.000	X	X	X	X
28		buche5		0.898	0.396	0.760	28	28	521	1.000	X	X	X	X
29		buche6		0.651	0.365	0.558	29	29	964	1.000	X	X	X	X
30		buche7		0.662	0.380	0.603	30	30	728	1.000	X	X	X	X
31		buche_cl6		0.633	0.445	0.552	31	31	1000	1.000	X	X	X	X
32		rasen4		0.672	0.470	0.594	32	32	1000	1.000	X	X	X	X
33		weg6		0.488	1.000	0.934	33	33	605	1.000	X	X	X	X
34		eibe_cl7		0.725	0.776	0.807	34	34	367	1.000	X	X	X	X
35		schatten+weg2		0.098	0.323	0.173	35	35	1000	1.000	X	X	X	X
36		blutbuche_cl8		0.740	0.388	0.674	36	36	212	1.000	X	X	X	X
37		rasen5		0.584	0.548	0.605	37	37	1000	1.000	X	X	X	X
38		rasen6		0.623	0.529	0.609	38	38	1000	1.000	X	X	X	X
39		zypresse1		0.589	0.680	0.657	39	39	848	1.000	X	X	X	X
40		zypresse2		0.513	0.628	0.579	40	40	659	1.000	X	X	X	X
41		kastanie1		0.887	0.587	0.767	41	41	814	1.000	X	X	X	X
42		kastanie2		1.000	0.854	1.000	42	42	427	1.000	X	X	X	X
43		baumx		0.429	0.602	0.535	43	43	1000	1.000	X	X	X	X
44		spitzahorn		0.641	0.442	0.519	44	44	1000	1.000	X	X	X	X
45		buchexx		0.695	0.455	0.613	45	45	1000	1.000	X	X	X	X
46		baumxx		0.846	0.772	0.864	46	46	1000	1.000	X	X	X	X
47		eibe		0.361	0.374	0.339	47	47	1000	1.000	X	X	X	X

Anhang 1: Liste der eintrainierten Klassen im Rahmen der überwachten Klassifizierung



Anhang 2: Lage der Trainingsgebiete im Testgebiet Sanssouci

Anhang 3: Contingency Matrix der überwachten Klassifizierung

	blutb	blutb	baumr	baumr	baum_	blutb	esche	rasen	rasen	rotei	plata	wasse
blutbuche1	31.46	1.82	0.00	0.00	0.00	2.70	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00
blutbuche2	0.61	26.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00
baumreihe1	0.00	0.00	52.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.00	0.00	0.00
baumreihe2	0.00	0.00	0.00	97.14	0.00	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
baum_u_li3	0.00	0.00	1.23	0.00	97.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
blutbuche_	11.40	3.94	0.00	0.00	0.00	84.20	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00
esche_cl3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.20	5.40	2.10	0.00	0.00
rasen2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.60	89.60	1.10	0.00	0.00
roteiche_c	3.80	0.00	3.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.10	36.20	0.00	0.00
platane_cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	65.70	0.00
wasser1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00
weg1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
treppe1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
treppe2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
wasser2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00
weg3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg+schatt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg+schatt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche	0.00	27.88	0.00	0.00	0.00	6.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
buche2	11.09	2.12	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
buche3	0.00	3.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche4	1.98	2.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00
buche5	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche6	6.08	19.39	0.62	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	1.80	0.00	0.00
buche7	6.69	5.45	0.00	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00	2.20	0.00	0.00
buche_cl6	1.22	0.30	0.62	0.00	0.00	3.30	0.00	0.70	0.60	14.20	0.00	0.00
rasen4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.70	0.00	4.80	0.00	0.00
weg6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
eibe_cl7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
schatten+w	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
blutbuche_	15.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00
rasen5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.60	1.40	0.60	0.00	0.00
rasen6	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	2.90	1.30	0.00	0.00
zypresse1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
zypresse2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	0.00
kastanie1	0.46	0.00	13.58	2.86	2.86	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
kastanie2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
baumx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.00	0.00
spitzahorn	4.86	6.36	16.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.70	0.00	0.00
buchexx	5.02	1.21	11.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.90	0.00	0.00
baumxx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
eibe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	0.00
hecke	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.70	0.00
Column Tot.	658	330	162	35	35	1000	704	1000	1000	1000	1000	1000

	Weg 1	Weg 2	Trepp	Trepp	rasen	wasse	weg3	weg4	weg+s	weg5	weg+s	buche
blutbuche1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
blutbuche2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.20
baumreihe1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
baumreihe2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
baum_u_li3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
blutbuche_	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.40
esche_cl3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
roteiche_c	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
platane_cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
wasser1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg1	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg2	0.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
terrasse1	0.00	0.00	94.20	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
terrasse2	0.00	0.00	5.80	93.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen3	0.00	0.00	0.00	0.00	99.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
wasser2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00
weg+schatt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	86.00	0.00	0.00	0.00
weg5	0.00	0.00	0.00	1.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00
weg+schatt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	0.00
buche	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.00
buche2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00
buche4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00
buche7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40
buche_cl6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40
rasen4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
eibe_cl7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
schatten+w	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.00	0.00	0.00	0.00
blutbuche_	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
zypresse1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
zypresse2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
kastanie1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
kastanie2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
baumx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
spitzahorn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50
buchexx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
baumxx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
eibe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
hecke	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Column Tot.	1000	12	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

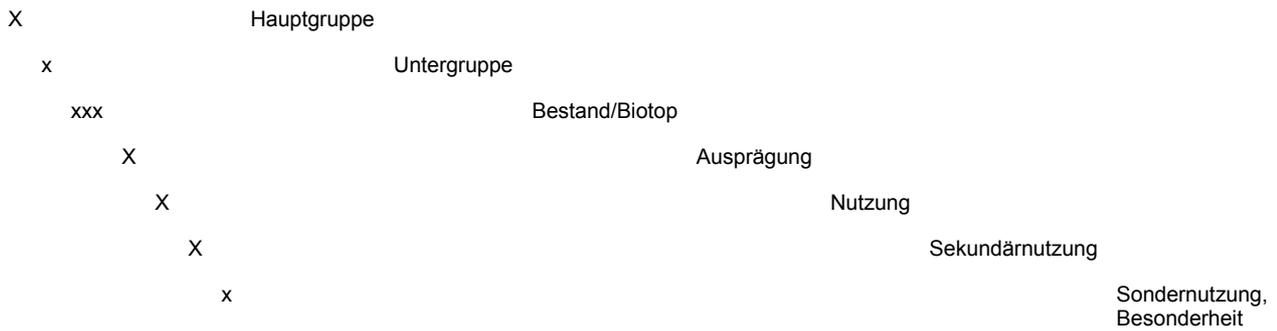
	buche 2	buche 3	buche 4	buche 5	buche 6	buche 7	buche _cl6	rasen 4	weg6	eibe_ cl7	schat ten+w	blutb uche
blutbuche1	4.52	0.00	0.00	0.00	9.44	9.34	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	11.79
blutbuche2	0.11	2.90	0.00	0.00	12.03	5.08	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
baumreihe1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00
baumreihe2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
baum_u_li3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
blutbuche_	2.63	0.00	0.00	0.00	6.33	1.37	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
esche_cl3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.20	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
roteiche_c	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	6.80	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00
platane_cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
wasser1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
treppe1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
treppe2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
wasser2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg+schatt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.60	0.00
weg5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg+schatt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche	0.11	1.45	0.00	0.00	4.67	0.69	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche2	46.95	0.00	0.00	0.00	7.47	15.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.08
buche3	0.00	95.65	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche4	0.21	0.00	99.03	0.00	1.45	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47
buche5	0.00	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche6	9.77	0.00	0.00	0.00	38.49	14.97	1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche7	20.80	0.00	0.00	0.00	18.05	43.68	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.60
buche_cl6	0.11	0.00	0.00	0.00	1.04	0.96	76.80	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	91.30	0.00	0.00	0.00	0.00
weg6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	0.00
eibe_cl7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.46	0.00	0.00
schatten+w	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	88.40	0.00
blutbuche_	12.61	0.00	0.00	0.00	0.10	5.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.06
rasen5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
zypresse1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
zypresse2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
kastanie1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
kastanie2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
baumx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
spitzahorn	0.00	0.00	0.97	0.00	0.10	0.14	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buchexx	2.21	0.00	0.00	0.00	0.21	1.51	3.10	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00
baumxx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00	0.00
eibe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
hecke	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Column tot.	952	69	103	521	964	728	1000	1000	605	367	1000	212

	rasen 5	rasen 6	zypre sse1	zypre sse2	kasta nie1	kasta nie2	baumx	spitz ahorn	buche xx	baumx x	eibe	hecke
blutbuche1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.80	0.00	0.00	0.00
blutbuche2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
baumreihe1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47	0.00	0.00	4.30	2.50	0.00	0.00	0.00
baumreihe2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00
baum_u_li3	0.00	0.00	0.00	0.00	4.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
blutbuche_	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.10	0.00	0.00	0.00
esche_cl3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.47	0.00	0.00	0.00	11.20	0.00	0.00
rasen1	1.70	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
rasen2	0.80	5.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
roteiche_c	0.20	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.50	8.60	0.00	0.00	0.00
platane_cl	0.00	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00	27.70	0.00	0.00	0.00	1.30	11.67
wasser1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
treppe1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
treppe2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen3	0.00	0.00	0.24	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
wasser2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg+schatt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
weg+schatt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.90	0.30	0.00	0.00	1.00
buche2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00
buche3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.20	0.00	0.00	0.00
buche5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
buche6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	1.10	0.00	0.00	0.00
buche7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	2.20	0.00	0.00	0.00
buche_cl6	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.40	8.90	0.00	0.00	0.00
rasen4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	2.40	0.00	0.00	0.00
weg6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
eibe_cl7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
schatten+w	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
blutbuche_	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	2.50	0.00	0.00	0.00
rasen5	87.50	17.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
rasen6	8.50	61.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
zypresse1	0.00	0.30	96.58	5.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
zypresse2	0.00	0.00	3.18	89.68	0.00	0.00	6.40	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00
kastanie1	0.00	0.00	0.00	0.00	82.31	1.17	0.00	0.00	3.90	6.30	0.00	0.00
kastanie2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	96.25	0.00	0.00	0.00	3.10	0.00	0.00
baumx	0.00	0.00	0.00	2.28	0.00	0.00	61.80	0.00	0.00	0.00	0.00	5.33
spitzahorn	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	68.10	2.40	0.00	0.00	6.67
buchexx	1.20	0.30	0.00	0.00	4.91	0.00	0.00	2.00	62.10	0.00	0.00	0.00
baumxx	0.00	0.00	0.00	0.00	5.16	2.11	0.00	0.00	0.00	79.20	0.00	0.00
eibe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.20	0.00	0.00	98.50	1.33
hecke	0.00	0.00	0.00	1.37	0.00	0.00	3.10	2.70	0.00	0.00	0.20	69.67
Column Tot.	1000	1000	848	659	814	427	1000	1000	1000	1000	1000	300

----- End of Error Matrix -----

Anhang 4: Kartiereinheiten der CIR-Biotoptypen- und Landnutzungskartierung Sachsen

Gruppeneinteilung



Hauptgruppe

7 Wälder und Forsten

Beschreibung: Wälder und Forsten im Sinne dieser Biotoptypeneinteilung sind, analog zu der terrestrischen Biotopkartierung, mehr oder weniger geschlossene, von Bäumen bestandene Flächen mit einer Größe über 1 Hektar. Nach KURTH befanden sich in der ehemaligen DDR 1986 mehr als 90% der Waldflächen in der forstlichen Kahlschlagbewirtschaftung, davon sind wiederum mehr als 76% Nadelreinbestände. In den definierten Klassen werden Waldbestände nach Hauptbaumart, Nebenbaumart und Mischung beschrieben. Im Gegensatz zur terrestrischen Biotopkartierung werden hier also nicht nur naturferne forstliche Kulturen angesprochen, sondern alle Wald- und Forstbestände nach ihrer Baumartenzusammensetzung erfaßt. Die terrestrische Biotopkartierung nimmt eine Einteilung der Bestände in natürliche Waldgesellschaften durch eine Beurteilung der Baumartenzusammensetzung unter Einbeziehung der Krautschicht vor. Dies ist dies bei der Luftbildinterpretation nicht möglich, da im Luftbild nur die Bäume der oberen Baumschicht angesprochen werden können. Die Unterscheidung zwischen naturfernen Forsten und naturnahen Wäldern ist aus diesen Gründen nur in Ausnahmefällen eindeutig möglich.

7.1/L Laubbaumart (Reinbestand)

Beschreibung: In Laubbeständen dominieren Laubbaumarten, die nach verschiedenen Anteilen insgesamt mindestens 90% der gesamten luftbildsichtbaren Kronenfläche einnehmen müssen. Ist eine Laubart mit mindestens 50% der Kronenfläche vertreten, so wird sie als Hauptbaumart an 4. Stelle des Schlüssels genannt. Nebenbaumarten sind Laubarten, die zu mindestens 30% der Kronenfläche vertreten sein müssen; sie werden an 5. Stelle genannt. An 6. Stelle werden Mischungen genannt. Als Mischung werden alle Baumarten erfaßt deren Einzelanteil kleiner als 30% der Kronenfläche beträgt. Hier können Laub- und Nadelholzarten vorkommen. Die Mischung insgesamt kann die gesamte Fläche einnehmen, es erfolgt dann keine Angabe von Haupt- und Nebenbaumart

- | | |
|-----|---|
| 1 | Eiche |
| 2 | Buche |
| 3 | Esche |
| 4 | Robinie |
| 5 | Pappel |
| 6 | Birke |
| 7 | Erle |
| 8 | sonst. Hartholzreinb./nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt |
| 9 | sonstiger Laubholzreinb./nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt |
| .0x | Begleiter: |
| .00 | kein Begleiter |
| .01 | Fichte |
| .02 | Kiefer |
| .03 | Lärche |
| .04 | sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt |
| .05 | Buche |
| .06 | Eiche |
| .07 | sonst. Hartholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt |

- .08 Birke
- .09 sonstiges Laubholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- 7.2/N Nadelbaumart (Reinbestand)

Beschreibung: In Nadelbeständen dominieren Nadelbaumarten, die nach verschiedenen Anteilen insgesamt mindestens 90% der gesamten luftbildsichtbaren Kronenfläche einnehmen müssen. Ist eine Nadelart mit mindestens 50% der Kronenfläche vertreten, so wird sie als Hauptbaumart an 4. Stelle des Schlüssels genannt. Nebenbaumarten sind Nadelholzarten, die zu mindestens 30% der Kronenfläche vertreten sein müssen; sie werden an 5. Stelle genannt. An 6. Stelle werden Mischungen genannt. Als Mischung werden alle Baumarten erfaßt deren Einzelanteil kleiner als 30% der Kronenfläche beträgt. Hier können Laub- und Nadelholzarten vorkommen. Die Mischung insgesamt kann die gesamte Fläche einnehmen, es erfolgt dann keine Angabe von Haupt- und Nebenbaumart.

- 1 Fichte
- 2 Kiefer
- 3 Lärche
- 9 sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- .0x Begleiter
- .00 kein Begleiter
- .01 Fichte
- .02 Kiefer
- .03 Lärche
- .04 sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- .05 Buche
- .06 Eiche
- .07 sonst. Hartholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- .08 Birke
- .09 sonst. Laubholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt

7.3/LN Laub-Nadel-Mischwald

Beschreibung: Laub-Nadel-Mischbestände sind Waldbestände, deren Laubhölzer mehr als 50% der gesamten Kronenfläche einnehmen, und zwar unabhängig davon, ob sie als Hauptbaumart oder Mischung vertreten sind. Wenn vorhanden ist die Hauptbaumart immer eine Laubart; sie muß zu mindestens 50% der Fläche vertreten sein und wird dann an 4. Stelle des Schlüssels genannt. Nebenbaumart ist immer ein Nadelholz und muß zu mindestens 30% vertreten sein; sie wird an 5. Stelle des Schlüssels genannt. Unter Angabe der Mischung an der 6. Stelle fallen alle Laub- und Nadelholzarten deren Einzelanteile unter 30% der Kronenfläche sind. Sind keine Haupt- und Nebenbaumarten vorhanden, so müssen die Laubarten der Mischung mehr als 50% der Kronenfläche einnehmen

- x.. Laubbaumart (Hauptbaumart):
- 0.. keine Hauptbaumart
- 1.. Eiche
- 2.. Buche
- 3.. Esche
- 4.. Robinie
- 5.. Pappel
- 6.. Birke
- 7.. sonst. Hartholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- 8.. sonst. Weichholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- 9.. sonst. Laubholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- .x Nadelbaumart (Nebenbaumart):
- .0 .keine Nebenbaumart

- .1. .Fichte
- .2. .Kiefer
- .3. .Lärche
- .9. .sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- ..x Weitere Nebenbaumarten (Begleiter):
- 0 Kein Begleiter
- 1 Fichte
- 2 Kiefer
- 3 Lärche
- 4 sonst. Nadelholz/ nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- 5 Buche
- 6 Eiche
- 7 sonst. Hartholz/ nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- 8 Birke
- 9 sonst. Laubholz/ nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt

7.4/NL Nadel-Laub-Mischwald

Beschreibung: Nadel-Laub-Mischbestände sind Waldbestände, deren Nadelhölzer mehr als 50% der gesamten Kronenfläche einnehmen, und zwar unabhängig davon, ob sie als Hauptbaumart oder Mischung vertreten sind. Wenn vorhanden ist die Hauptbaumart immer eine Nadelart; sie muß zu mindestens 50% der Fläche vertreten sein und wird dann an 4. Stelle des Schlüssels genannt. Nebenbaumart ist immer ein Laubholz und muß zu mindestens 30% vertreten sein; sie wird an 5. Stelle des Schlüssels genannt. Unter Angabe der Mischung an der 6. Stelle fallen alle Laub- und Nadelholzarten deren Einzelanteile unter 30% der Kronenfläche sind

- x Nadelbaumart (Hauptbaumart):
- 0 keine Hauptbaumart
- 1 Fichte
- 2 Kiefer
- 3 Lärche
- 9 sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- .x. Laubbaumart (Nebenbaumart:)
- .0. keine Nebenbaumart
- .1. Eiche
- .2. Buche
- .3. Esche
- .4. Robinie
- .5. Pappel
- .6. Birke
- .7. sonst. Hartholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- .8. sonst. Weichholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- .9. sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- x weitere Nebenbaumart(Begleiter):
- 0 kein Begleiter
- 1 Fichte
- 2 Kiefer

3	Lärche
4	sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
5	Buche
6	Eiche
7	sonst. Hartholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
8	Birke
9	sonstiges Laubholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt

7.5/LM Laub-Mischwald

x Laubbaumart (Hauptbaumart):

0	keine Hauptbaumart
1	Eiche
2	Buche
3	Esche
4	Robinie
5	Pappel
6	Birke
7	sonst. Hartholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
8	sonst. Weichholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
9	sonst. Laubholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt

.x. Laubbaumart (Nebenbaumart):

.0.	Keine Nebenbaumart
.1.	Eiche
.2.	Buche
.3.	Esche
.4.	Robinie
.5.	Pappel
.6.	Birke
.7.	sonst. Hartholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
.8.	sonst. Weichholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
.9.	sonst. Laubholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt

x Weitere Nebenbaumart (Begleiter):

0	kein Begleiter
1	Fichte
2	Kiefer
3	Lärche
4	sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
5	Buche
6	Eiche
7	sonst. Hartholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
8	Birke
9	sonst. Laubholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt

7.6/NM. Nadel-Mischwald

x Nadelbaumart (Hauptbaumart):

- 0 keine Hauptbaumart
- 1 Fichte
- 2 Kiefer
- 3 Lärche
- 9 sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt

.x. Nadelbaumart (Nebenbaumart):

- .0. keine Nebenbaumart
- .1. Fichte
- .2. Kiefer
- .3. Lärche
- .9. sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt

x weitere Nebenbaumart (Begleiter):

- 0 kein Begleiter
- 1 Fichte
- 2 Kiefer
- 3 Lärche
- 4 sonst. Nadelholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- 5 Buche
- 6 Eiche
- 7 sonst. Hartholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt
- 8 Birke
- 9 sonst. Laubholz/nicht differenziert/ Baumart nicht erkannt

x Altersstufe:

- 0 keine Angabe
- 1/I Dichtung bis Stangenholz
- 2/II Stangenholz bis mittleres Baumholz
- 3/III mittleres Baumholz bis Altholz
- 4/X ungleichaltrig, gestuft

I Jungwuchs, Stangenholz

Beschreibung: Altersphase vom punktförmigen Einzelstand der Bäume bis zur Ausbildung eines geschlossenen Kronenraums durch gegenseitige Kronenberührung. Höhe: 2-10m,

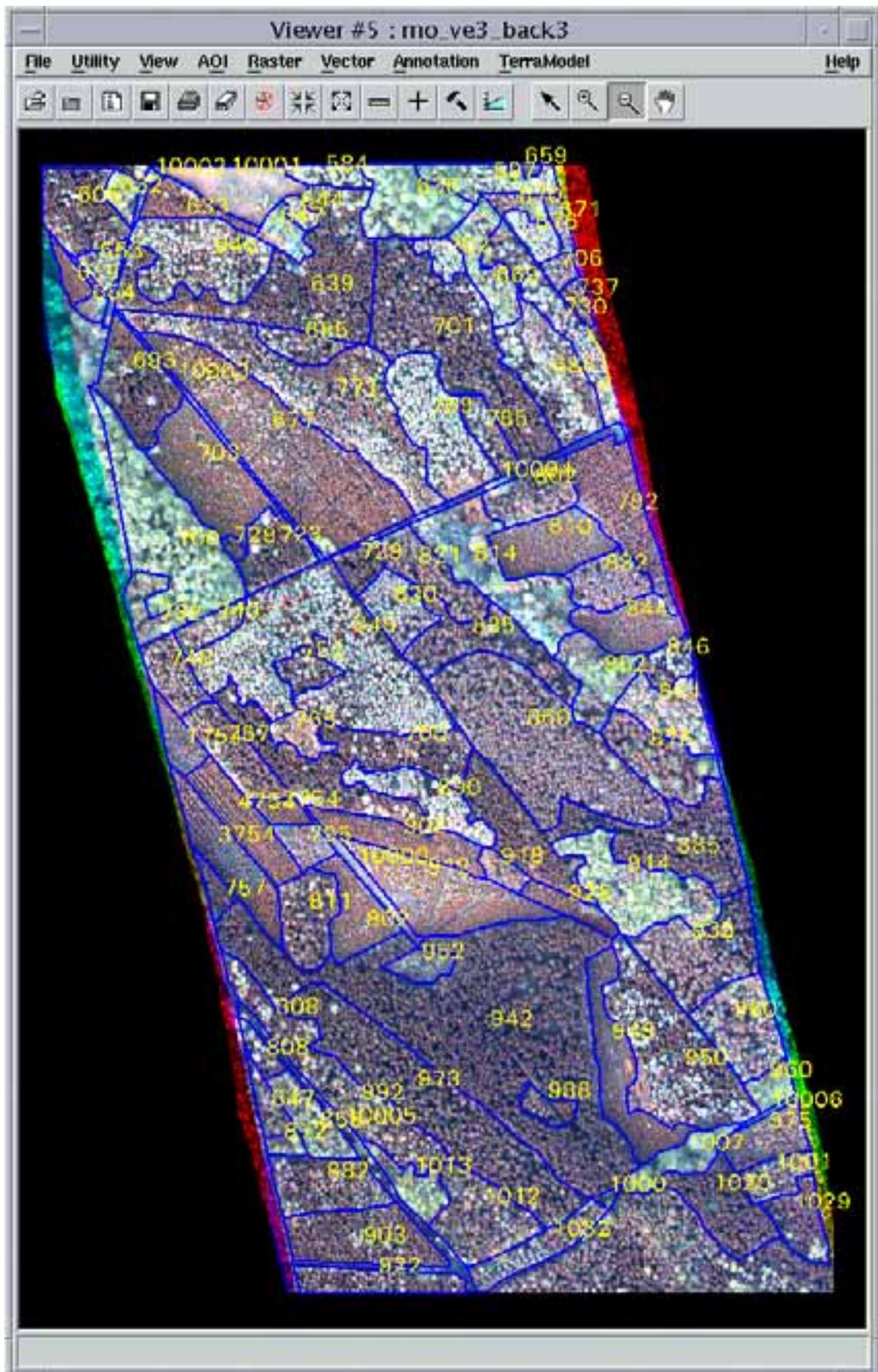
II. geringes - mittleres Baumholz

Beschreibung: Ausbildung eines geschlossenen Kronendaches, bei forstlicher Pflege erfolgt eine sukzessive Auslichtung der Bestände, dadurch zwischenzeitlicher Verlust des geschlossenen Kronenraumes und gleichmäßig lückig stehende Bäume. Relativ schmale bis mittelgroße Kronen sichtbar. Bestände ab 10 bis über 20m Höhe

III starkes Baumholz, Altholz Beschreibung: Nach Kronenschluß zu Beginn der Phase starkes Baumholz erfolgt bei weiterer Pflege und Erhalt des Bestandes eine Einzelentnahme von Bäumen; dies führt zu einer Abnahme der Baumzahl pro Fläche, die verbliebenen Individuen bilden deutlich große, gut abgrenzbare Kronen aus ungleichaltrig Beschreibung: Bestände mit verschiedenen Altersklassen auf gleicher Fläche. Ungleichaltrige Bestände können zum einen Ergebnis der Kahlschlagbewirtschaftung sein, wenn die einzelnen Teilbestände aufgrund geringer Flächengröße zusammengefaßt werden, können jedoch auch auf naturnahe Bewirtschaftungsformen hindeuten, wie z.B. der Plenterung

7.9 Wiederaufforstung

7 9 100	Laubaufforstung
7 9 200	Nadelaufforstung



Anhang 6: Neue Einteilung und Digitalisierung des Testgebietes Tharandt in parcel-Einheiten

Table Tool: MONK_VE_CL.PAT							
File	Edit	Utilities	Relate	View	Help		
Row	PERIMETER	MONK_VE_CL#	MONK_VE_CL-ID	HG	UG	BESTAND	AU
1	3675.036	1	0	0	0	0	0
2	213.497	2	584	7	1	607	3
3	354.322	3	636	7	1	200	3
4	375.611	4	597	7	5	774	2
5	92.994	5	659	7	8	400	0
6	377.955	6	8	0	0	0	0
7	337.018	7	605	7	4	169	3
8	161.958	8	0	0	0	0	0
9	169.668	9	632	7	5	770	3
10	301.437	10	633	7	2	100	2
11	1031.480	11	639	7	4	170	2
12	383.874	12	669	7	5	780	3
13	185.285	13	670	7	4	370	2
14	127.207	14	644	7	1	600	2
15	158.460	15	0	0	0	0	0
16	198.442	16	647	7	5	710	2
17	191.216	17	676	7	1	609	3
18	480.114	18	649	7	3	630	2
19	658.139	19	686	7	4	261	2
20	193.463	20	0	0	0	0	0
21	178.211	21	702	7	1	600	3
22	767.189	22	701	1	4	174	2
23	176.064	23	0	0	0	0	0
24	1018.083	24	0	0	0	0	0
25	129.225	25	706	7	2	300	2
26	330.064	26	730	7	1	600	3
27	137.820	27	737	7	2	203	2
28	107.289	28	0	0	0	0	0
29	925.198	29	771	7	3	610	2
30	370.505	30	693	7	2	109	2
31	243.626	31	685	7	6	139	2
32	768.149	32	677	7	9	0	0
33	440.001	33	769	7	1	600	3
34	704.007	34	700	7	5	120	3
35	243.092	35	785	7	4	261	3
36	486.344	36	703	7	9	100	0
37	697.498	37	0	0	0	0	0
38	495.813	38	792	7	9	200	0
39	275.681	39	802	7	6	139	4
40	609.593	40	814	7	5	729	3
41	336.354	41	610	7	8	400	0
42	287.713	42	723	7	2	109	4
43	333.196	43	0	0	0	0	0
44	81.885	44	0	0	0	0	0
45	179.239	45	729	7	2	109	4
46	261.557	46	0	0	0	0	0

The table records are displayed here

Anhang 7: Polygon-Attributtabelle der parcel im Testgebiet Tharandt

Anhang 8: Verhältnis von Scale Parameter und der Anzahl der Segmente, städtisches Gebiet

scale parameter	Segmente	nd	bl	ir	re	gr
10		71635	54086	55264	61293	58652
20		22096	17072	17694	20554	19078
30		11771	9231	9307	10997	10364
40		7810	6024	6145	7278	6722
50		5564	4339	4334	5152	4764
60		4252	3417	3295	3861	3625
70		3268	2718	2602	3028	2871
80		2607	2122	2138	2428	2368
90		2127	1806	1794	1983	1915
100		1774	1477	1550	1693	1610
110		1523	1268	1327	1447	1339
120		1321	1101	1158	1238	1146
130		1139	938	990	1079	1016
140		1020	820	879	961	903
150		892	729	784	846	801
200		518	426	467	545	489

Anhang 9: Verhältnis von Scale Parameter und der Anzahl der Segmente, ländliches Gebiet

scale parameter	Segmente	nd	gr	bl	rd	ir
10		110307	53693	73636	75472	64353
20		26272	29415	19308	21110	18618
30		11291	6290	8611	9879	8856
40		6280	3987	4668	5683	5206
50		3988	2781	2888	3762	3477
60		2774	2021	1933	2632	2477
70		2013	1575	1413	1987	1852
80		1550	1256	1079	1562	1461
90		1258	1038	876	1235	1166
100		1032	887	721	1019	965
110		856	741	597	861	795
120		723	644	502	709	693
130		626	555	449	584	608
140		535	469	382	527	516
150		474	427	343	460	464
200		267	157	202	284	265

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfaßt und andere als die angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe.

Ich erkläre, daß ich die Arbeit erstmalig und nur an der Humboldt-Universität zu Berlin eingereicht habe und keinen entsprechenden Doktorgrad besitze.

Der Inhalt der dem Promotionsverfahren zugrundeliegenden Promotionsordnung ist mir bekannt.

Berlin, 11. Dezember 2000

Andrea Hoffmann