

Multisensorielle, erdnahe Erdbeobachtung –
Entwicklung und Anwendung



Dipl.-Geogr. Stephan Holsten

Dissertation

Universität Bremen

Fachbereich 8 - Geographie

2004

Stephan Holsten:

Multisensorielle, erdnahe Erdbeobachtung – Entwicklung und Anwendung

Dissertation Universität Bremen, Fachbereich 8, Geographie, 2004

Dem Fachbereich 8 der Universität Bremen zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) vorgelegte Dissertation.



Anja Gätjen, 2004, Ohne Titel, Collage/Mischtechnik, 14 cm x 24 cm

VORWORT

Schon früh faszinierten mich Aufnahmen der Erde aus der Luft und dem Weltall, zunächst aus überwiegend ästhetischen Gründen. Im Laufe meines Studiums wuchs dann allmählich die Erkenntnis, dass die Erdbeobachtung auch als wissenschaftliche Methode eingesetzt werden kann, um ökologische Zusammenhänge zu erfassen oder aktuelle Kartierungen durchzuführen. Als ich dann die Forschungsgruppe um Herrn Dr. Reimund Küke und Herrn Prof. Dr. Uwe Apel kennenlernte, die sich auf die Fahne geschrieben hatten, unbemannte, zivile Flugsysteme zu konzipieren und zu bauen, war es mir nunmehr möglich, aktiv an der Entwicklung eines niedrig fliegenden, hochauflösenden Erdbeobachtungssystems mitzuwirken. An dieser Stelle gebe ich gerne zu, dass mir damals nicht klar war, welcher immense Aufwand betrieben werden muss, bis endlich verwertbare Fernerkundungsdaten auf dem PC ankommen, wo ich doch als Geograph gewohnt war, „fertige“ Bilder auszuwerten.

Neben Dr. Reimund Küke und Prof. Dr. Uwe Apel, die die erdnahe Erdbeobachtung als eine hervorragende Applikation für unbemannte Flugsysteme ansahen und über Jahre hinweg für die nötige Kontinuität bei der oft schwierigen technischen Umsetzung der Ideen sorgten, gilt mein besonderer Dank meinen ehemaligen Kollegen und Kolleginnen von der Fa. airobotics GmbH, Bremen, Birgit Suhr, Alexander Michel, Krisna Murthi, Frank Plaßmeier und den vielen Studentinnen und Studenten, die zum täglichen Lösen der zahlreichen technischen Schwierigkeiten unermüdlich beitrugen und mir bei den Vermessungskampagnen zur Seite standen.

Wenn auch die Technik in den letzten Jahren oft überwog, habe ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Jörg-Friedhelm Venzke zu verdanken, das Ziel, nämlich die praktische Anwendung dieser neuen Technik, nicht aus den Augen verloren zu haben. Dafür gilt ihm mein größter Dank, denn nur mit Hilfe seiner fachkundigen Unterstützung bei der Formulierung von interessanten Fragestellungen für die Erforschung von landschaftsökologischen Zusammenhängen mit fernerkundlichen Methoden erscheint die hier vorgestellte Technik auch sinnvoll. Mein weiterer Dank gilt allen Kollegen und Kolleginnen des Instituts für Geographie für ihre Unterstützung, allen voran Andreas Born, ohne dessen unermüdlicher Einsatz in den gemeinsam durchgeführten Forschungsprojekten und seinem GIS-Know-how diese Arbeit womöglich nicht entstanden wäre.

Weiterer Dank gilt meinen Eltern, die mir über Jahre hinweg die nötige Unterstützung gewährten, um mein Studium erfolgreich durchführen zu können. Dieses Vorwort soll jedoch nicht enden ohne meinen größten Motivationsstützen zu danken, ohne die das Gelingen dieser Arbeit nicht denkbar wäre: meiner Ehefrau Anja Gätjen und meinen beiden Kindern Kai und Jan.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2	FERNERKUNDUNG IN DER LANDSCHAFTSÖKOLOGIE	4
2.1	Stand der Forschung	4
2.2	Grundlagen der Fernerkundung	5
2.2.1	Elektromagnetische Strahlung	5
2.2.2	Atmosphärische Beeinflussung der Strahlung	6
2.2.3	Reflexion und Streuung	7
2.2.4	Datenverarbeitung und -auswertung	8
2.3	Ermittlung von Boden- und Vegetationsparametern aus optischen Fernerkundungsdaten	9
2.3.1	Bestimmung von Bodenparametern	10
2.3.2	Bestimmung von Pflanzenparametern	11
2.4	Systeme und Sensoren	16
2.4.1	Optische satellitengestützte Systeme	17
2.4.1.1	Landsat 7	17
2.4.1.2	Ikonos	18
2.4.1.3	Hyperion	19
2.4.2	Optische flugzeuggestützte Systeme	19
2.4.2.1	High Resolution Stereo Camera (HRSC)	19
2.4.2.2	HYMAP	20
2.4.3	Aktive flugzeuggestützte Systeme	20
2.4.3.1	Radar-Systeme	20
2.4.3.2	Laserscan-Systeme	21
2.5	Problematik der satellitengestützten Fernerkundung	21
3	GEGENSTAND DER ERDNAHEN ERDBEOBACHTUNG	24
3.1	Maßstabsfrage.....	24
3.2	Systeme für die erdnahe Erdbeobachtung.....	26
3.2.1	Gefesselte Systeme	26
3.2.2	Ungefesselte Systeme	27
3.3	Anforderungen an das System	27
3.3.1	Abbildende Spektrometrie	28
3.3.1.1	Kenngrößen	29
3.3.1.2	Detektoren	30

3.3.1.3	Aufnahmeprinzipien	31
3.3.2	Abbildende Laserscanner	32
3.3.3	Luftbild	33
3.3.4	Auswahlkriterien der Sensorik	34
3.3.4.1	Hyperspektralscanner AISA	34
3.3.4.2	3D-Laserscanner LMS-Z210	36
3.3.4.3	Digitalkamera Sony DSC-F505	38
4	ENTWICKLUNG EINES MULTISENSORIELLEN SYSTEMS ZUR ERDNAHEN ERDBEOBACHTUNG	40
4.1	Fragestellung	40
4.2	Krangestützter Messaufbau.....	41
4.2.1	Komponenten des krangestützten Vermessungssystems	41
4.2.2	Datenaufbereitung	43
4.2.3	Rohdatenformate	44
4.2.4	Radiometrische Korrektur der AISA-Daten	45
4.2.4.1	Auffüllung fehlender Pixelwerte	46
4.2.4.2	Radiometrische Kalibrierung	46
4.2.5	Geometrische Korrekturverfahren	49
4.2.5.1	Aufnahmetechnik	49
4.2.5.2	Verzerrungseffekte	52
4.2.5.3	Lösungsansätze	53
4.2.6	Missionsplanung	54
4.2.7	Untersuchungsgebiet Heitzhausen	55
4.2.8	Messkampagne	57
4.2.9	Inter-parzellare Ebene	59
4.2.9.1	Geodatenbasis	59
4.2.9.2	Höhenmodell	59
4.2.9.3	Hyperspektraldaten	62
4.2.10	Intra-parzellare Ebene	65
4.3	Flugzeuggestützte Vermessung	68
4.3.1	Ausrüstung der Messplattform	68
4.3.2	Datenakquisition	70
4.3.3	Radiometrische Korrektur	73
4.3.4	Geometrische Entzerrung	73
4.3.5	Ground Truthing	75
4.3.6	Hyperspektraldaten	77
4.3.7	Digitale Luftbilder	78
4.3.8	Messkampagne	79
4.3.9	Untersuchungsgebiet Wümmewiesen	82
4.3.9.1	Beschreibung des Untersuchungsgebietes	82
4.3.9.2	Empirical-Line-Kalibrierung	83

Inhaltsverzeichnis

4.3.10	Untersuchungsgebiet Stelle	85
4.3.10.1	Beschreibung und Lage des Untersuchungsgebietes	85
4.3.10.2	Hyperspektrale Klassifikationsverfahren	86
4.3.10.3	Angewandte Auswerteverfahren	89
5	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	95
5.1	Nachteile der Hyperspektraltechnik.....	95
5.2	Einsatzgrenzen des krangestützten Vermessungssystems	96
5.3	Vor- und Nachteile hoher Detailschärfe.....	96
5.4	Experimenteller Systemaufbau.....	98
6	ZUSAMMENFASSUNG	99
7	LITERATUR	102

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Das elektromagnetische Spektrum mit den Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundungssystemen in den verschiedenen Wellenlängenbereichen und Strahlungsenergie von Sonne und Erde nach dem Planckschen Strahlungsgesetz (ALBERTZ 1991).	6
Abbildung 2-2: Atmosphärische Fenster/Transmission (ALBERTZ 1991).	7
Abbildung 2-3: Dreidimensionaler Merkmalsraum (ALBERTZ 1991).	9
Abbildung 2-4: Charakteristische Reflexionsspektren für Oberbodenproben von fünf Mineralböden (STONER & BAUMGARDNER 1981) a) hoher Gehalt an organischer Substanz, mittelfeine Textur; b) gering entwickelter Rohboden, geringer Gehalt an organischer Substanz, mittlere Eisengehalte; c) geringer Gehalt an organischer Substanz, mittlere Eisengehalte; d) hoher Gehalt an organischer Substanz, mittelgrobe Textur; e) hoher Eisengehalt, feine Textur.	10
Abbildung 2-5: Einflussgrößen auf die spektrale Reflexion von Blättern, typischer Verlauf eines Reflexionsspektrums von Vegetation (verändert nach BACH 1995, JÜRSCHIK 1998).	12
Abbildung 2-6: Absorption und Reflexion an grünen Blättern (ALBERTZ 1991, BUSCHMANN 1993, BACH 1995).	13
Abbildung 2-7: Spektraler Reflexionsgrad von Eichenblättern zu verschiedenen Zeiten (ALBERTZ 1991).	15
Abbildung 2-8: Einordnung der in dieser Arbeit verwendeten Sensoren (rot umrandet) (verändert, nach ALBERTZ 1991).	17
Abbildung 2-9: Unterschied zwischen einem breitbandigen System (Landsat 5 TM; blaue Säulen) und eines mehr- und schmalbandigen Hyperspektralscanners (graue Säulen). Exemplarisch ist als rote Linie das Spektrum eines bewaldeten Gebietes hinterlegt.	22
Abbildung 2-10: Beispielhaft dargestellt ist der Unterschied zwischen der räumlichen Auflösung eines flugzeuggestützten (AISA aus 2000 m Flughöhe, Bodenpixel 2 x 2 m ² , links) und eines satellitengestützten (z. B. Landsat TM, Bodenpixel 30 x 30 m ² , rechts) Sensors. Man beachte die Zunahme von Mischinformationen (Schatten, unterschiedliche Nutzungsform) bei geringer räumlicher Auflösung.	23
Abbildung 3-1: Darstellung der administrativen Nutzerhierarchien sowie verschiedener Informationsdimensionen in Bezug auf genutzte Karteninformation und auf das Fernerkundungspotenzial (verändert nach BARUTH et al. 1996).	24

Abbildung 3-2: Darstellung der unterschiedlichen Maßstabsebenen und sensorabhängigen Auflösungen am Beispiel der ehemaligen Bauschuttdeponie Siedenburg, Bremen. Oben: SPOT-Aufnahme von Bremen. Die Bodenauflösung beträgt 20 m x 20 m. Die rechts abgebildete Fläche (Siedenburg Deponie) lässt sich mit nur ca. 35 Pixel darstellen. Mitte: Luftbildaufnahme des gleichen Ausschnittes wie oben. Die Deponie Siedenburg wird viel detaillierter dargestellt. Für Vegetationsaufnahmen auf Gesellschaftsebene ist diese Auflösung jedoch auch noch ungeeignet. Unten: Detailaufnahme mittels digitaler Kamera mit einer Bodenauflösung von ca. 5 cm x 5 cm. Einzelne Pflanzen können detektiert werden.	25
Abbildung 3-3: Grundlegendes Prinzip der abbildenden Spektrometrie (SPECIM 1997a).....	29
Abbildung 3-4: Kenngrößen der geometrischen Abtastung (STROBL 1999).	30
Abbildung 3-5: Gängige Aufnahmeprinzipien für abbildende Spektrometer (STROBL 1999).....	32
Abbildung 3-6: Laserscanning-Prinzip nach WEHR (LUHMANN 2000).	33
Abbildung 3-7: Der Hyperspektralscanner AISA (SPECIM 1997).....	35
Abbildung 3-8: Aufnahmeprinzip des AISA-Scanners. Die räumliche Achse (spatial axis) beträgt 364 Pixel, und die spektrale Achse (spectral axis) bis zu 286 Kanäle (SPECIM 1997).....	35
Abbildung 3-9: Der 3D-Laserscanner LMS-Z210 (RIEGL 2000).	36
Abbildung 3-10: Prinzip der Entfernungsmessung (RIEGL 2000).	37
Abbildung 3-11: Design des Laserscanners LMS-Z210 (RIEGL 2000).....	37
Abbildung 3-12: Die Digitalkamera DSC-F505 (SONY 1999).	39
Abbildung 4-1: Kran- und flugzeuggestützte Systeme für die erdnahe Erdbeobachtung (unterhalb der gestrichelten Linie) als Ergänzung zu den herkömmlichen Fernerkundungssystemen.	40
Abbildung 4-2: Krangestützte Vermessung. Oben links: Sensorikträger mit dem Laserscanner und dem Hyperspektralscanner AISA. Optional kann auch eine Digitalkamera an den AISA-Scanner fixiert werden.	42
Abbildung 4-3: Reliefdarstellung der Laserscanner-Rohdaten (oben) eines Maisfeldes. Man beachte die zunehmende Verzerrung des Bildes zu den Rändern hin, die mithilfe eines geometrischen Entzerrungsverfahrens korrigiert werden muss (unten) (Kap. 4.2.2).....	43
Abbildung 4-4: Radiometrische Datenaufbereitungsschritte (SUHR 2001).	45
Abbildung 4-5: Abbildungsgeometrie bei opto-mechanischen Scannern (ALBERTZ 1991).	49

Abbildung 4-6: Abbildungsgeometrie bei opto-elektronischen Scannern (ALBERTZ 1991).	50
Abbildung 4-7: Entstehung von Panoramaverzerrungen (ALBERTZ 1991). Links: Die Abtastung erfolgt mit gleichen Winkelinkrementen. Der untere Teil gibt die abgetasteten Geländeelemente mit deren unterschiedlichen Pixelbreiten wieder. Rechts: Darstellung des Panoramaeffekts mit gleichen Streckenabschnitten.	50
Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der verschiedenen Verzerrungen (ROTHFUSS 1994).	51
Abbildung 4-9: Schematische Darstellung der Lageoffsets.	53
Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Ablaufs des geometrischen Korrekturverfahrens.	54
Abbildung 4-11: Lage des Untersuchungsgebietes Heitzhausen.	55
Abbildung 4-12: Anordnung der Parzellen unterteilt nach aufgebrauchten Kompostvarianten. Rot umrandet sind die Parzellen, die während der krangestützten Messkampagne fernerkundlich erfasst wurden.....	56
Abbildung 4-13: Termine der Messkampagne.	57
Abbildung 4-14: Räumliche Abdeckung eines Scanvorganges. Rot umrandet sind die zwei nebeneinander liegenden Parzellen.	57
Abbildung 4-15: Aus 12 Parzellen bestehendes Gesamtmosaik der mithilfe des Laserscanners ermittelten Wuchshöhe vom 26.7.2001.	58
Abbildung 4-16: Die beiden Parameter „Kompostvarianten“ und „Ernteerträge“ als Geodatenbasis für die weiteren Untersuchungen (FEK= Fertigkompost).	59
Abbildung 4-17: Farbkodierte Darstellung der Wuchshöhe auf den zwölf Parzellen P1-P12 an den drei Messtagen sowie der Ernteerträge am 01.08.2001.	60
Abbildung 4-18: Graphische Darstellung der Wuchshöhe am 03.05, 22.05 und 26.07 sowie des Ernteertrages am 01.08.	61
Abbildung 4-19: Schematische Darstellung der sonnenwinkelabhängigen, ungleichmäßigen Beleuchtung der Szene: Die sonnenzugewandte Seite der Vegetation (a) reflektiert stärker als die schattigere, sonnenabgewandte (b) Seite.	63
Abbildung 4-20: Farbkodierte Darstellung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) auf den zwölf Parzellen P1-P12 an zwei Messtagen sowie der Ernteerträge am 01.08.2001.....	64
Abbildung 4-21: Graphische Darstellung der NDVI-Werte am 22.05 und 26.07 sowie des Ernteertrages am 01.08.	65

Abbildung 4-22: Dokumentation der Parzelle P1 im Verlauf der Vegetationsperiode. Oben: Color-Infrared-Bild. Unten: Foto. Erläuterungen im Text.	66
Abbildung 4-23: Neuberechnung des mittleren NDVI anhand von statistischen Abfragen im GIS.	67
Abbildung 4-24: Das Vermessungsflugzeug.	68
Abbildung 4-25: Die Messvorrichtung bestehend aus dem Hyperspektralscanner AISA, einer Luftbildkamera, der Navigationseinheit (NAV) und einem Akquisitions-PC.	69
Abbildung 4-26: Links: Stabilisierte Plattform LEO bestehend aus einer hochgenauen Drei-Punkte-Aufhängung, drei hoch dynamischen Servo-Motoren, dem hochgenauen faseroptischen Kreisel sowie einer digitalen Rollei Kamera (4000x4000 Pixel). Rechts: Faseroptischer Kreisel (FOG) (BÄUMKER et al. 1999).	70
Abbildung 4-27: Hardware-Racks des AISA-Akquisitionssystems (von oben nach unten: DAO-Rack, optionales Navigations-Rack, Stromversorgungs-Rack; an der Seite: Netzwerk-Plattform) (AIROBOTICS 2003).	71
Abbildung 4-28: Datenflussdiagramm für das AISA-Datenakquisitionssystem (AIROBOTICS 2003).	72
Abbildung 4-29: Unkorrigierte (links) und korrigierte (rechts) AISA-Daten eines Überfluges der Start- und Landebahn Lemwerder am 15.07.2003.	74
Abbildung 4-30: Luftbild aus dem Bereich „Wümmewiesen“. Die Auflösung beträgt ca. 15 cm (siehe auch Ausschnittsvergrößerungen).	79
Abbildung 4-31: Darstellung der Flugrouten auf den beiden Flugniveaus 500 und 1000 m über Grund.	80
Abbildung 4-32: Darstellung der tatsächlich geflogenen Flugroute und des geplanten Flugpfades im Bereich „Stelle“.	81
Abbildung 4-33: Ca. 200 m x 300 m großen Ausschnitt eines hochaufgelösten Luftbildes der Messkampagne vom 15. Juli 2003.	82
Abbildung 4-34: Schematischer Ablauf der Atmosphärenkorrektur am Beispiel der Empirical-Line-Calibration-Methode.	83
Abbildung 4-35: Oben: Foto der ausgewählten Feldspektrometer-Messstandorte. Mitte: CIR-Darstellung der AISA-Daten (die schwarzen Blöcke entstanden durch Datenaussetzer aufgrund von Vibrationen des Flugzeuges) mit allen neun Feldspektrometerstandorten, die zur Empirical-Line-Kalibration herangezogen wurden. Unten: Vergleich der AISA- und Feldspektrometer-Spektralkurven an drei ausgewählten Standorten: P1) gemähte Wiese; P2) vitale Vegetation auf feuchtem Standort; P3) vitale Vegetation auf trockenem Standort.	84

Abbildung 4-36: Untersuchungsgebiet Stelle, südwestlich von Hellwege, Landkreis Rotenburg/Wümme.	86
Abbildung 4-37: Standardisierter Verlauf der Klassifikation von hyperspektralen Fernerkundungsdaten (verändert nach BARR 1994 in CAMPBELL 1996).	88
Abbildung 4-38: Spektrale Mischpixel entstehen durch die Aufnahme eines Bereiches auf der Oberfläche, der aus verschiedenen Materialien besteht (BOARDMAN 1999, verändert).....	89
Abbildung 4-39: Fließdiagramm der durchgeführten Klassifikationen.	90
Abbildung 4-40: Links: Ausschnitt eines hochaufgelöstem Luftbildes, das zur Bestimmung von Trainingsgebieten herangezogen wurde. Rechts: Lage der Trainingsgebiete. Die schwarzen Streifen stellen Datenlücken aufgrund von Aufzeichnungsaussetzern während der Datenakquisition dar.	91
Abbildung 4-41: Vergleich der Ergebnisse einer überwachten und unüberwachten SAM-Klassifikation für das Gebiet „Stelle“. Die weißen Streifen stellen Datenlücken aufgrund von Aufzeichnungsaussetzern während der Datenakquisition dar.....	93
Abbildung 5-1: Digitalphotographie einer Sukzessionsfläche am 15. August 2001. Die Ausschnittsvergrößerung zeigen den weißen Aspekt von Klettenkerbel in Goldruten-Hochstauden (oben rechts); Blühende Goldruten-Kohorte neben Brombeeren, dazwischen Kratzbeere (unten rechts) (KÖHLER & MÜLLER 2003).	97

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Mit hyperspektraler Sensorik bestimmbare Pflanzenparameter (BACH 1995, verändert).....	14
Tabelle 2-2: Spektrale Bänder von Landsat TM und ETM+.....	18
Tabelle 2-3: Vergleich der unterschiedlichen räumlichen Abdeckung in Abhängigkeit vom räumlichen Auflösungsvermögen.....	18
Tabelle 2-4: Einige Systemparameter von IKONOS.....	18
Tabelle 3-1: Technische Spezifikationen des AISA Scanners (SPECIM 1997).....	36
Tabelle 3-2: Technische Daten des Laserscanners LMS-Z210 (RIEGL 2000).....	38
Tabelle 4-1: Übersicht der im Rahmen des Kompostprojektes erhobenen Boden-, Pflanzen- und Klimaparameter (HARTMANN 2003).....	56
Tabelle 4-2: Auflistung der Parzellen mit den eingebrachten Kompostvarianten, der mittleren Wuchshöhe an den jeweiligen Messtagen sowie den Ernteerträgen (FEK: Fertigkompost).....	61
Tabelle 4-3: Komponenten des AISA-Akquisitionssystems (AIROBOTICS 2003).....	70
Tabelle 4-4: Technische Daten des Handspektrometers ASD FieldSpec und des Hyperspektralscanners AISA (ASD 1999).....	76
Tabelle 4-5: Auflistung der verwendeten Kanäle mit Angaben zur Kanalmitte und -breite. Die Integrationszeit liegt bei 40 ms (25 Hz).....	77

ABKÜRZUNGEN

AISA	Airborne Imaging Spectrometer for different Applications
AVIRIS	Airborne/Visible Infrared Imaging Spectrometer
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager
CCD	Coupled Charged Device
CIR	Color Infrared
DAIS	Digital Airborne Imaging Spectrometer
DAQ	Datenakquisitionssystem
(D)GPS	(Differential)Global Positioning System
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DN	Digital Number
DOM	Digitales Oberflächenmodell
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
ENVI/IDL	Environment for Visualizing Images / Interactive Data Language
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
FODIS	Fiber-Optic Downwelling Irradiance Sensor
FOG	Faseroptischer Kreisel
FOV	Field Of View
GCP	Ground Control Point
GIFOV	Ground Instantaneous Field Of View
GIS	Geographisches Informationssystem
GSD	Ground Sampling Distance
HRSC	High Resolution Stereo Camera
IAT	Institut für Aerospace-Technologie
IFOV	Instantaneous Field Of View
IMU	Inertial Measurement Unit
INGEER	Integrierte Nutzung von GIS und erdnaher Erdbeobachtung in der Landwirtschaft
INS	Inertial-System

Abkürzungen

IR	Infrarot
LEO	Local Earth Observation
LIDAR	Light Detection and Ranging
µm	Micrometer
MNF	Minimum Noise Fraction
NAV	Navigationssystem
NDV	N-Dimensional Visualizer
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahes Infrarot
nm	Nanometer
OMNBR	Optimum Multiple Narrow Band Reflectivity
PARGE	Parametric Geocoding Software
PPI	Pixel Purity Index
ROI	Region Of Interest
SAM	Spectral Angle Mapper
SAR	Synthetic Apertur Radar
SFF	Spectral Feature Fitting
SPOT	Systeme Probatoire pour l'Observation de la Terre
TM	Thematic Mapper
str	Steradians
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Ende der 1990er Jahre beschäftigte sich eine Forschungsgruppe innerhalb der DaimlerChrysler Aerospace (heute EADS) zusammen mit dem Institut für Aerospace-Technologie (IAT) der Hochschule Bremen mit der Konzipierung und Entwicklung von kleinen, unbemannten Flugsystemen. Weil eine zivile Nutzung des Systems im Vordergrund stand, wurden schon frühzeitig Überlegungen zu geeigneten Applikationen und Missionsprofilen angestellt. Dabei erwies sich die multisensorielle, erdnahe Erdbeobachtung als eine viel versprechende Anwendung. Aus diesem Grunde standen schon zu Beginn der Entwicklungsarbeiten die Auswahl, Beschaffung und Inbetriebnahme einer geeigneten Fernerkundungssensorik sowie die Definition von typischen Missionstypen im Vordergrund.

Zu Beginn der Forschungsarbeiten an den oben erwähnten unbemannten Flugsystemen wurde ein kugelförmiges, aerostatisches System konzipiert, das mit einem 3D-Laserscanner ausgestattet lokale Gebiete (wie z. B. Mülldeponien) hochgenau vermessen sollte. Wie bei technischen Neuentwicklungen üblich, müssen bei der Auslegung des Gesamtsystems die Anforderungen an das System mit den technischen Kenngrößen der einzelnen Systemkomponenten in Einklang gebracht werden. Dabei erwies sich schon zu einem frühen Zeitpunkt der Systemkonzeption, dass das geringe Gewicht der einzelnen Komponenten (z. B. Motoren, Leitwerke, Flugsteuerung, Nutzlast etc.) als eines der Hauptkriterien gilt. Nach der Definition der Systemanforderungen wurde im nächsten Schritt nach geeigneten Fernerkundungssensoren gesucht, die folgende Kriterien erfüllen sollte:

- < geringes Gewicht,
- < kompakte Bauform,
- < geringer Energiebedarf,
- < gute Integrationsfähigkeit in eine bestehende Hard- und Software-Konfiguration,
- < geringe Anschaffungskosten,
- < langjähriger technischer Support,
- < hohe spektrale Auflösung und multisensorielle Ausstattung.

Diese Kriterien schränkten die Suche nach einer geeigneten Sensorik sehr stark ein. So kamen die großen, flugzeuggetragenen Hyperspektral- und Laserscanner (wie z. B. HYMAP oder ALTM) im Vorhinein aufgrund des hohen Kaufpreises und der anderen technischen Daten nicht in Frage. Weil eine kommerzielle Nutzung des Flugsystems stattfinden sollte, wurden rein experimentelle, wenn auch kleine Systeme nicht berücksichtigt, da ein langjähriger technischer Support (z. B. Wartung, Kalibrierung) nicht gewährleistet werden konnte. Beim spektral hochauflösenden Sensor fiel schließlich die Wahl auf den Hyperspektralscanner AISA der Fa. Specim, Finnland. Für die Erfassung von hoch-

genauen digitalen Geländemodellen wurde ein für den terrestrischen Einsatz konstruierter 3D-Laserscanner der Fa. Riegl, Österreich, an die Besonderheiten einer luft- bzw. krangestützten Vermessung angepasst. Beide Sensoren werden im Laufe dieser Arbeit noch ausführlich beschrieben.

In den folgenden Entwicklungsjahren beschäftigte sich die Forschungsgruppe innerhalb der 1999 gegründeten Fa. airobotics GmbH, Bremen, mit den Anpassungen der Sensoren an die Besonderheiten des Flugsystems. Beispielhaft seien hier genannt die Konstruktion einer Vorrichtung zur Aufnahme der verschiedenen Komponenten (z. B. Sensorik, Datenaufzeichnung und Stromversorgung), die Programmierung von Schnittstellen zur plattformeigenen Navigationseinheit inklusive Zeitsynchronisation, die Gestaltung und Erstellung einer eigenen Steuersoftware sowie die Konvertierung und Korrektur der AISA-Rohdaten etc.

Erste praktische Erfahrungen mit der multisensoriellen Aufnahmeplattform wurden im Rahmen von krangestützten Vermessungen (Kapitel 4.2) gemacht, die zusammen mit dem Institut für Geographie, Universität Bremen, durchgeführt wurden. Hiermit wurden zwei Zwecke erfüllt: Zum einen kam die gesamte Sensorplattform in der Konfiguration zum Einsatz, wie sie auch im Flugsystem verwendet werden sollte. So konnten sämtliche Systemtests unter realen Bedingungen durchgeführt werden (beispielsweise unter widrigen Wetterbedingungen), um die Funktionstüchtigkeit sämtlicher Teilkomponenten einem harten Testverfahren zu unterziehen. Zum anderen wuchs aufgrund dieser zahlreichen Tests im Gelände die Erkenntnis, dass die krangestützte, multisensorielle Fernerkundung eine Maßstabsebene abdeckt, die von den herkömmlichen Fernerkundungssystemen nicht bedient wird. Somit ergab sich ein neues interessantes Forschungsfeld, das in Kapitel 3 im Detail skizziert wird.

Aufgrund von diversen technischen Schwierigkeiten bei Entwicklung des aerostatischen, unbemannten Fluggerätes wurde im Jahre 2002 die Entscheidung getroffen, die Hyperspektralsensorik in herkömmlicher Weise, d. h. flugzeuggestützt zu betreiben. Aufgrund der Erkenntnisse und technischen Anpassungen aus den krangestützten Vermessungen stand ein hochgradig kompaktes und autarkes System zur Verfügung, das sowohl in kleinere Flugzeuge eingebaut werden kann als auch zusammen mit unterschiedlichen Navigationssystemen betrieben werden kann. Die in 2003 durchgeführten Missionen (Kapitel 4.3) belegen die hohe Einsatzflexibilität, wenn auch die technischen Hürden sowohl während des Fluges als auch bei der nachträglichen Datenauswertung nicht unerheblich sind.

Die hier vorgelegte Arbeit hat somit einen stark technischen Schwerpunkt. Neben einer allgemeinen Einführung in die Grundlagen der Fernerkundung (Kapitel 2.2) sowie einer ausführlichen Präsentation der technischen Merkmale von ausgewählten Fernerkundungssensoren (Kapitel 2.4) wird sie folgende Fragen behandeln:

- < Welche Sensoren mit welcher räumlichen und spektralen Auflösung eignen sich für die jeweilige Fragestellung bzw. Maßstabsebene? (Kapitel 3.1 und 3.2)

- < Was sind die Anforderungen an ein multisensorielles erdnahe Erdbeobachtungssystem? (Kapitel 3.3)
- < Welche Rahmenbedingungen müssen bei der technischen Integration der Sensoren in das Gesamtsystem berücksichtigt werden? (Kapitel 4.2 und 4.3)
- < Wie muss die Aufbereitung der Rohdaten erfolgen, um interpretierbare Fernerkundungsdaten zu erhalten? (Kapitel 4.2.2, 4.2.4, 4.2.5 und 4.3.4)
- < Wie sehen typische Missionen aus? (Kapitel 4.2.8 und 4.3.8)
- < Wie erfolgt die Datenauswertung, und welche Klassifikationsergebnisse lassen sich erzielen? (Kapitel 4.2.9, 4.2.10 und 4.3.10)
- < Wo liegen die Einsatzgrenzen der erdnahen Erdbeobachtung? (Kapitel 5)

2 FERNERKUNDUNG IN DER LANDSCHAFTSÖKOLOGIE

2.1 Stand der Forschung

In vielen Bereichen ist es heute mehr denn je erforderlich, natürliche Prozesse zu verstehen, menschliche Aktivitäten sorgfältig zu planen und ihre Auswirkungen zu kontrollieren, die sich im komplexen Gefüge von Mensch und Naturhaushalt vollziehen. Die luft- und satellitengestützte Fernerkundung der Erdoberfläche ermöglicht durch ihre technologische Entwicklung eine immer bessere Charakterisierung des ökologischen Zustandes und der anthropogenen Beeinflussungen unserer Umwelt sowie deren zeitliche und räumliche Veränderungen. Diese Informationen können dazu dienen, das Verständnis der Dynamik von (Öko-)Systemen sowohl auf einer regionalen als auch auf einer globalen Skala zu verbessern.

Dies geschieht im letzten Jahrzehnt auch immer stärker in der Landwirtschaft. Schlagworte wie *Precision Farming* oder *Change Detection* stehen für Entwicklungen und Ziele, die durch neue Technologien ermöglicht und erreicht werden. Diese neuen Technologien erlauben es, bisher durch die Fernerkundung nicht zu ermittelnde Parameter zu messen oder indirekt zu bestimmen. Verschiedene Studien belegen den Nutzen von Fernerkundungstechniken zu unterschiedlichen Fragestellungen, z. B. zum Feldfrucht-klassifikation und -kartierung (EROL & AKDENIZ 1996), zur Erntevorhersage (CLEVERS 1997, MORAN et al. 1995), zum Feldfruchtzustand (BLACKMER et al. 1994, BOISSARD et al. 1993), zu Feldfruchterkrankungen und Nährstoffversorgung (ADAMS et al. 2000, ADAMS et al. 1999, MALTHUS & MADEIRA 1993). Hierbei ist beachten, dass in den früheren Jahren überwiegend breitbandige, multispektrale Systeme zum Einsatz kamen und erst seit der verstärkten kommerziellen Verfügbarkeit von schmalbandigen, hyperspektralen Systemen neue Methoden entwickelt wurden, um solche hochaufgelösten Daten auszuwerten. Ein klassisches Verfahren zur Klassifizierung von Vegetation ist die Bildung von Vegetationsindices. Die Anwendung solcher Indizes erfolgte zunächst auf der Basis von breitbandigen Systemen (z. B. *Normalized difference vegetation index* [NDVI] [JACKSON 1983]) und später auf der Basis von schmalbandigen Systemen (z. B. *Optimum multiple narrow band reflectivity* [OMNBR] oder *Narrow Band NDVI* [THENKABAIL et al. 2000]). Aber auch Methoden, die den gesamten spektralen Merkmalsraum berücksichtigen bzw. analysieren, kommen bei der Klassifizierung von hyperspektralen Daten vermehrt zum Einsatz, nicht zuletzt weil aufgrund der steigenden Leistung moderner Computer die Berechnung großer Datenmengen schneller erfolgen kann. Verschiedene Voll-Pixel- und Sub-Pixel-Identifikationsmethoden kommen hier zur Anwendung (DU & CHANG 2001, KESHAVA & MUSTARD 2002, HEINZ & CHANG 2000, BOARDMANN et al. 1995, GREEN et al. 1988).

Die Fernerkundung macht sich den Umstand zunutze, dass die spektralen Signaturen der Untersuchungsobjekte von deren Eigenschaften beeinflusst werden. Das eröffnet die Möglichkeit, aus inzwischen sehr genau messbaren Spektralsignaturen Objekteigenschaften abzuleiten. Zwei grundlegende Probleme müssen hierbei gelöst werden: (1)

die möglichst hochgenaue Messung von Energieintensitäten und (2) die Interpretation der Daten. Die korrekte Messung von spektralen Signaturen setzt zum einen eine hohe Sensitivität des Sensors voraus, wobei die akkurate Kalibrierung des Messsystems von herausragender Bedeutung ist. Zum anderen müssen die Daten in einer Form angezeigt werden, dass Vergleiche mit Datensätzen anderer Sensoren oder Zeitreihenanalysen möglich sind. Dann muss noch das Problem der spektralen Mischinformation innerhalb eines Pixels gelöst werden. Hier ist die Identifikation von spektral reinen *Endmembers* für die Entmischung der Spektren hilfreich. Solche *Endmember* können in Form von Spektralbibliotheken angelegt werden oder auf der Basis von detaillierten Geländeinformationen erhoben werden. Beide *Ground-Truthing*-Verfahren unterliegen wiederum gewissen methodischen Einschränkungen, sodass nicht von einer bestimmten, optimalen Methode gesprochen werden kann, sondern in der Praxis die Kombination von verschiedenen Erhebungsformen (Spektrometermessungen, Geländekartierungen, Verwendung von Luftbildern etc.) angewandt wird, um möglichst umfassende Informationen vom Testgebiet zu erhalten.

2.2 Grundlagen der Fernerkundung

Fernerkundung wird als die Gesamtheit der Verfahren, die Informationen über Objekte, Gebiete und Phänomene durch Aufnahmen mit beliebigen Sensoren, die nicht mit den zu untersuchenden Dingen in Berührung stehen, gewinnen und analysieren, definiert (LILLESAND & KIEFER 1994). Eine etwas engere Definition gibt die DIN-Vorschrift 18716-3 (1995), nach der die Fernerkundung die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche durch Messung und Interpretation eines von ihr ausgehenden (Energie-) Feldes umfasst.

Die Ziele der Fernerkundung liegen unter anderem darin, den Zustand der Umwelt sowie naturgegebene und anthropogen bedingte Veränderungen der Umwelt „aus der Ferne“ zu erfassen. Es werden also indirekte Beobachtungsverfahren eingesetzt. Das Messgerät befindet sich in einiger Entfernung vom Ort der Messung; die zu messende Größe wird aus der vom Messobjekt reflektierten oder emittierten elektromagnetischen Strahlung abgeleitet (ALBERTZ 1991).

2.2.1 Elektromagnetische Strahlung

Alle passiven Fernerkundungssysteme messen die ausgesandte elektromagnetische Strahlung der Erde. Im sichtbaren Spektralbereich wird die reflektierte Sonnenstrahlung erfasst, im Infraroten- und Mikrowellenbereich die thermische Schwarzkörperstrahlung der Erde. Im Gegensatz dazu, erzeugen aktive Fernerkundungssysteme ihre Strahlung selbst (Radar und Laser) und messen die Reflektivität des Objektes. In allen Fällen sind die elektromagnetischen Wellen die Informationsträger, die die Information vom Objekt zum Aufnahmegerät leiten.

In Abbildung 2-1 werden das elektromagnetische Spektrum und die verschiedenen Wellenlängenbereichen dargestellt. Alle Wellenlängenbereiche haben unterschiedliche Eigenschaften. Sie werden als Röntgenstrahlen, ultraviolette Strahlen, sichtbares Licht,

Infrarot (IR), Mikrowellen oder Radiowellen bezeichnet. Das Spektrum stellt ein Kontinuum dar, sodass es keine scharfen Grenzen und Sprünge zwischen den einzelnen Wellenlängenbereichen gibt.

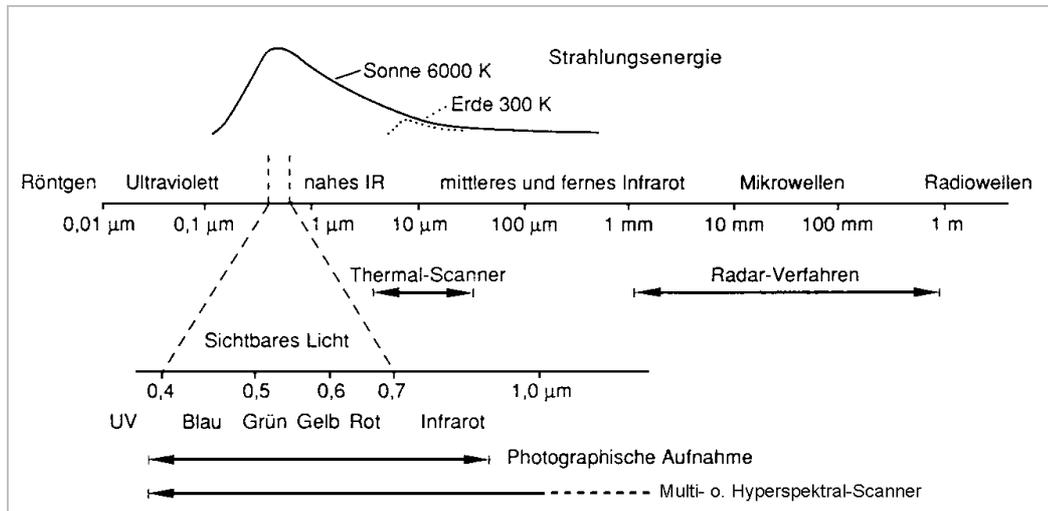


Abbildung 2-1: Das elektromagnetische Spektrum mit den Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundungssystemen in den verschiedenen Wellenlängenbereichen und Strahlungsenergie von Sonne und Erde nach dem Planckschen Strahlungsgesetz (ALBERTZ 1991).

Innerhalb des elektromagnetischen Spektrums stellt das sichtbare Licht einen winzigen Teilbereich dar, der zwischen 400 und 700 nm liegt. Der als Infrarot bezeichnete Wellenlängenbereich zwischen 700 bis 10000 nm besteht aus zwei grundsätzlich verschiedenen Strahlungen. Das relativ kurzwellige Infrarot zwischen 700 und ca. 3000 nm, das unmittelbar an das sichtbare Licht anschließt, wird als reflektiertes (auch nahes oder solares) Infrarot bezeichnet, da es von der Sonnenstrahlung herrührt. Das ferne Infrarot dagegen stellt die von der Erde bzw. der Wolkendecke ausgestrahlte Wärmestrahlung (Wärmeemission) dar. Sie wird auch als thermisches Infrarot bezeichnet. Aus der ist ebenfalls ersichtlich, dass die Atmosphäre der Erde nur in den sichtbaren, infraroten und Mikrowellenbereichen für die Strahlung durchlässig ist und nur hier Fernerkundung möglich ist.

2.2.2 Atmosphärische Beeinflussung der Strahlung

Der wichtigste Faktor für die Anwendbarkeit bestimmter Wellenlängenbereiche ist der Grad der Transmission, mit dem diese Wellen die Atmosphäre zu durchdringen vermögen. Diese Durchdringungsbereiche werden als atmosphärische Fenster bezeichnet. Das wichtigste atmosphärische Fenster liegt im Bereich des sichtbaren Lichts (400-700 nm) (Abbildung 2-2).

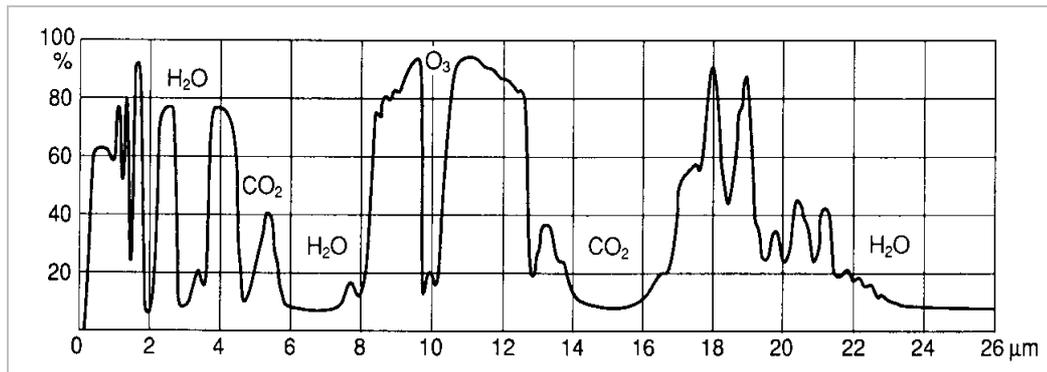


Abbildung 2-2: Atmosphärische Fenster/Transmission (ALBERTZ 1991).

Der Infrarot-Bereich zwischen 700 und 10000 nm verhält sich unterschiedlich. Strahlen von 2500-3500 nm und 5000-7500 nm werden absorbiert. Für Strahlen durchlässig ist die Atmosphäre zwischen 700 und 2500 nm im Bereich des solaren Infrarots, sowie zwischen 3500 und 4000 nm und 8000 und 12000 nm im Bereich des thermalen Infrarots. Für die Fernerkundung weitgehend ungeeignet sind die Strahlen mit kürzeren Wellenlängen, wie das Ultraviolett-Licht oder die sehr kurzwelligen Röntgenstrahlen. Längere Wellenbereiche hingegen, wie der Mikrowellen-Bereich, werden von der Atmosphäre kaum gestört, und werden daher von der Radar- und passiven Mikrowellenerkundung benutzt.

2.2.3 Reflexion und Streuung

Neben der Absorption durch die Atmosphäre, ist auch die Reflexion zu beachten. Die Reflexion hängt vor allem ab von:

- < der Oberflächenbeschaffenheit des Objektes,
- < der Lage in Bezug auf die einfallende Strahlung,
- < den spektralen Merkmalen (Farbe im sichtbaren Bereich) des Körpers.

Ein ebenfalls wichtiger Vorgang, der die Strahlung beeinflusst, ist die Streuung, die durch das Vorhandensein von kleinen festen oder gasförmigen Partikeln in der Atmosphäre hervorgerufen wird. Man unterscheidet zwischen:

- < Selektiver Streuung, die durch Teilchen wie Gasmoleküle, Rauch, Dunstpartikel verursacht wird, deren Durchmesser kleiner oder gleich der Wellenlänge der Strahlen ist.
- < Nicht-selektiver Streuung, die durch Staub, Nebel und Wolken hervorgerufen wird. So ist z. B. bei Nebel und Wolken die Streuung so stark, dass die gesamte Strahlung gestreut wird, und diese Fläche auf dem Fernerkundungsbild weiß abgebildet wird, obwohl die einzelnen Wasser- oder Dunstteilchen farblos sind.

Die Streuung verringert den Kontrast eines Luftbildes oder einer Abbildung merklich. Das Problem der atmosphärischen Streuung lässt sich durch eine geringere Distanz des Aufnahmesensors zum Objekt, sowie mit Hilfe von Filtern und Datenmanipulation reduzieren.

Es wurden theoretische Modelle erstellt, die das Verhalten der Strahlung in der Atmosphäre und Wechselwirkungen der Strahlung mit den Messobjekten unter den verschiedensten Bedingungen möglichst genau erklären und simulieren können (BUSCHMANN 1993). Es werden Verfahren angewandt, die den Atmosphären- und Topographieeffekt in den Fernerkundungsdaten mit Hilfe physikalisch basierter Verfahren korrigieren und die Daten in Reflexionswerte umrechnen (RICHTER 2000).

Um eine Vergleichbarkeit der Bilddaten zu gewährleisten, ist speziell für die multitemporale Auswertung eine Korrektur des atmosphärischen Einflusses meist unverzichtbar. Verfahren durch die der Atmosphäreneffekt teilweise eliminiert werden kann, stellen Verhältniszahlen (so genannte Indices) dar. Der am weitesten verbreitete Index ist der NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), der aus dem Sensorsignal im sichtbaren roten und nahen infraroten Bereich durch die Bildung des Quotienten zwischen der Differenz und der Summe der beiden Signale berechnet wird (BANNARI et al. 1995).

2.2.4 Datenverarbeitung und -auswertung

Die Bildinterpretation, also das Erkennen und Deuten der Bildinhalte, kann visuell rechnerisch oder kombiniert erfolgen. Bei der visuellen Auswertung stehen die Erfahrungen und kognitiven Fähigkeiten des Bearbeiters im Vordergrund, da die Bildinhalte im Kontextbezug in die Auswertung eingebunden werden (WERNER et al. 1999). Die Vorteile der rechnergestützten Methoden liegen in der Integrierbarkeit der Ergebnisse in ein geographisches Informationssystem, der Nutzung multisensorieller Daten, sowie der schnelleren Verarbeitung.

Die digitale Bildverarbeitung stellt Verfahren und Methoden zur Nutzung des Informationspotenzials der Bilddaten zur Verfügung, in denen zum Beispiel versucht wird, charakteristische Signaleigenschaften eines Messobjektes zu finden, um es möglichst von anderen Messobjekten unterscheiden zu können. Dabei spielt die Signalintensität in einem bestimmten Spektralbereich sowie die Form des Spektrums eine große Rolle (BUSCHMANN 1993).

Die Spektralsignatur stellt einen „Fingerabdruck“ des Objektes dar. Je besser die Kenntnis der Spektralsignatur, also z. B. der Position von Absorptionsbanden, umso genauer lassen sich Objektparameter bestimmen (SCHWARZER 1997). Der gesamte Verlauf der Spektralkurve und die Position und Stärke der Absorptionsbanden können in vielen Fällen verwendet werden, um unterschiedliche Materialien zu bestimmen und zu differenzieren. Bei nicht organischen Materialien wie Mineralen bestimmt die chemische Zusammensetzung und die Kristallstruktur den Kurvenverlauf und die Anwesenheit und Position spezifischer Absorptionsbanden. Bei Vegetation sind es in erster Linie die Blattpigmente, die Zellstruktur sowie der Wassergehalt.

Bei der digitalen Bildverarbeitung werden überwiegend statistischen Verfahren zur Klassifikation angewandt. Der Begriff der Klassifikation beschreibt ein Verfahren der Zuordnung eines Bildobjektes zu einer Gesamtheit von Objekten (Klasse), die sich von anderen durch bestimmte Merkmale unterscheiden. In diesem Fall also die Klassifikation nach der spektralen Ähnlichkeit.

Ziel der Klassifikation ist die Zusammenfassung von Pixeln in eine begrenzte Anzahl von (spektralen) Klassen, basierend auf der Gruppierung (*Clustering*) der Pixelgrauwerte. Sollten die Signaturen des Messobjektes nicht bekannt sein, wird versucht, sie aus zwei- oder mehrdimensionalen Merkmalsräumen zu ermitteln (Abbildung 2-3). Der Merkmalsraum vereinigt die Grauwerte aller Bildelemente in allen Spektralbereichen. Dabei wird jeder Bildpunkt in diesem Raum als Merkmalsvektor dargestellt.

Besonders wichtig ist es, die richtigen Merkmale zu finden, indem die Beziehungen zwischen den Eigenschaften der Objekte und denen in den Bilddaten sorgfältig untersucht werden (JÄHNE 1997). Es besteht die Notwendigkeit einer Entscheidungsfunktion, die jeder Pixel einer Klasse im Merkmalsraum zuweist. Beispiele für klassische statistische Verfahren sind Methoden wie *Minimum Distance*, *Maximum Likelihood* oder *Nearest Neighbour*.

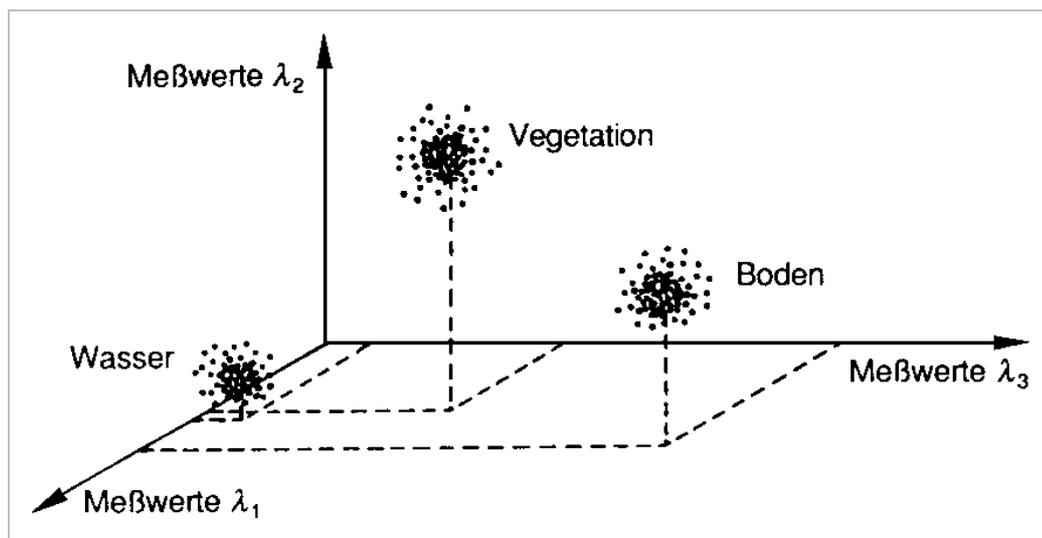


Abbildung 2-3: Dreidimensionaler Merkmalsraum (ALBERTZ 1991).

Die Klassifizierung der Messobjekte erfolgt meist auf Basis von Vergleichsmessungen in bekannten Kontrollgebieten (Bodenreferenz oder *Ground Truth*). Je mehr Zusatzinformationen über ein Gebiet vorliegen, umso sicherer kann die Charakterisierung der Messobjekte durchgeführt werden (BUSCHMANN 1993).

2.3 Ermittlung von Boden- und Vegetationsparametern aus optischen Fernerkundungsdaten

Von Seiten der Fernerkundung können einfach zu bestimmende Parameter wie die Landnutzung bereits zur Verfügung gestellt werden. Sollen aber Bodeneigenschaften und Pflanzenparameter, wie die Bodenfeuchte, der Blattflächenindex oder die Wuchs-

höhe, flächenhaft bestimmt werden, stoßen die herkömmlichen Fernerkundungsmethoden an ihre Grenzen. Es besteht die Notwendigkeit zu überprüfen, ob diese Grenzen mit Hilfe der weiterentwickelten Fernerkundungssysteme, wie z. B. Hyperspektralsensoren, und Auswerteverfahren überschritten werden können (BACH 1995).

Im Folgenden werden verschiedene Boden- und Pflanzenparameter, die aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten extrahiert werden können, behandelt.

2.3.1 Bestimmung von Bodenparametern

Da das Reflexionsverhalten eines Bodens von den Bodeneigenschaften der obersten Bodenschicht abhängig ist, sind zur Bestimmung von Bodenparametern aus spektraler Information Kenntnisse über Einflüsse und Auswirkungen der Bodeneigenschaften auf die Reflexions- und Absorptionsprozesse an der Bodenoberfläche notwendig (BACH 1995).

Die Reflexionskurven von Böden unterscheiden sich deutlich von denen der Vegetation. Im Spektralbereich des sichtbaren Lichtes (400 – 700 nm) ist die Reflexion durch ein stetiges Ansteigen zur langwelligeren Strahlung hin gekennzeichnet. Im nahen Infrarot (700 – 1300 nm) steigt die Reflexion zunächst weiter an, erreicht bei vielen Böden etwa bei 800 nm ein erstes, schwach ausgeprägtes Maximum und steigt gegebenenfalls nach einem leichten Absinken bei 900 nm erneut an (vgl. Abbildung 2-4). Im Spektralbereich zwischen 1300 und 2500 nm fällt die Reflexionskurve ab und zeigt deutliche Minima in den Bereichen der Wasserabsorptionsbanden bei 1400, 1900 und 2200 nm (HILDEBRANDT 1996), die durch Vibrationen in der molekularen Struktur des Wassers verursacht werden (BACH 1995). Diese geben Auskunft über den Wassergehalt des Bodens.

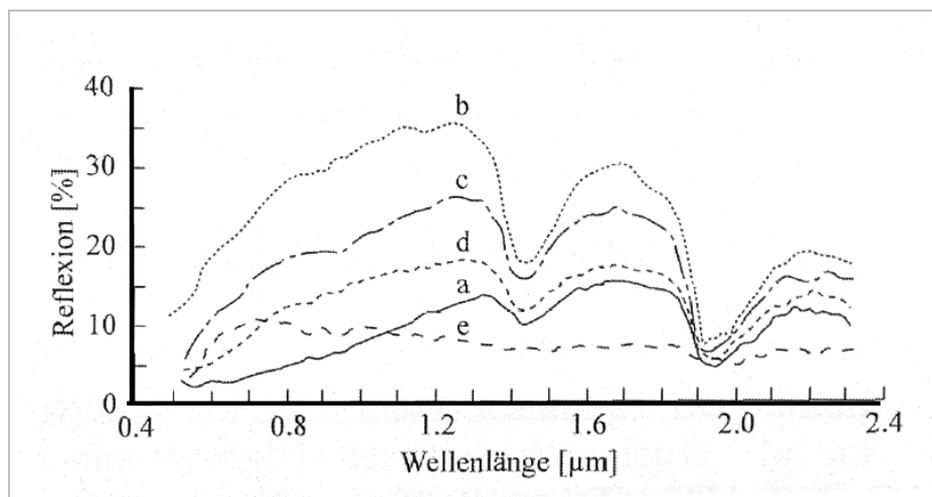


Abbildung 2-4: Charakteristische Reflexionsspektren für Oberbodenproben von fünf Mineralböden (STONER & BAUMGARDNER 1981) a) hoher Gehalt an organischer Substanz, mittelfeine Textur; b) gering entwickelter Rohboden, geringer Gehalt an organischer Substanz, mittlere Eisengehalte; c) geringer Gehalt an organischer Substanz, mittlere Eisengehalte; d) hoher Gehalt an organischer Substanz, mittelgrobe Textur; e) hoher Eisengehalt, feine Textur.

In der folgenden Aufstellung werden Bodenparameter, die einen Einfluss auf die Reflexionseigenschaften eines unbewachsenen Bodens haben und somit direkt oder indirekt aus Fernerkundungsdaten extrahierbar sind, dargestellt (BACH 1995, CURRAN 1985, HILDEBRANDT 1996). Anhand der aufgeführten Parameter lassen sich die Möglichkeiten und Grenzen der Bestimmung von Bodenparametern aus Fernerkundungsdaten beschreiben:

- < Bodenfeuchte bzw. Oberflächenfeuchte (beschreibt den aktuellen hydrologischen Zustand des Bodens),
- < Mineralzusammensetzung (insbesondere Art und Größe der bodenbildenden Minerale),
- < Eisen- und Eisenoxidgehalt,
- < Gehalt an organischer Substanz (Art und Anteil humoser Stoffe),
- < Korngrößenverteilung (Bindung des Wassers an den Boden (pF-Kurve), Pflanzenverfügbarkeit des Wassers),
- < Oberflächenstruktur des Bodens / Bodengefüge.

Die Ausführungen haben gezeigt, welche Bodenparameter einen Einfluss auf die Reflexionseigenschaften eines Bodens haben und wie sie aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten aus bestimmten Bereichen der Reflexionsspektren ermittelt werden können. Diese Bodeneigenschaften von unbewachsenen Böden lassen Schlüsse hinsichtlich

- < Bodenart,
- < Wasserhaltefähigkeit, Wasserversorgung,
- < Aggregatstabilität (zur Abschätzung der Erosions- und Verschlammungsgefahr),
- < Nährstoffspeicherfähigkeit,
- < Bodendegradation,
- < Erosionsgefährdung und
- < Eignung als Pflanzenstandort zu (KUNTZE et al. 1988).

Aus der Vielzahl der dargestellten Größen, welche die Bodenreflexion beeinflussen, und ihrer wechselseitigen Beeinflussung wird deutlich, dass die Zusammenhänge äußerst komplex sind (BACH 1995). Daraus ergeben sich Ansätze und Notwendigkeiten der Modellierung der Reflexion eines Bodens in Abhängigkeit von einzelnen Bodenparametern. Nur so wird es möglich, Aussagen hinsichtlich des Zustandes oder der Gefährdung eines Bodens sowie weitergehende Aussagen hinsichtlich der Eignung als Pflanzenstandort bzw. als landwirtschaftliche Nutzfläche zu treffen (CLEVERS 1994).

2.3.2 Bestimmung von Pflanzenparametern

Für die Fernerkundung stellt sich die Frage, wie die Informationen aus den verschiedenen Spektralbereichen genutzt werden können, um verschiedene Bodenbedeckungsar-

ten zu identifizieren. Die genaue Untersuchung von verschiedenen Pflanzenarten anhand ihrer Reflexionskurven ist äußerst schwierig und ohne zusätzliche Bodeninformation meist kaum möglich, da die Reflexionskurven für die meisten Pflanzenarten, im Gegensatz zu Mineralien einen sehr ähnlichen Verlauf haben (VANE & GOETZ 1993).

Auch hier zeigt sich der große Vorteil von hyperspektralen Daten gegenüber beispielsweise multispektralen Daten. Durch die kontinuierliche Überdeckung des Spektrums und eine hohe spektrale Auflösung ist es möglich, feine Unterschiede und Auffälligkeiten im Spektralverlauf zu detektieren und sie im Idealfall bestimmten Pflanzeigenschaften zuzuordnen. Pflanzen bestehen im Allgemeinen aus wenigen spektral direkt oder indirekt identifizierbaren Stoffen. Nach BOARDMAN (1999) sind dies Chlorophyll, Wasser, Zellulose, Lignin, Stärke, Proteine, Zucker, Stickstoff, Salz und Wachs.

Kennzeichnend für viele verschiedene Pflanzenarten ist ein relativ niedriges Rückstrahlungsvermögen im sichtbaren Spektralbereich. Im nahen Infrarotbereich von 700-1300 nm zeigen die meisten Pflanzen ein hohes Reflexionsvermögen sowie ein sehr ausgeprägtes Rückstrahlungsverhalten für Wellenlängenbereiche im mittleren Infrarot (KAPPAS 1994).

Der Reflexionsverlauf von Pflanzen lässt sich unabhängig von der jeweiligen Pflanzenart in drei Bereiche unterteilen. Sie unterscheiden sich durch die jeweils dominierenden Strahlungstransportvorgänge, die wiederum an spezifische Bestandteile des Blattes gekoppelt sind (BACH 1995). Diese Bestandteile sind die Blattpigmente, die Zellstruktur der Blätter und anderer Pflanzenteile sowie der Wassergehalt der Pflanze (CURRAN 1985) (Abbildung 2-5).

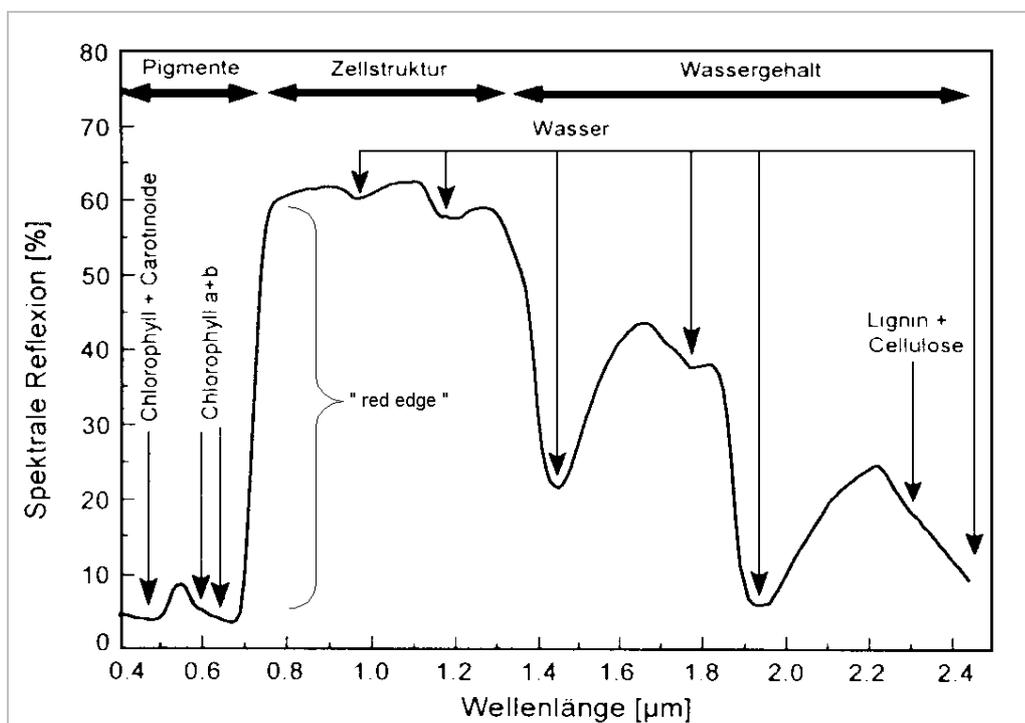


Abbildung 2-5: Einflussgrößen auf die spektrale Reflexion von Blättern, typischer Verlauf eines Reflexionsspektrums von Vegetation (verändert nach BACH 1995, JÜRSCHIK 1998).

Im sichtbaren Spektralbereich (400 – 700 nm) sind die Absorptionen der Blattpigmente (Chlorophyll a und b, Carotinoide) vorherrschend. Sie sind verantwortlich für die Photosynthese. Die verschiedenen Blattpigmente unterscheiden sich in ihren Absorptionsbanden. Das Chlorophyll a absorbiert in den Bereichen 360 – 460 nm und 600 – 770 nm. Das Chlorophyll B absorbiert in den Absorptionsbanden 400 – 460 nm. Von Chlorophyll werden vor allem die blauen und gelben Anteile des sichtbaren Lichts absorbiert, während die Grünanteile von den Blättern reflektiert werden. Dies führt zu einem relativen Reflexionsmaximum im grünen Wellenlängenbereich. Mit zunehmendem Chlorophyllgehalt sinkt die Reflexion des grünen Lichtes (BUSCHMANN 1993). Weitere reflexionsbeeinflussende Blattpigmente sind das Protochlorophyll (Absorptionsband 400 – 460 nm), das Carotin (380 – 510 nm) und das Xanthophyll (400 – 510 nm) (KAPPAS 1994).

Neben den Blattfarbstoffen beeinflusst auch die Blattoberfläche und die im Allgemeinen farblose äußerste Zellschicht des Blattes (Epidermis) gleichmäßig das Reflexionssignal im gesamten sichtbaren Spektralbereich. Wachsaufgaben und Behaarung führen zu einer generell höheren Reflexion (BUSCHMANN 1993).

Die Reflexion von gesunder Vegetation steigt für die meisten Pflanzen am Übergang vom roten zum nahen infraroten Spektralbereich bis hin zu Werten von 40 oder 50 % stark an („red edge“). Dies wird zum einen durch das starke Absinken der Chlorophyllabsorptionen verursacht, zum anderen durch die hohe Reflexion im nahen Infrarot. Sie ist in erster Linie durch die Interaktion des Lichtes mit der Zellstruktur der Blätter zu erklären, welche den Energiebeitrag, der vom Blatt reflektiert oder durchgelassen wird, steuert (GRANT 1987, zit. in BACH 1995).

Bevor das Reflexionslicht aus dem Blatt austritt, wird es an den Zellwänden des Blattgewebes gebeugt und reflektiert sowie an kleinen und kleinsten Partikeln der Pflanzenzelle gestreut. Das Licht legt bei seinem Weg durch das Blattgewebe ein Vielfaches des direkten Weges zurück (BUSCHMANN 1993) (Abbildung 2-6). Diese Interaktionen beeinflussen natürlich in starkem Maße den Strahlungsanteil, der dann schließlich vom Blatt reflektiert wird.

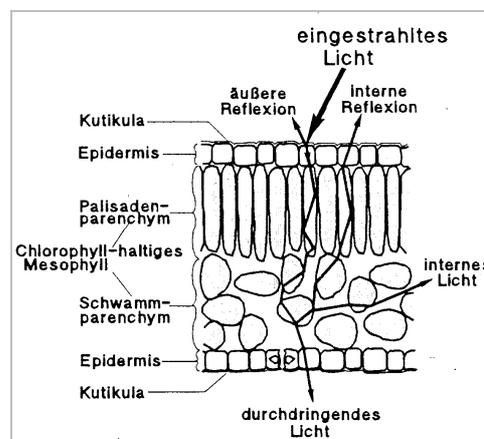


Abbildung 2-6: Absorption und Reflexion an grünen Blättern (ALBERTZ 1991, BUSCHMANN 1993, BACH 1995).

Die Blattstruktur variiert stark zwischen verschiedenen Pflanzenarten. Sie kann sich aber auch als Folge von Stress verändern. Sinkt beispielsweise die Feuchte eines Blattes, verliert es seinen Chlorophyllanteil, die interne Zellstruktur kann geschädigt werden. Insbesondere bei lang anhaltenden Stress-Situationen (z. B. Ozoneinwirkung, Magnesium- oder Stickstoffmangel) verringert sich der Chlorophyllanteil oft deutlich (BUSCHMANN 1993). Dies soll verdeutlichen, dass es verschiedene Faktoren geben kann, die die Reflexion im nahen Infrarot beeinflussen können (Pflanzenart, Stress, Laubzustand, Jahreszeit). Am Ende der Wachstumsphase verlieren Blätter Wasser und Chlorophyll. Die Reflexion im nahen Infrarot nimmt ab, es kommt zur herbstlichen Laubfärbung.

Jenseits von 1300 nm (Mittleres Infrarot) nimmt die Reflexion mit zunehmender Wellenlänge stark ab. Der Wassergehalt der Vegetation steuert hier das Reflexionsvermögen. Breite Wasserabsorptionen finden sich bei 1000, 1200, 1450 und 1900 nm. Die Wasserabsorptionen sind häufig so stark ausgeprägt, dass sie größtenteils die Absorptionen von biochemischen pflanzlichen Inhaltsstoffen wie Lignin und Zellulose maskieren. Erst in Spektren trockener Vegetation treten diese Absorptionen wieder hervor (BUSCHMANN 1993).

Die in Tabelle 2-1 zusammengestellten Eigenschaften von Pflanzenbeständen lassen sich aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten optischer Sensoren über die genaue Analyse des spektralen Verlaufs und die Berücksichtigung der beschriebenen Einflussfaktoren auf die Reflexion von Vegetation ermitteln. Es existieren zahlreiche Strahlungstransport-Modelle, die die Reflexion von Pflanzenbeständen in Abhängigkeit dieser Parameter oder Teilen von ihnen modellieren (BACH 1995).

Tabelle 2-1: Mit hyperspektraler Sensorik bestimmbare Pflanzenparameter (BACH 1995, verändert).

Parameter	Bedeutung
Pflanzenart	Artspezifische Eigenschaften in Bezug auf Transpiration und Biomasseentwicklung
Wuchshöhe bzw. Entwicklungsstand	Aerodynamischer Widerstand gegenüber der Verdunstung, Ernteschätzung, Zustand der Vegetation
Biomasse	Indikator für die Verdunstungssumme, Ernteschätzung
Blattfläche	Verdunstungsfläche, Ernteschätzung, Zustand der Vegetation
Wassergehalt	Stressindikator, Anzeige des Wasserverbrauchs
Bodenbedeckungsgrad	Infiltration und Abflussbildung, Interzeption, Bestandsstruktur

Durch die hohe zeitliche Dynamik des Pflanzenwachstums, der Biomasseproduktion und der Verdunstung ist die Verwendung multitemporaler Datensätze zur Beobachtung pflanzlicher und hydrologischer Prozesse häufig unumgänglich (BACH 1995). Abbildung 2-7 zeigt die starken Veränderungen in der spektralen Signatur von Eichenblättern im Laufe einer Vegetationsperiode. Genau in diesem Punkt liegen aber noch viele Probleme bei der Klassifikation von multitemporalen Daten.

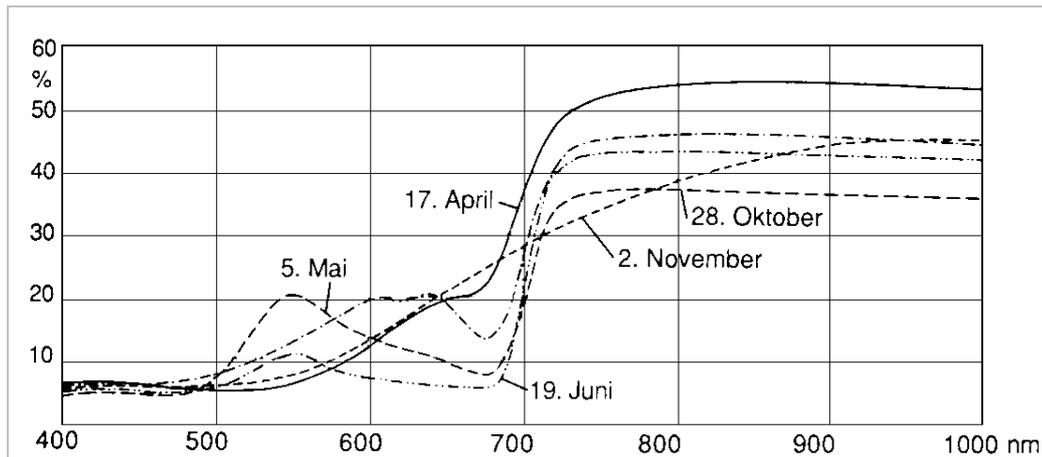


Abbildung 2-7: Spektraler Reflexionsgrad von Eichenblättern zu verschiedenen Zeiten (ALBERTZ 1991).

Insbesondere für die multitemporale Auswertung stellen Verhältniszahlen (Indices) eine Alternative dar, um einen Vergleich bzw. eine Klassifikation zu ermöglichen. Generell hat sich gezeigt, dass die Signale einzelner Messkanäle weniger Aussagekraft haben als die Kombination der Signale aus verschiedenen Spektralbereichen. Es wurden Vegetationsindices entwickelt, die die Reflexionssignale aus unterschiedlichen Spektralbereichen verrechnen (BANNARI et al. 1995).

Vegetationsindices nutzt man auch, um beispielsweise die absorbierte photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) abzuschätzen. Die absorbierte PAR wird auch als Anzeiger für die Blattbodenbedeckung (Blattflächenindex) genutzt. Da für das Pflanzenwachstum ausschließlich Photosyntheseprodukte benutzt werden, wird die während einer Vegetationsperiode absorbierte PAR als Maß für die Biomasse-Produktion angesehen. Auf dieser Basis wird eine Abschätzung von Ernteerträgen möglich (BUSCHMANN 1993).

Die Fernerkundung von Pflanzen kann vielfältige, schnelle und großflächige Informationen über Ausbreitung, Gesundheitszustand und Produktivität der Vegetation liefern. Richtig genutzt, kann sie der kostengünstigste, unter Umständen auch der einzig mögliche Weg sein, diese Art von Informationen zu erhalten. Räumlich und spektral hochaufgelöste Fernerkundungsdaten können mit Hilfe aller verfügbaren Zusatzinformationen (z. B. Karten und Datenbanken zu Klima, Wetter und Bodenbeschaffenheit) genau und anwendungsorientiert interpretiert werden (BUSCHMANN 1993).

In diesem Kapitel wurden die aus spektral hochaufgelösten Fernerkundungsdaten ermittelbaren Boden- und Vegetationsparameter vorgestellt. Aus den beschriebenen Boden- und Vegetationsparametern lassen sich Aussagen beispielsweise zur Erosionsgefährdung eines Bodens oder zum Zustand der Vegetation ableiten. Im nächsten Kapitel soll nun auf die besondere Problematik der satellitengestützten Fernerkundung für landschaftsökologische Fragestellungen eingegangen werden, insbesondere wenn fernerkundliche Methoden in der Landwirtschaft angewendet werden sollen.

2.4 Systeme und Sensoren

Die derzeit im Einsatz befindlichen Fernerkundungssysteme haben in den letzten Jahrzehnten dramatische technische Verbesserungen insbesondere bezüglich der räumlichen und spektralen Auflösung erfahren. Waren vor 10 Jahren noch Systeme mit räumlichen Auflösungen > 20 m das Maß der Dinge (z. B. Landsat TM, SPOT), so werden heute kommerzielle und zivile Systeme entwickelt bzw. betrieben, die aus dem All bis zu 1 m kleine Objekte detektieren können (z. B. IKONOS, Quickbird). Ähnlich verhält es sich mit der spektralen Auflösungsfähigkeit der Sensoren: Die multispektralen (bis zu sieben breitbandige Kanäle) Satellitensysteme werden von hyperspektralen (> 20 schmalbandige Kanäle) Sensorplattformen nach und nach ergänzt bzw. ersetzt.

Doch der Trend zu immer besser aufgelösten Daten bringt auch gewisse Nachteile mit sich, die den derzeitigen weltweit hohen Forschungsbedarf begründen. Hier müssen zum einen die technischen Probleme bei der Handhabung der Daten (Datenaufnahme, -prozessierung und -speicherung) gelöst und zum anderen neue methodische Ansätze bei der Auswertung der Daten und Darstellung der Klassifizierungsergebnisse entwickelt werden.

Der neue Ansatz bei der Anwendung von hyperspektralen Daten besteht darin, dass die Aufnahmen nicht mehr als „Bilder“ verstanden und überwiegend qualitativ ausgewertet, sondern als physikalische Messung betrachtet werden. Demzufolge liegt ein Schwerpunkt der Forschung in der Kalibrierung der hyperspektralen Daten, denn eine exakte Kalibrierung ist die Grundvoraussetzung, um quantitative Aussagen aus den Fernerkundungsdaten zu treffen.

Neben den passiven, optischen Fernerkundungssystemen kommen auch so genannte aktive Systeme zum Einsatz. Im Gegensatz zu den passiven Systemen, die ausschließlich die in der Natur vorhandene elektromagnetische Strahlung benutzen, enthalten aktive Systeme, z. B. Radar und Laserscanner, eine Energiequelle, die die Erdoberfläche künstlich bestrahlt. Aufgenommen wird dann der vom Gelände reflektierte Anteil der Strahlung. Da die Radartechnik als aktives System nicht von der natürlichen Beleuchtung abhängt, besteht der wesentliche Vorteil darin, dass sie zu jeder Tages- und Jahreszeit sowie bei allen Wetterbedingungen eingesetzt werden kann, denn Mikrowellen durchdringen Wolken, Rauch und Dunst (ALBERTZ 1991). Nachteilig wirken sich besonders bei Radarsystemen der höhere Energiebedarf, die komplexere Aufnahmekonfiguration von Sender und Antenne, sowie die schwierigere Auswertung der Messergebnisse aus.

Im Gegensatz zu Radarsystemen, die sowohl in flugzeug- als auch in satellitengestützten Aufnahmeplattformen (ENVISAT, ERS-2) zu finden sind, wird die Laserscan-Technologie (LIDAR) aus systembedingten Gründen ausschließlich von Flugzeugen aus betrieben. Das Laserscan-Verfahren ist ein relativ neues Aufnahmeverfahren. Es wird seit ein paar Jahren verstärkt für die flächenhafte Höhenaufnahme großer Gebiete, z. B. Städte oder ganzer Bundesländer eingesetzt. Ähnlich dem Radar ist auch das Laserscan-Verfahren ein aktives Aufnahmesystem. Es erzeugt eigene Laserstrahlen, die auf die Erdoberfläche gestrahlt und von dort reflektiert werden. Über die Laufzeitmessung des

Laserimpulses kann dann bei genauer Kenntnis der Lage und Position des Senders die Höhe der Geländepunkte ermittelt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit kommt sowohl ein passives als auch ein aktives System zum Einsatz (Abbildung 2-8). Die detaillierte Beschreibung der verwendeten Systeme erfolgt in Kap. 3.3.4, doch zuvor soll in den nächsten Kapiteln eine kurze Darstellung der bekanntesten satelliten- und flugzeuggestützten Systeme stattfinden.

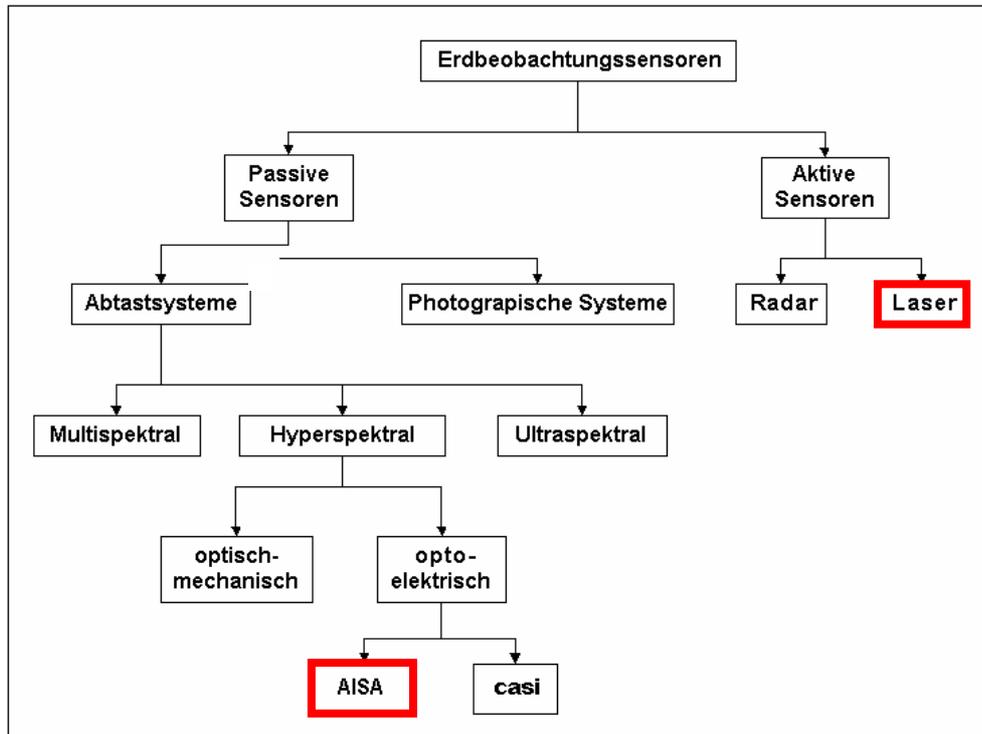


Abbildung 2-8: Einordnung der in dieser Arbeit verwendeten Sensoren (rot umrandet) (verändert, nach ALBERTZ 1991).

2.4.1 Optische satellitengestützte Systeme

Seit Beginn der Weltraumfahrt Mitte des 20. Jahrhunderts, wurde der Fernerkundung für die Erforschung unseres Planeten eine hohe Bedeutung beigemessen. Im Laufe der letzten Jahrzehnte erzielte die Satellitenfernerkundung unglaubliche Fortschritte in Bezug auf räumliches und spektrales Auflösungsvermögen der Sensoren sowie in der gesamten Prozesskette von der Datenaufnahme bis zur Verarbeitung und Analyse der Daten. Nachfolgend sollen stellvertretend für die zahlreichen existierenden optischen Fernerkundungsplattformen vier typische Systeme im Detail kurz vorgestellt werden.

2.4.1.1 Landsat 7

Landsat 7 wurde am 15. April 1999 von der Vandenburg Air Force Base aus ins All geschossen. Der verwendete Sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) ist eine Weiterentwicklung des TM (*Thematic Mapper*)-Sensors der vorangegangenen Modelle. Beim

ETM+-Sensor handelt es sich um einen acht-bandigen multispektralen Scanner, der in der Lage ist, hochaufgelöste Bilder der Erdoberfläche zu liefern. Die Bodenpixelgröße des ETM+ beträgt 30 m für die Bänder 1-5 und 7, 60 m für Band 6, und 15 m für Band 8. Die spektrale Auflösung des ETM+ ist sehr vergleichbar zum TM, sodass eine kontinuierliche Datenlieferung ermöglicht wird. Hinzugekommen ist der hochauflösende panchromatische Kanal 8 (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Spektrale Bänder von Landsat TM und ETM+.

Sensor	Band 1 [nm]	Band 2 [nm]	Band 3 [nm]	Band 4 [nm]	Band 5 [nm]	Band 6 [nm]	Band 7 [nm]	Band 8 [nm]
TM	450 - 520	520 - 600	630 - 690	760 - 900	1550-1750	1040-1250	2080-2350	N/A
ETM+	450 - 520	530 - 610	630 - 690	780 - 900	1550-1750	1040-1250	2080-2350	520 - 900

Ein großer Vorteil der Landsat-Daten besteht in der im Vergleich zu anderen Systemen (Tabelle 2-3) großen Streifenbreite von 185 km. Diese große räumliche Abdeckung (*swath width*) wird gebraucht, wenn es darauf ankommt landschaftsökologische Zusammenhänge oder Phänomene im (über-)regionalen Maßstab zu analysieren.

Tabelle 2-3: Vergleich der unterschiedlichen räumlichen Abdeckung in Abhängigkeit vom räumlichen Auflösungsvermögen.

System	Räumliche Abdeckung	Räumliche Auflösung	
		Multispektral	Panchromatisch
Landsat 7 ETM+	185 km	30 m	15 m
IRS LISS	140 km	23 m	5 m
SPOT 5	60 km	10 m	5 m
IKONOS	11 km	4 m	1 m

2.4.1.2 Ikonos

Mit dem Start von IKONOS im Jahre 1999 begann das Zeitalter der kommerziellen, räumlich höchstaflösenden Systeme, die man bisher nur von militärischen Aufklärungssystemen kannte. Mit Pixelgrößen von 1 m im panchromatischen bzw. 4 m im multispektralen Modus (Tabelle 2-4), kann nunmehr eine Detailschärfe aus dem All erreicht werden, die der luftgestützten Vermessung kaum noch nachsteht.

Tabelle 2-4: Einige Systemparameter von IKONOS.

Kanal	Wellenlänge [nm]	Räumliche Auflösung
Panchromatisch	450 – 900	1 m
Band 1	450 – 530	4 m
Band 2	520 – 610	4 m
Band 3	640 – 720	4 m
Band 4	770 – 880	4 m

Diese hohe Auflösung hat natürlich auch ihren Preis: Können Landsat-Daten für weniger als 0,10 US\$ pro qkm bezogen werden, kosten IKONOS-Daten je nach Lage und Aktualität bis zu 18 US\$ pro qkm (SPACE IMAGING 2004).

2.4.1.3 Hyperion

Die Verbesserung der räumlichen Auflösung von satellitengestützten Systemen kann aufgrund von physikalischen Grenzen (max. ca. 0,2 m) nicht unendlich fortgeführt werden. Daher wird man in den nächsten Jahren die Erhöhung der spektralen Auflösung der Systeme erleben. Mit dem Start des EO-1-Satelliten am 21. Nov. 2000, wurde erstmals ein hyperspektraler Scanner ins All geschossen. Hyperion deckt mit 220 Bändern bei einer Bandbreite von 10 nm den Spektralbereich 400-2500 nm ab. Die räumliche Auflösung beträgt 30 m bei einer *swath width* von 7,5 km. Archivierte Hyperion-Szenen (7,5 km x 42 km) kosten 0,85 US\$ pro km², werden aktuelle Daten benötigt steigt der km²-Preis auf 6 US\$ (USGS 2004).

2.4.2 Optische flugzeuggestützte Systeme

Neben den satellitengestützten Erdbeobachtungsplattformen, werden mehr oder weniger hoch entwickelte Fernerkundungssysteme auch von Flugzeugen aus betrieben. Solche Systeme reichen von der einfachen, analogen Luftbildkamera bis zum technisch ausgefeilten Hyperspektralscanner. Allen Systemen ist gemeinsam, dass sie aufgrund der Nähe zum Beobachtungsobjekt (max. 10 km Flughöhe), weniger leistungsfähige Optiken benötigen, um gute räumliche Auflösungen zu erzielen. Auch andere Einschränkungen, wie z. B. die Energieverfügbarkeit oder der Platzmangel, spielen bei flugzeuggestützten Systemen in der Regel eine untergeordnete Rolle. Den vielen Vorteilen beim Einsatz von flugzeuggestützten Systemen (z. B. die hohe Detailschärfe, besseres Signal/Rausch-Verhältnis die flexible Einsatzplanung von Messflügen, die Durchführung von Befliegungen unterhalb der Wolkendecke etc.) stehen aber auch zahlreiche Nachteile gegenüber. Genannt seien z. B. die aufwändige Missionsplanung, die schlechtere Flächenleistung oder die aufwändigen geometrischen Korrekturverfahren zur Kompensation der Eigenbewegung des Flugzeugs.

2.4.2.1 High Resolution Stereo Camera (HRSC)

Bei der HRSC handelt es sich um ein neun-bandiges digitales Zeilenscannersystem, das am Institut für Planetenerkundung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) ursprünglich für die Erkundung der Mars-Oberfläche entwickelt wurde. Eine Weiterentwicklung der Kamera wird seit 2004 bei der Mars-Express-Mission der European Space Agency (ESA) für die hochgenaue stereographische Erfassung der Marsoberfläche verwendet.

Die hinter einer Optik parallel angeordneten CCD-Zeilen liefern unter verschiedenen Blickwinkeln simultan aufgenommene, sich überlagernde Bildstreifen. Durch die Fortbewegung des Flugzeuges erfolgt dabei nach dem so genannten *Pushbroom*-Prinzip die

Abbildung eines Streifens in Parallelperspektive. Fünf CCD-Zeilen dienen der Stereoauswertung, vier werden durch den Einsatz spezieller Filter für die Erzeugung multispektraler Bilder benötigt. Die vier Multispektralkanäle erfassen einen Spektralbereich von 440 – 850 nm. Bei einer üblichen Flughöhe von 4000 – 6000 m entstehen digitale Orthofotos mit einer Auflösung von 25 cm und digitale Oberflächenmodelle (DOM) mit einer Höhengenaugigkeit von 50 cm.

Die Besonderheit des Systems liegt in der gleichzeitigen digitalen Aufnahme von mehreren verschiedenen Bildprodukten (Echtfarben-Orthophoto-Mosaik, panchromatische *True-Orthophoto*-Mosaik, *Colorinfrarot-True-Orthophoto*-Mosaik und Digitale Oberflächenmodelle), was die Einsatzmöglichkeiten der Datenauswertung verbreitert.

2.4.2.2 HYMAP

Neben anderen flugzeuggestützten Hyperspektralscannern wie AVIRIS (*Airborne/Visible Infrared Imaging Spectrometer*), DAIS-7915 (*Digital Airborne Imaging Spectrometer*) oder den im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kommenden AISA (*Airborne Imaging Spectrometer for different Applications*), sei insbesondere der Hyperspektralscanner HYMAP genannt, denn dieser kommerziell verfügbare Scanner verfügt über ausgezeichnete technische Merkmale, mit denen hervorragende Bildergebnisse erzielt werden. HYMAP wurde 1996 von der australischen Fa. Integrated Spectronics Pty Ltd. entwickelt, und kommt in zahlreichen Ländern, so auch in Deutschland, weltweit zum Einsatz. Dieser hochwertige Scanner zeichnet 128 Spektralbänder mit einer Bandbreite von 15 – 20 nm im Wellenlängenbereich von 400 – 2480 nm auf.

Das sehr gute Signal/Rausch-Verhältnis von > 500:1 gewährleistet eine sehr hohe radiometrische Qualität der Bilddaten. Die geometrische Auflösung liegt je nach Flughöhe zwischen 5 bis 10 m. Der Aufnahmewinkel von 60 - 70 Grad ermöglicht eine Aufnahmebreite von beispielsweise 3500 m bei einer Flughöhe von 3000 m.

2.4.3 Aktive flugzeuggestützte Systeme

2.4.3.1 Radar-Systeme

Beim Radar mit synthetischer Apertur (SAR) werden von der Sendeantenne, die seitlich am Rumpf eines Flugzeuges montiert ist, Mikrowellensignale senkrecht zur Flugrichtung und schräg zur Nadirrichtung abgestrahlt. Die von der Erdoberfläche reflektierten Signale werden einige Mikrosekunden später von der gleichen Antenne empfangen und aufgezeichnet. Jedes Objekt wird dabei bei der Aufnahme von mehreren Signalen beleuchtet. Bei der späteren Datenprozessierung können die entsprechenden Informationen zu einem Bild mit hoher geometrischer Auflösung zusammengesetzt werden. Das SAR ist ein aktives Verfahren der Fernerkundung, d. h. es werden elektromagnetische Signale mit einer bestimmten Wellenlänge ausgestrahlt und das reflektierte Signal wird ausgewertet. Es hat den Vorteil, dass es tageszeit- und witterungsunabhängig ist, da die elektromagnetische Strahlung im Mikrowellenbereich die Erdatmosphäre nahezu

ungehindert durchdringen kann. Nachteilig ist die aufwändige apparative Ausrüstung des Flugsystems, sowie die komplizierte Verarbeitung der Daten.

2.4.3.2 Laserscan-Systeme

Ein besonders wirtschaftliches Verfahren zur Erstellung von digitalen Geländemodellen ist der Einsatz der luftgestützten Laserscan-Technologie (LIDAR). Die Genauigkeit der Höhenmessung liegt unterhalb 10 cm (bei einer Rastergröße von 1 m).

Beispielhaft genannt sei der von der Fa. Infoterra GmbH betriebene Laserscanner Optech ALTM-2033. Mit diesem Instrument lassen sich Geländepunkte aus einer Flughöhe von bis zu 3000 m mit einer Erfassungsrate von 33 kHz erfassen. Bei 2000 m Flughöhe liegt die Punktedichte bei 1,7 m, einer räumlichen Abdeckung von 1450 m und einer Höhengenaugigkeit von ± 25 cm.

2.5 Problematik der satellitengestützten Fernerkundung

Die Anwendung von fernerkundlichen Methoden zur Beschreibung und Bewertung von Boden- und Vegetationsparametern stößt auf verschiedene Probleme. Die Reflexion der Pflanzenbestände verändert sich aufgrund wachstumsabhängiger unterschiedlicher Ausprägung der stofflichen und der morphologischen Eigenschaften fortlaufend, sodass zu keinem Zeitpunkt feste, für bestimmte Zustände der Pflanzen, typische Kenngrößen bestehen. Diese Dynamik kann nur durch eine multi-temporale Erkundung der Pflanzenbestände erfasst werden. Doch gerade bei der Satellitenfernerkundung ist es wegen der geringen Repetition (Landsat TM: 16 Tage) und der Abhängigkeit von guten Wetterverhältnissen zum Zeitpunkt des Überfluges (notwendig ist ein nahezu wolkenfreier Himmel) nur selten möglich, den für die Messung eines bestimmten Parameters zu einer bestimmten Wachstumsphase optimalen Aufnahmezeitpunkt zu treffen. Dieses Problem kann durch den Einsatz wetterunabhängiger Radarsatelliten (z. B. ERS-1) - es fehlen dann jedoch die für vegetationskundliche Untersuchungen wichtigen optischen Informationen - oder durch den Einsatz einer zeitlich flexiblen, unterhalb der Wolken fliegenden Sensorplattform gelöst werden.

Ein weiteres Problem der Fernerkundung liegt darin, dass sich die Eigenschaften der Pflanzen nicht immer nur in einer spektralen Linie niederschlagen, sondern in mehreren Linien oder Bändern zugleich, und deswegen kompensierende und additive Effekte im Spektrum gleichermaßen auftreten. Durch die Verwendung eines spektral hochauflösenden Spektrometers können solche Mischinformationen (im Pflanzenbestand selbst, aber auch mit dem Boden) spektral getrennt werden, sodass eine eindeutige Zuordnung der spektralen Information zu bestimmten Phänomenen erfolgen kann (KÜHBAUCH 1991). Die multispektralen Sensoren der Satellitensysteme hingegen besitzen nur eine begrenzte Anzahl von relativ breitbandigen spektralen Bändern (z. B. Landsat TM: 7 Bänder, SPOT: 4 Bänder), sodass sie für die Aufzeichnung von feinen spektralen Unterschieden ungeeignet sind. Wie in Abbildung 2-9 exemplarisch dargestellt, kann der für vegetationskundliche Erkundungen wichtige Anstieg der Reflexion zwischen 700 und

750 nm (*red-edge*) mit den Landsat-Sensoren nur unzureichend bzw. gar nicht gemessen werden.

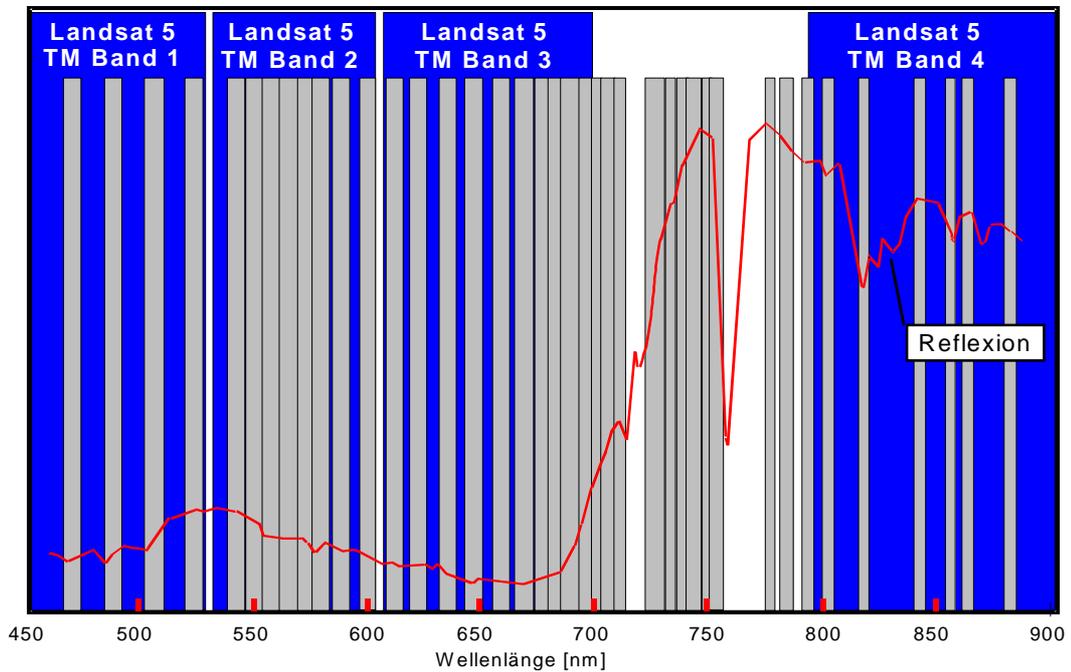


Abbildung 2-9: Unterschied zwischen einem breitbandigen System (Landsat 5 TM; blaue Säulen) und eines mehr- und schmalbandigen Hyperspektralscanners (graue Säulen). Exemplarisch ist als rote Linie das Spektrum eines bewaldeten Gebietes hinterlegt.

Ein weiteres Hindernis für den Einsatz der satellitengestützten Erdbeobachtung stellt die relativ schlechte räumliche Auflösung dar. Die kleinste abgebildete Flächeneinheit in einer Landsat TM-Aufnahme hat eine Größe von 30 m x 30 m. Daher können Strukturen, deren Kantenlängen kleiner als 30 m sind, nur als Mischpixel erfasst werden. Es ist daher kaum möglich, bei einer Flächengröße unter 1 ha ein befriedigendes Klassifikationsergebnis zu erhalten. Selbst im Bereich bis 2 ha kann aufgrund von Mischpixelbildung an den Feldrändern oder bei ungenügender Feldbreite (< 50 m) aufgrund von Waldschatten oder hohem Kleinstrukturanteil noch ein Fehler von 25 % auftreten (KÜHBAUCH 1991). Mit dem Einsatz der aktuellen so genannten hyperspatialen Systeme, die im multispektralen Modus Auflösungen besser 5 x 5 m² erreichen, sollten selbst kleinräumige Unterschiede innerhalb eines Schläges erfasst werden können (Abbildung 2-10).



Abbildung 2-10: Beispielhaft dargestellt ist der Unterschied zwischen der räumlichen Auflösung eines flugzeuggestützten (AISA aus 2000 m Flughöhe, Bodenpixel $2 \times 2 \text{ m}^2$, links) und eines satellitengestützten (z. B. Landsat TM, Bodenpixel $30 \times 30 \text{ m}^2$, rechts) Sensors. Man beachte die Zunahme von Mischinformationen (Schatten, unterschiedliche Nutzungsform) bei geringer räumlicher Auflösung.

3 GEGENSTAND DER ERDNAHEN ERDBEOBACHTUNG

3.1 Maßstabsfrage

Die Rolle von Maßstab und Auflösung ist ein zentrales Thema in den Geowissenschaften. So betont RICHARDS (1981) die gegenseitige Abhängigkeit von Betrachtungsmaßstab, Untersuchungsmethoden und Untersuchungsergebnissen. Die erforderliche geometrische Auflösung hängt im besonderen Maß von der Fragestellung ab, sodass sowohl großmaßstäbige als auch kleinmaßstäbige Systeme ihre Vor- und Nachteile haben und man sie als sich ergänzende Verfahren betrachten sollte. Hinsichtlich einer Bewertung von Ökosystemen entstehen somit notwendigerweise verschiedene Ausgangssituationen bei der Nutzung von Fernerkundungsdaten. In Abbildung 3-1 werden die interessierenden Dimensionen der Geoinformation dem notwendigen terrestrischen Aufwand und den administrativen Ebenen gegenübergestellt. Sie veranschaulicht den Zusammenhang von zunehmender Aggregation und Generalisierung einer Information bei zunehmender räumlicher Dimension und die umgekehrt zur Detaillierbarkeit der Information proportionale Entscheidungsmöglichkeit der administrativen Ebene (BARUTH et al. 1996).



Abbildung 3-1: Darstellung der administrativen Nutzerhierarchien sowie verschiedener Informationsdimensionen in Bezug auf genutzte Karteninformation und auf das Fernerkundungspotenzial (verändert nach BARUTH et al. 1996).

Es sei hier auf die unterschiedlichen Definitionsmöglichkeiten des Begriffs „Maßstab“ und dem damit zusammenhängenden Konzept der „Auflösung“ hingewiesen (LAM & QUATTROCHI 1992). Der Prozessmaßstab beschreibt die Größenordnung bzw. das räumliche Ausmaß eines Phänomens oder Prozesses, dem der Betrachtungsmaßstab einer Untersuchung entsprechen muss. Der Kartiermaßstab bezeichnet das Verhältnis zwischen der Größe eines Phänomens in der Natur und der Größe seiner Abbildung auf dem Papier bzw. seiner quantitativen Erfassung als Messwert. Auflösung bezeichnet dagegen die kleinste unterschiedene und unterscheidbare Einheit bei der Erfassung eines Phä-

nomens. Im Bereich der Fernerkundungs- und GIS-Technologie ist die Maßstabsfrage besonders augenfällig, denn hier lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem räumlichen Maßstab geographischer Phänomene und dem Maßstab bzw. der geometrischen Auflösung der Bilddaten herstellen (Abbildung 3-3).

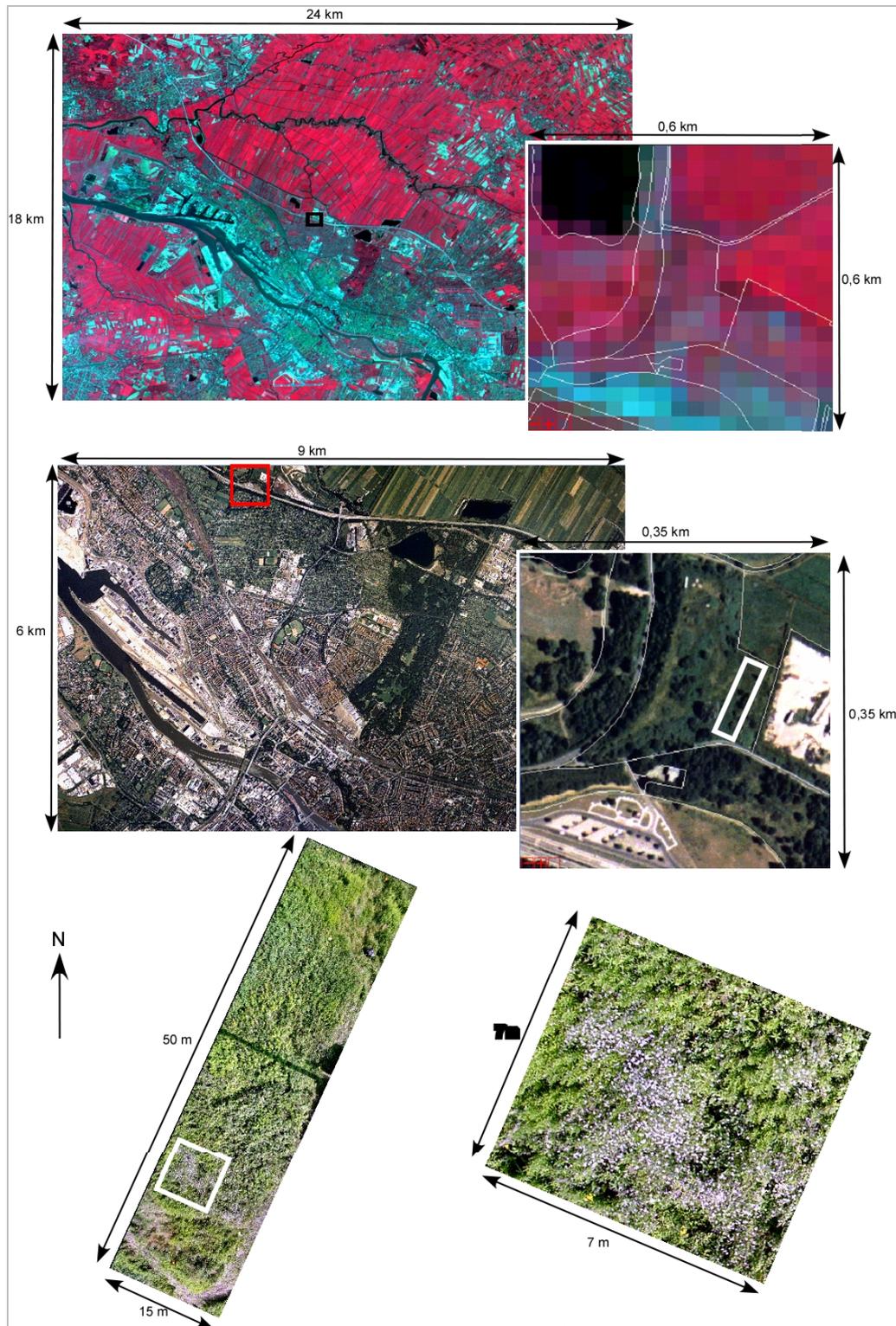


Abbildung 3-2: Darstellung der unterschiedlichen Maßstabsebenen und sensorabhängigen Auflösungen am Beispiel der ehemaligen Bauschuttdeponie Siedenburg, Bremen. Oben:

SPOT-Aufnahme von Bremen. Die Bodenauflösung beträgt 20 m x 20 m. Die rechts abgebildete Fläche (Siedenburg Deponie) lässt sich mit nur ca. 35 Pixel darstellen. Mitte: Luftbildaufnahme des gleichen Ausschnittes wie oben. Die Deponie Siedenburg wird viel detaillierter dargestellt. Für Vegetationsaufnahmen auf Gesellschaftsebene ist diese Auflösung jedoch auch noch ungeeignet. Unten: Detailaufnahme mittels digitaler Kamera mit einer Bodenauflösung von ca. 5 cm x 5 cm. Einzelne Pflanzen können detektiert werden.

3.2 Systeme für die erdnahe Erdbeobachtung

Systeme für die großmaßstäbige Erdbeobachtung werden zumeist in hohem Maße anwendungsbezogen gewählt oder entwickelt. Da ein besonderes Augenmerk auf die Durchführung einer Befliegung durch den Nutzer selbst oder auf die spezielle wissenschaftliche Fragestellung liegt, existiert weltweit eine Vielzahl von technisch mehr oder weniger aufwändigen Systemen, die oft auch den sehr unterschiedlichen Erfahrungsschatz und die Kenntnisse der Anwender widerspiegeln.

Eine komplette Übersicht aller verfügbaren Systeme ist daher nur schwer realisierbar, insbesondere weil viele Plattformen auf die speziellen Bedürfnisse einer wissenschaftlichen Studie hin entwickelt wurden und nach Abschluss der Arbeiten in der Regel dann nicht weitergeführt werden. Dennoch sollen im Folgenden die wesentlichen Systeme für großmaßstäbige Fernerkundung kurz beschrieben werden. Sie lassen sich in zwei Hauptkategorien einteilen, den gefesselten und den ungefesselten Systemen. Obwohl es sich streng genommen nicht um ein gefesseltes System handelt, kann das im Rahmen dieser Arbeit beschriebene krangestützte Vermessungssystem wegen seiner vergleichbaren Systemeigenschaften dieser Kategorie zugeordnet werden.

3.2.1 Gefesselte Systeme

Zu den gefesselten Systemen zählen Drachen, sowie unbemannte Leichtgas- und Heißluftballone. Drachen wurden erstmals im neunzehnten Jahrhundert eingesetzt (BATUT 1890) und werden seitdem für Dokumentationszwecke immer wieder eingesetzt, z. B. bei archäologischen Ausgrabungen (BUSEMEYER 1987) oder anderen landschaftsökologischen Untersuchungen (BIGRAS 1997, BÜRCKERT et al. 1997, MARZLOFF 1999). Der Vorteil dieser als aerodynamisch geltenden Systeme gegenüber den aerostatischen Flugkörpern liegt in der relativ hohen Nutzlastkapazität und Flughöhe sowie der guten Transportfähigkeit, weil das Fluggerät keinerlei Treibstoff oder Auftriebsgas benötigt. Nachteilig sind jedoch die Abhängigkeit von guten Windverhältnissen und die recht schwierige Positionierung der Kamera (GRYZBECK 1987).

Für die großmaßstäbige Erdbeobachtung kommen auch so genannte aerostatische Systeme zum Einsatz (MARKS 1989), also Systeme, die ihren Auftrieb ohne die Anströmung von Luft erzielen. Die Verwendung von aerostatischen Systemen wie Helium- oder Heißluftballone, bietet gegenüber den Drachen eine Reihe von Vorteilen. So ist die Positionierung einfacher zu bewerkstelligen und die Stabilität der Fluglage ist deutlich höher. Des Weiteren sind sie vibrationsfrei, was bei der Verwendung von empfindlicher Sensorik von großer Bedeutung ist. Sowohl die Helium- als auch die Heißluftballone gibt es mit kugelförmiger Hülle sowie in Zeppelinform (*Blimp*) (WANZKE 1984, HECKES 1987).

Die Zeppeline bieten den großen Vorteil, dass sie dank ihres stromlinienförmigen Körpers und der Leitwerke stabiler als kugelförmige Ballone im Wind liegen. Der wesentliche Nachteil insbesondere der heliumgefüllten Systeme liegt in den hohen Füllgaspreisen. Andererseits ist die Sicherheit des Systems bei der Verwendung von nicht brennbarem Helium gegenüber dem kostengünstigeren, aber explosivem Treibgas Wasserstoff deutlich höher einzuschätzen. Gegenüber den ebenfalls nicht brennbaren Heißluftballonen liegt der wesentliche Vorteil der Helium-Systeme in ihrer höheren Nutzlastkapazität, weil zusätzlich zur Sensorik kein Brenner/Brennstoff mitgeführt werden muss.

3.2.2 Ungefesselte Systeme

Gegenüber den gefesselten Systemen haben die ungefesselten Systeme den entscheidenden Vorteil, dass die zu untersuchende Fläche nicht betreten werden muss. Daher kommen für viele Fragestellungen vermehrt auch frei fliegende Modellfluggeräte zum Einsatz (KÜGELGEN 1987, WALKER & DE VORE 1995, KASILE 1994). Solche unbemannten Modellflugzeuge oder –helikopter bieten den Vorteil der hohen Ortsunabhängigkeit und sind aufgrund ihrer geringen Größe gut zu transportieren. Doch der wesentliche Nachteil dieser in der Regel sehr kleinen Systeme ist die zu geringe Nutzlastkapazität für hochauflösende Aufnahmesysteme. Darüber hinaus erschwert das Fehlen einer Navigationseinheit die Flugführung und die Einschätzung des Aufnahmeortes. Das Potenzial dieser auch als miniUAV (*mini Unmanned Aerial Vehicle*) bezeichneten Fluggeräte ist weltweit jedoch unbestritten (USICO 2003, FROST & SULLIVAN 2002), insbesondere wenn mit dem zunehmenden Miniaturisierungsgrad der Aufnahme- und Stromversorgungssysteme die geringe Nutzlastkapazität dieser Fluggeräte kein Problem mehr darstellt.

Neben den unbemannten, ferngesteuerten Systemen kommen aber auch niedrig fliegende bemannte Systeme zum Einsatz. Dazu gehören z. B. die Mikro- oder Ultraleicht-Fluggeräte (OFFERMANN 1987, McCREIGHT 1994), die den günstigen Flugeigenschaften der oben genannten Systeme am nächsten kommen. Gegenüber den unbemannten Systemen bieten sie den großen Vorteil, dass die Nutzlastkapazität deutlich höher liegt und somit auch technisch aufwändigere Sensoren mitgeführt werden können. Entscheidend für qualitativ hochwertige Aufnahmen sind eine gute Vibrationsdämpfung sowie die geringe Fluggeschwindigkeit, um Unschärfeprobleme durch die Bildwanderung zu vermeiden.

3.3 Anforderungen an das System

Wie aus den vorherigen Kapiteln deutlich hervorgeht, besteht der Bedarf nach einem sowohl spektral als auch räumlich hochauflösenden System, das den Anforderungen einer detaillierten Geländekartierung Rechnung trägt. Das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte System besteht aus einem Hyperspektralscanner, einem 3D-Laserscanner und einer Digitalkamera.

Mithilfe der abbildenden Spektrometrie (Kap. 3.3.1) lassen sich außerordentlich hohe spektrale Auflösungen erzielen, die schon eher mit einer physikalischen Messung

gleichzusetzen sind und somit einen neuartigen Einblick in die Eigenschaften jedes Bodenpixels eröffnen.

Durch die Einbindung eines 3D-Laserscanners (Kap. 3.3.2) wird gleichzeitig und deckungsgleich zur hyperspektralen Szene ein hochgenaues digitales Oberflächenmodell erstellt. Durch die Überlagerung eines solchen hochgenauen Oberflächenmodells mit den optischen Informationen aus dem Hyperspektralscanner, besteht die Möglichkeit, der spektralen Information eines einzelnen Bildpunktes einen genauen Höhenwert zuzuweisen.

Durch die Verwendung einer handelsüblichen Digitalkamera (Kap. 3.3.3), werden als dritte mögliche Informationsebene außerordentlich scharfe Farbaufnahmen der untersuchten Fläche angefertigt. Die im Vergleich zum Hyperspektralscanner räumlich besser aufgelösten Aufnahmen von heutzutage preiswerten 4-Megapixel-Kameras dienen im Verlauf der Auswertung als Kontrollmittel bei der Auswertung der Spektrometriedaten. Sie können aber auch für viele Anwendungen als alleiniges Bildprodukt fungieren.

Das multisensorielle Aufnahmeverfahren ermöglicht eine Vielzahl von neuen, kombinierten Auswertestrategien. Neben den herkömmlichen multispektralen Klassifikationsverfahren (z. B. *Maximum Likelihood*, *Isodata*, *Band Ratios*) sowie den komplexeren und rechenaufwändigeren hyperspektralen Methoden (z. B. *Spectral Matching*, *Spectral Angle Mapper*, *Spectral Feature Fitting*), können nunmehr auch die Gelände- bzw. Oberflächenhöhen und die hieraus abgeleiteten Parameter (z. B. Exposition, Neigung, Textur) bei der Klassifikation hinzugezogen werden. Anwendungsbeispiele werden in Kap. 4.2.8 und Kap. 4.3 noch ausführlich beschrieben.

3.3.1 Abbildende Spektrometrie

Die abbildende Spektrometrie ist ein Verfahren der passiven, optischen Fernerkundung, die sich in den frühen Anfängen der achtziger Jahre, einhergehend mit dem rapiden Fortschritt auf dem Gebiet der Halbleitertechnik entwickelte (ROTHFUSS 1994).

Abbildende Spektrometer zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen relativ großen Spektralbereich in vielen Kanälen mit hoher spektraler Auflösung gleichzeitig aufnehmen können (ROTHFUSS 1994, STROBL 1999). Bei Systemen, die Bilder mit mehreren Wellenlängenbereichen aufzeichnen, spricht man von multispektralen Scannern. Mit der Steigerung der Anzahl von Kanälen kommt man in den Bereich von Hyperspektralscannern. Eine klare definierte Grenze ist in der Literatur nicht zu finden. Bei LILLESAND & KIEFER (1999) spricht man als typische Grenze von mehr als 200 spektralen Bändern. BACH (1995) geht von 100 spektralen Kanälen aus.

Die hohe spektrale Auflösung kombiniert mit der hohen räumlichen Auflösung ermöglicht eine direkte Identifikation vieler Oberflächenmaterialien aufgrund deren charakteristischen Absorptionsbändern (ROTHFUSS 1994, BACH 1995). Abbildung 3-3 stellt das Prinzip der abbildenden Spektrometrie dar.

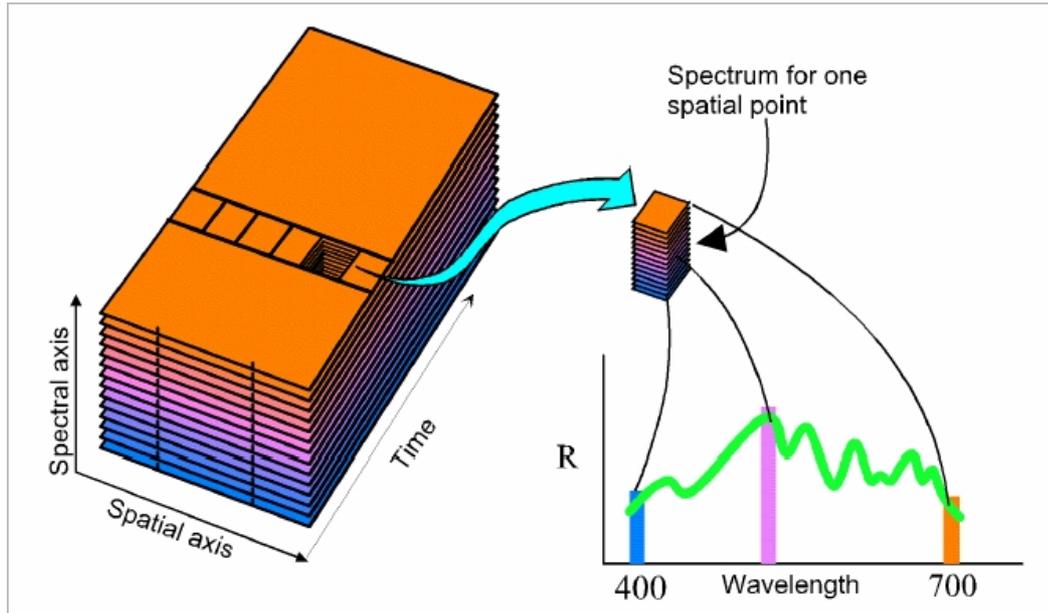


Abbildung 3-3: Grundlegendes Prinzip der abbildenden Spektrometrie (SPECIM 1997a).

3.3.1.1 Kenngrößen

Wichtige Größen für die Beschreibung von hyperspektralen Scannern sind die Größe des Gesichtsfeldes (*Field of View*, FOV), die Anzahl der Bildpunkte, auch Pixel genannt, der abgedeckte Wellenlängenbereich, das Wellenlängenintervall (*wavelength range*) sowie die Anzahl der Kanäle (*channels*).

Die Abbildung 3-4 zeigt die unterschiedlichen Kenngrößen der geometrischen Abtastung. Einem einzelnen Bildpunkt wird ein IFOV (*instantaneous field of view*) zugeordnet. Die Beschreibung der abbildenden Eigenschaften erfolgt in der Gegenstandsebene, also meistens auf der Erdoberfläche. Eine beobachtete Fläche ist somit die Projektion des IFOV in die Gegenstandsebene, auch *ground instantaneous field of view* (GIFOV) genannt. Die von solch einem Bereich ausgehende Strahlung wird für einen Bildpunkt gemittelt, wobei die zentralen Bereiche stärker eingehen, als die Ränder. Durch nebeneinander liegende GIFOV's wird das Gesichtsfeld (FOV) des Sensors am Boden aufgespannt. Der Abstand von benachbarten GIFOV's wird als *ground sampling distance* (GSD) bezeichnet. Da der Bereich eines Bodenabdruckes nicht scharf abgegrenzt ist, gibt es auch keinen „natürlichen Abstand“ zu dessen benachbarten Bereichen. Der Begriff „Pixelgröße“ entspricht der Kantenlänge eines Pixels am Boden, also dem GSD (STROBL 1999).

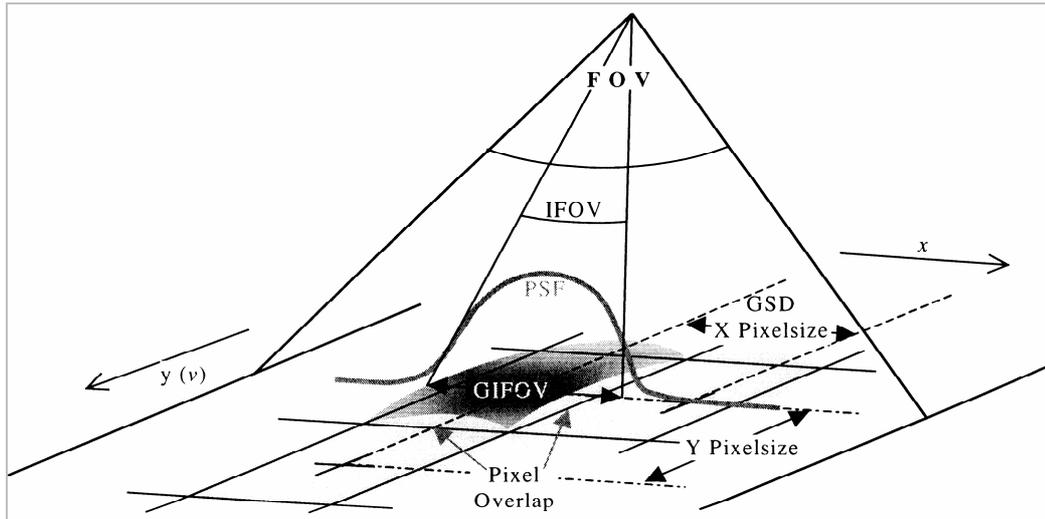


Abbildung 3-4: Kenngrößen der geometrischen Abtastung (STROBL 1999).

3.3.1.2 Detektoren

Um elektromagnetische Strahlung in ein elektrisches Signal zu wandeln, bedarf es eines Detektors. Hierzu werden im Wesentlichen zwei Typen von Quantendetektoren aus Halbleitermaterialien eingesetzt. Der erste Typ wandelt die elektromagnetische Strahlung direkt in elektrischen Strom um (photovoltaisch). Der zweite Typ verwendet photoleitende Elemente, die bei Bestrahlung ihren elektrischen Widerstand ändern. Beide Typen können für abbildende Spektrometer eingesetzt werden. Es ist jedoch zu bedenken, dass die Art und das Mischungsverhältnis der verwendeten Materialien ausschlaggebend für den spektralen Wellenlängenbereich sind, für den sie empfindlich sind.

Siliziumdetektoren z. B. sind im Bereich von $0,4 \mu\text{m}$ bis zu $1,1 \mu\text{m}$ spektral empfindlicher als andere Detektorarten, können jedoch in höheren Wellenlängenbereichen nicht mehr eingesetzt werden, da Silizium ab $1,1 \mu\text{m}$ transparent wird. Vorteilhaft bei der Verwendung von Silizium Elementen ist, dass man keine Kühlung für die Detektoren benötigt, die für andere Detektoren notwendig ist. Diese wird beispielsweise bei Mischkristalldetektoren notwendig, da diese erst bei sehr tiefen Temperaturen ein radiometrisches Nachweisvermögen erreichen (JÄHNE 1997, STROBL 1999).

Bleisulfid-Detektoren können bis zur Wellenlänge von ca. $2,5 \mu\text{m}$ eingesetzt werden, haben im Bereich zwischen $0,4 \mu\text{m}$ und $1,1 \mu\text{m}$ jedoch eine geringere spektrale Empfindlichkeit. Problematisch bei Bleisulfid-Detektoren ist das erhöhte Signalantwortverhalten, d. h. bei unmittelbaren Änderungen der Strahldichte dauert es länger, bis die Spannung am Detektorausgang den neuen Wert erreicht. Daher müssen für solche Sensoren Korrekturverfahren eingesetzt werden, wie etwa beim GER-II-Scanner angewendet (ROTHFUSS 1994).

Möchte man nun den spektralen Bereich von $0,4 \mu\text{m}$ bis zu $2,5 \mu\text{m}$ abdecken, so gibt es verschiedene Möglichkeiten. Ein denkbarer Ansatz ist der Einsatz von verschiedenen Detektoren in einem Spektrometer, wie etwa beim GER-II-Scanner. Dieser verwendet sowohl Silizium- als auch Bleisulfid-Detektoren. Eine andere Variante ist die Verwen-

dung eines Indium-Antimonit (InSb) Detektorarrays, der durchgehend empfindlich ist und im HYDICE-Scanner eingesetzt wird (STROBL 1999).

3.3.1.3 Aufnahmeprinzipien

Die einfachste Möglichkeit eine Fläche aufzuzeichnen ist die Abbildung durch eine Optik. Hierzu verwendet man eine Matrix aus Halbleiterelementen in der Fokalebene der Optik. Die Zahl der Elemente in x und y Richtung entspricht der Anzahl Pixel. Um nun eine größere Fläche aufnehmen zu können, bedarf es eines Detektorarrays mit einigen hundert bis tausend Elementen. Die Technik der simultanen Aufzeichnung eines solchen Bildes wird als *frame grabbing* bezeichnet. Die Aufzeichnung verschiedener Wellenlängen wird durch nacheinander vorgeschaltete Spektralfilter realisiert.

Die beiden derzeit gängigen Aufnahmeprinzipien sind das mechanische Abtasten in Zeilenrichtung (*Whiskbroom*-Scanner) und das zeilenweise Abtasten (*Pushbroom*-Scanner) (siehe Abbildung 3-5).

- < *Whiskbroom*-Scanner: Hierbei handelt es sich um das erste realisierte System, das für jeden spektralen Kanal genau ein Detektorelement besitzt. Für den Aufbau eines Bildes ist das Abtasten in zwei Richtungen notwendig. Die erste Scanrichtung ergibt sich aus der Fortbewegung der Plattform. Die zweite Abtastung erfolgt senkrecht zur Ersten und wird über rotierende Spiegel ermöglicht. Daher wird der *Whiskbroom*-Scanner auch als Rotationsabtaster bezeichnet.
- < *Pushbroom*-Scanner: Fortschrittlicher sind die Systeme, die ein Abtasten quer zur Bewegungsrichtung vermeiden und jeweils für eine gesamte Bildzeile alle Spektralkanäle gleichzeitig aufnehmen können. Dabei wird auf einen zweidimensionalen Detektor in der einen Richtung das Spektrum und in der zweiten, dazu senkrechten Richtung eine räumliche Dimension erfasst (SCHWARZER 1997). Aufgrund dieser Technik ist es simultan möglich, für einen Bodenpixel alle spektralen Kanäle aufzuzeichnen.

Durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs oder einer Schwenkeinrichtung wie im vorliegenden Fall wird dann zeilenweise (streifig) eine Szene erzeugt. Die Deckungsgleichheit der Pixel in den einzelnen Spektralkanälen ist aufgrund der Detektorgeometrie gegeben.

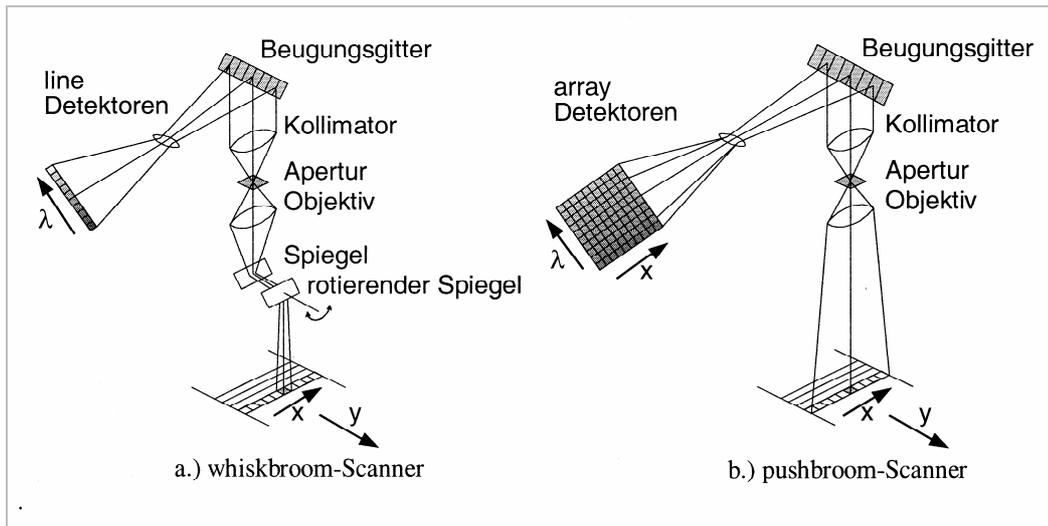


Abbildung 3-5: Gängige Aufnahmeprinzipien für abbildende Spektrometer (STROBL 1999).

Sowohl *Whiskbroom*- als auch *Pushbroom*-Scanner können beliebig lange Szenen erzeugen. Begrenzend ist lediglich die vorhandene Speicherkapazität des aufnehmenden Rechners, da die Bilddateien sehr groß werden können.

3.3.2 Abbildende Laserscanner

Laser ist das englische Kurzwort für *light amplification by stimulated emission of radiation*. Allgemein versteht man unter Laserscanning die dreidimensionale Abtastung einer Objektoberfläche durch zeitlich und örtlich versetzte Abtastung mit einem Laserstrahl (LUHMANN 2000). Nach der Art der Strahlungsemission unterscheidet man zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Lasern. Zur letztgenannten Gruppe gehört der Impuls-Scanner.

Bei Lasern mit Ablenkspiegel-Technik wird die Oberfläche rasterförmig abgetastet. Über die Phasendifferenzmessung zweier Messsignale wird dann anhand der Laufzeit die räumliche Distanz zwischen der Strahlquelle und dem Objektpunkt ermittelt. Die x, y und z Koordinaten jedes abgetasteten Punktes lassen sich dann aufgrund der bekannten Drehwinkel der Spiegel und der ermittelten Entfernung (*range*) eindeutig bestimmen. Darüber hinaus kann noch die reflektierte Intensität des Laserstrahls aufgezeichnet werden. Es entsteht somit ein Abstandsbild sowie ein Intensitätsbild. Besteht eine solche Verbindung, so spricht man von abbildenden Laserscannern oder auch 4D-Laserscanning (LUHMANN 2000).

Ein wesentliches Einsatzgebiet von Laserscannern ist die Erstellung von digitalen Geländemodellen. Vorteilhaft ist hier die schnelle dreidimensionale Erfassung von Oberflächen mit einer hohen Punktdichte. Das Prinzip des Laserscanning nach WEHR (LUHMANN 2000) ist in Abbildung 3-6 zu sehen.

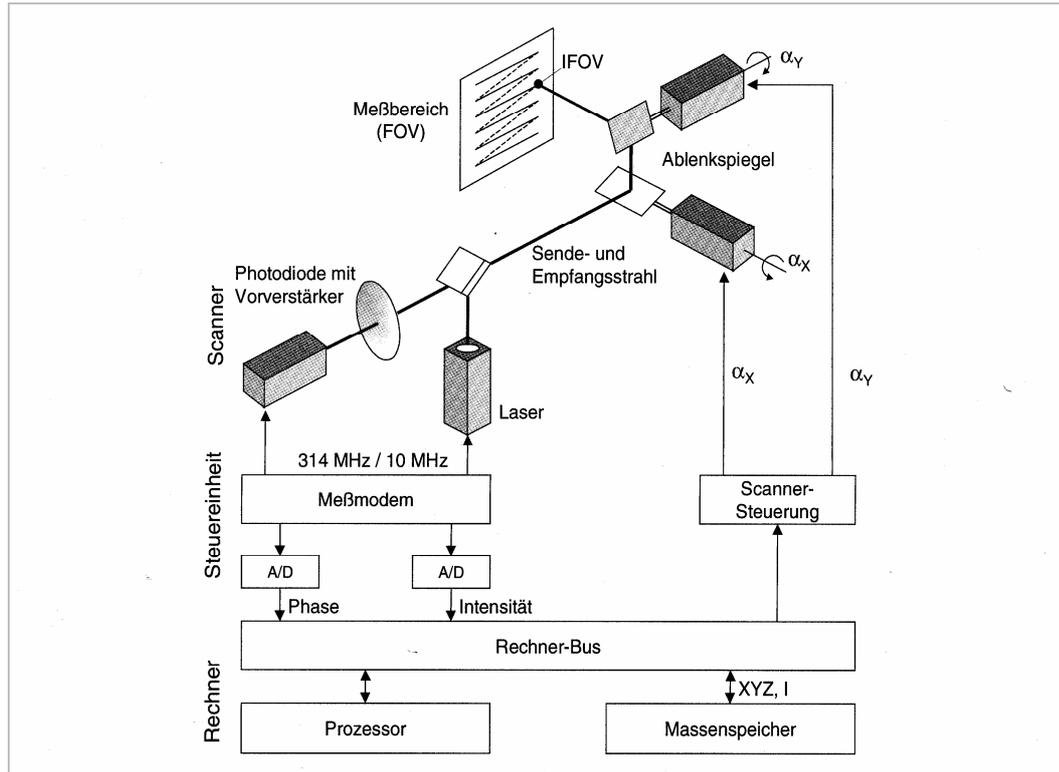


Abbildung 3-6: Laserscanning-Prinzip nach WEHR (LUHMANN 2000).

3.3.3 Luftbild

Als Luftbilder bezeichnet man in erster Linie photographische Bilder eines Teils der Erdoberfläche, die von Flugzeugen aus gewonnen werden. Bei Satellitenbildern wird dagegen in der Regel sprachlich kein Unterschied zwischen echten (photographischen) Bildern und Scanneraufnahmen gemacht. In jüngster Zeit ändert sich diese "klassische" Situation insofern, dass zunehmend auch Flugzeugscannerdaten (z. B. HRSC) verwendet werden.

Wie allgemein bekannt, ist in Bildern eine fast unbegrenzte Fülle von Informationen über das abgebildete Gelände gespeichert, die für verschiedenste Anwendungen von Wert sind. Man unterscheidet dabei die geometrisch orientierte Photogrammetrie mit einer messenden Komponente und die vorwiegend inhaltlich orientierte Luftbildinterpretation, die sich mit den Eigenschaften der Erdoberfläche und den darauf befindlichen Objekten befasst.

Seit den Jahren des 2. Weltkriegs, die durch einen intensiven militärischen Einsatz von Luftbildern und die Erstellung von Luftbildplanwerken gekennzeichnet waren, findet das Luftbild auf breiter Basis operationelle Anwendung. Ebenfalls während des 2. Weltkriegs wurden Versuche mit Infrarot- und Farbinfrarotfilmen durchgeführt, die in den 50er-Jahren zu einer breit angelegten vegetationskundlichen Forschung führten und die in den USA eine weitgehend selbstständige Disziplin der Luftbildinterpretation ermöglichten.

Interpretieren von Luftbildern (und anderen Bildprodukten) heißt, Aussagen über den Bildinhalt zu treffen oder den Bildinhalt zu deuten. Diese Deutung beschränkt sich jedoch nicht nur auf das unmittelbar im Bild Sichtbare, sondern muss darüber hinaus räumliche, siedlungsgeschichtliche und landschaftsgenetische Zusammenhänge berücksichtigen. Luftbildinterpretation ist daher zu einem hohen Grad von der Erfahrung und vom Vorwissen des Interpreten abhängig.

Obwohl die Bildinterpretation gewiss nicht problemlos ist, darf andererseits nicht übersehen werden, dass z. B. Geländekartierungen vor den gleichen Schwierigkeiten stehen. Auch eine pflanzensoziologische oder eine geologische Aufnahme ist an diese Prozesse des Erkennens und Inbeziehungsetzens mit bekannter Information gebunden.

3.3.4 Auswahlkriterien der Sensorik

Im folgenden Kapitel werden die eingesetzten Scanner, deren Einbau in einem so genannten Sensorikträger sowie die verwendete Messplattform im Detail erläutert. Die besonderen Auswahlkriterien bei der Auswahl des Hyperspektral- sowie des 3D-Laserscanners waren:

- < geringes Gewicht,
- < kompakte Bauform,
- < geringer Stromverbrauch,
- < Schnittstellen zu den anderen Hardwarekomponenten des Systems (insbesondere Navigationseinheit),
- < Programmierbarkeit der Schnittstellen,
- < einfache Bedienung.

Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Systeme sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

3.3.4.1 Hyperspektralscanner AISA

Zum Einsatz kommt der Hyperspektralscanner den AISA (*Airborne Imaging Spectrometer for different Applications*) des finnischen Unternehmens Spectral Imaging Ltd., abgekürzt SPECIM (Abbildung 3-7). Der Sensor wurde in Zusammenarbeit mit dem Finnish Technical Research Institute und der NASA entwickelt. Dieser kommerziell verfügbare Scanner wird seit 1996 operationell eingesetzt.



Abbildung 3-7: Der Hyperspektralscanner AISA (SPECIM 1997).

Die Kosten eines solchen Scanners, inklusive Hard- und Software, GPS und INS, betragen weniger als 100.000 U.S. Dollar (SPECIM 1997). Wesentliche Vorteile sind sein geringes Gewicht von ca. 4 kg und die handliche Größe (120 x 170 x 220 mm). Darüber hinaus ist der Scanner programmierbar, was ihn sehr flexibel macht, da er auf die jeweiligen Bedürfnisse des Nutzers angepasst werden kann.

Der AISA ist ein so genannter *Pushbroom*-Scanner und ist mit einem zweidimensionalen (286 x 384) CCD-Detektor ausgestattet. Dies bedeutet, dass für jeden der 384 Pixel einer Bildzeile bis zu 286 Kanäle aufgezeichnet werden können (Abbildung 3-8). Jedes dieser CCD-Elemente hat eine Größe von 23 x 23 μm . Die ersten 364 Spaltenelemente entsprechen den spektralen Bildpunkten einer am Boden abgetasteten Zeile. Die folgenden 20 Pixel sind für die Strahlungsintensitätsmessungen (FODIS = *fiber-optic downwelling irradiance sensor*) belegt, die mit einer Fiber-Optik aufgenommen werden können. Darüber hinaus werden je Zeile noch acht Dunkelstropixel ermittelt.

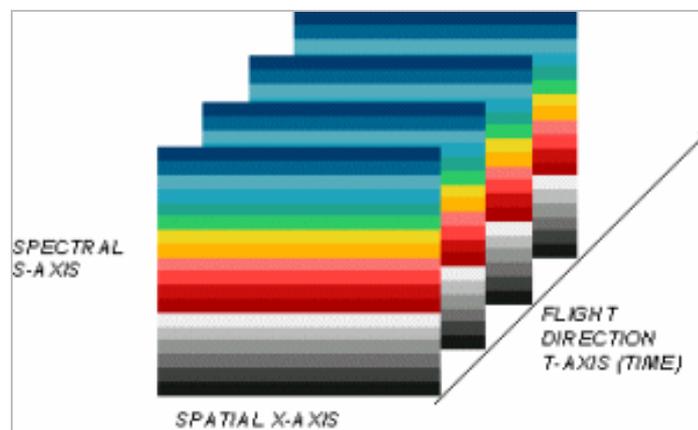


Abbildung 3-8: Aufnahmeprinzip des AISA-Scanners. Die räumliche Achse (spatial axis) beträgt 364 Pixel, und die spektrale Achse (spectral axis) bis zu 286 Kanäle (SPECIM 1997).

Der AISA-Scanner besteht aus einem Spektrometer, der den spektralen Wellenlängenbereich von 422,2 nm bis ca. 899,8 nm in bis zu 286 Kanälen aufzeichnen kann (Tabelle 3-1). Damit ist der Spektralbereich des sichtbaren Lichtes und nahen Infrarotes abgedeckt. Das Bandbreitenintervall reicht von 1,6 nm bis 9,4 nm. Die Programmierbarkeit ermöglicht die Festlegung der gewünschten Wellenlängenbereiche, der Anzahl von spektralen Kanälen, sowie der Bandbreite eines jeden Kanals.

Darüber hinaus können beim AISA-Scanner verschiedene Objektive eingesetzt werden. Die derzeit eingesetzten Optiken sind eine 8-mm und eine 23-mm-Linse. Für das 8-mm-Objektiv ergibt sich aufgrund des Gesichtsfeldes (FOV) von $57,6^\circ$ ein momentanes Gesichtsfeld (IFOV) von 2,6 mrad. Dieses entspricht bei einer Flughöhe von 100 m einer Bodenpixelgröße von ca. 26 cm. Bei der 23-mm-Linse ergibt sich ein IFOV von ca. 1 mrad bei einem Gesichtsfeld von $21,7^\circ$, d. h. bei der Flughöhe von 100 m beträgt die Bodenauflösung ca. 10 cm.

Tabelle 3-1: Technische Spezifikationen des AISA Scanners (SPECIM 1997).

Technik	Pushbroom-Scanner
CCD Detektor	Thomson TH7863, 288 x 384 Elemente Pixelgröße: 23 μm x 23 μm
Spektralbereich	422,2 nm - 899,8 nm, programmierbar
Anzahl der Spektralkanäle	1 - 286, programmierbar
Spektrale Kanalbandbreite	1,6 - 9,8 nm, programmierbar
Anzahl Pixel pro Abtastzeile	364 Spektralpixel, 20 FODIS Pixel, 8 Dunkelstrompixel
FOV	$57,6^\circ$ (8 mm Optik); $21,7^\circ$ (23 mm Optik)
IFOV	~2,6 mrad (8 mm Optik); ~1 mrad (23 mm Optik)
Bodenauflösung (GFOV)	Bei 100 m Messhöhe: 26 cm (8 mm Optik); 10 cm (23 mm Optik)
Signal-Rausch-Verhältnis (<i>Signal to noise ratio</i>)	490:1

3.3.4.2 3D-Laserscanner LMS-Z210

Beim eingesetzten Laserscanner handelt es sich um den 3D-Laser-Mirror-Scanner LMS-Z210 von der Fa. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH in Österreich (Abbildung 3-9). Er gehört in die Gruppe der abbildenden Laser und ist mit einer Impuls-Technik ausgestattet, die insbesondere für die Datenerfassung von dreidimensionalen Bildern eingesetzt wird (RIEGL 2000).



Abbildung 3-9: Der 3D-Laserscanner LMS-Z210 (RIEGL 2000).

Die Entfernungsmessung basiert auf dem Grundprinzip des Sendens von kurzen Laserimpulsen im nahen infraroten Wellenlängenbereich. Ein elektrischer Impulsgeber aktiviert regelmäßig eine Halbleiterlaserdiode, die dann Infrarotlichtimpulse aussendet.

Diese Impulse treffen, abgelenkt durch eine Oberfläche oder ein Objekt (*target*), durch das Empfängerobjektiv auf eine Fotodiode. Aufgrund des Zeitabstandes zwischen dem gesendeten und empfangenen Impuls wird dann mittels einer quarzstabilisierten Zeit- taktfrequenz die Entfernung aufgrund des Weg-Zeit-Gesetzes errechnet. Der ermittelte Streckenwert wird an den internen Mikrocomputer weitergegeben und dort für die Datenausgabe aufbereitet (Abbildung 3-10).

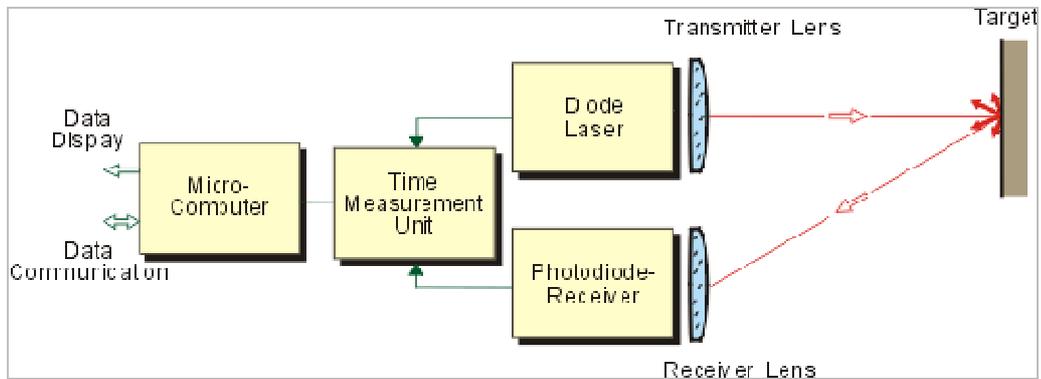


Abbildung 3-10: Prinzip der Entfernungsmessung (RIEGL 2000).

Das Gehäuse des Laserscanners wurde so konzipiert, dass es industriellen Anforderungen genügt. Es hat eine Zylinderform und besteht aus einem stationären und einem drehbaren Teil (Kopf), somit wird gleichzeitig in zwei Ebenen abgetastet (Abbildung 3-11).

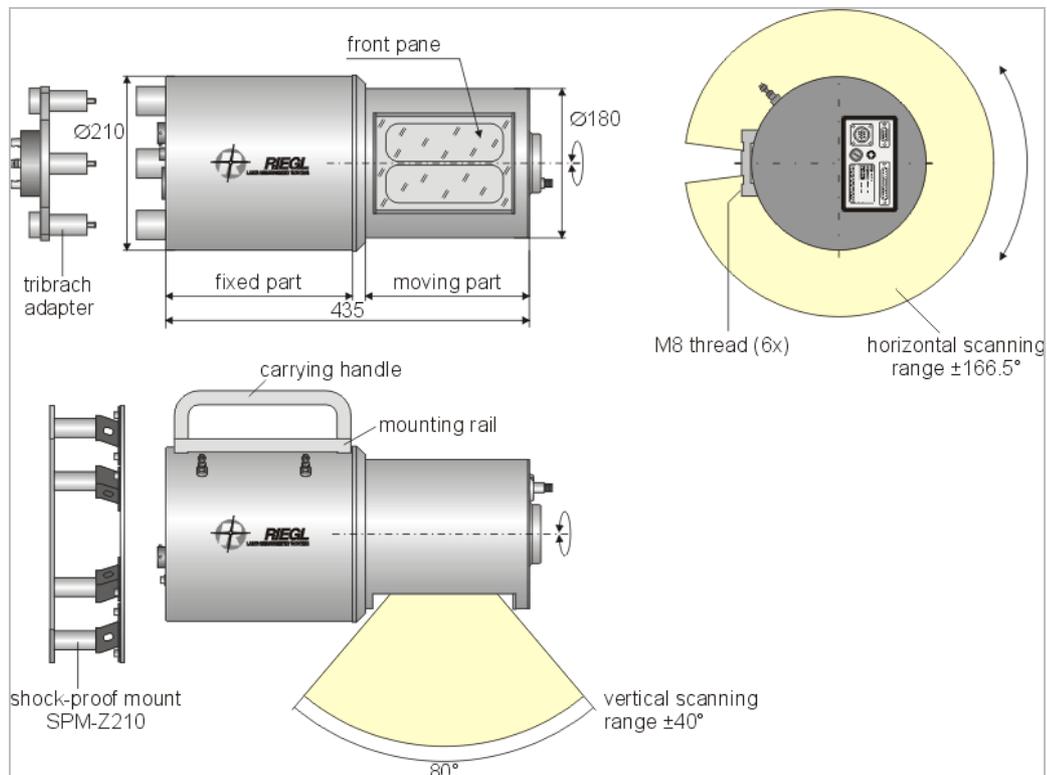


Abbildung 3-11: Design des Laserscanners LMS-Z210 (RIEGL 2000).

Die Tabelle 3-2 gibt die charakteristischen Merkmale des Laserscanners wieder, wobei es sich jedoch nicht um eine komplette Aufstellung aller technischen Daten handelt.

Tabelle 3-2: Technische Daten des Laserscanners LMS-Z210 (RIEGL 2000).

Entfernungsmesserleistung	
Laserkategorie	Klasse 1
Laser Wellenlänge	0,9 µm (nahes Infrarot)
Messgenauigkeit	+/- 2,5 cm (Standardabweichung)
Auflösung	2,5 cm bei max. 350 m Entfernung 5 cm bei max. 700 m Entfernung
Entfernungsbereiche für natürliche Objekte	2 bis 350 m, bei Reflexionsvermögen > 50 % 2 bis 150 m, bei Reflexionsvermögen > 10 %
Lichtstrahlabweichung	Ca. 3 mrad
Linien Scan	
Scanner Mechanismus	Rotierende Polygonspiegel
Abtastwinkel (Polarwinkel)	80 Grad
Winkelschrittweite	Typischerweise 0,24 Grad
Abtastgeschwindigkeit	1 scan/s bis max. 52 scans/s, meistens 20 scans/s
Frame Scan	
Scanner Mechanismus	Optischer Motorantriebskopf
Abtastwinkel (Azimut)	0 bis 333 Grad
Winkelschrittweite	Typischerweise 0,24 Grad
Abtastgeschwindigkeit	1°/s bis maximal 15°/s

3.3.4.3 Digitalkamera Sony DSC-F505

Bei der Sony DSC-F505 handelt es sich um eine 2-Megapixel-Kamera (Abbildung 3-12). Sie besitzt ein 5-fach optisches Zoom-Objektiv von Carl Zeiss und kann verschiedene Auflösungen bis maximal 1600 x 1200 Pixel aufzeichnen. Die Brennweite von $f = 7,1 - 35,5$ mm entspricht einem Zoombereich von 38 – 190 mm einer 35 mm Kleinbildkamera. Das eingebaute *Coupled Charged Device* (CCD) ist auch für den nahen IR-Bereich empfindlich, sodass bei Verwendung eines IR-Filters neben den üblichen drei Farben Rot, Grün und Blau auch das nahe Infrarot erfasst werden kann.



Abbildung 3-12: Die Digitalkamera DSC-F505 (SONY 1999).

Die zum Einsatz kommende digitale Fotokamera kann nicht als Fernerkundungssensor im engeren Sinne bezeichnet werden kann, da ihre optischen sowie radiometrischen Kenngrößen weitgehend unbekannt sind. Die von REMONDINO (o. D.) durchgeführten Analysen zur geometrischen Abbildungsgenauigkeit der Kamera und ihrer Eignung für photogrammetrische Anwendungen belegen eine sehr hohe Abbildungsgenauigkeit (Standardabweichung $<1/10$ Pixel). Eigene Untersuchungen insbesondere zur spektralen Sensitivität wurden bisher nicht durchgeführt.

Für die nachträgliche Kontrolle der Vermessungsergebnisse, dem Auffinden von Messmarken, der Erstellung von Detailaufnahmen sowie bei der Dokumentation von auffälligen Merkmalen zum Zeitpunkt der Vermessung ist diese Kamera aber durchaus geeignet.

4 ENTWICKLUNG EINES MULTISENSORIELLEN SYSTEMS ZUR ERDNAHEN ERDBEOBACHTUNG

4.1 Fragestellung

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Potenzial der erdnahen, multisensoriellen Erdbeobachtung für Fragestellungen in der Landschaftsökologie untersucht werden (Abbildung 4-1). Die Fernerkundung wird bei der direkten oder indirekten Ermittlung von Parametern wie z. B. Vegetationstyp, Wachstumsverlauf, Vitalität, Ernteschätzung oder Heterogenität seit einigen Jahren vermehrt eingesetzt. Zum Einsatz kommen hierbei bevorzugt satellitengestützte Fernerkundungssysteme, obwohl die systembedingten Mängel dieser Plattformen, z. B. die geringe räumliche und spektrale Auflösung sowie die geringe zeitliche Repetition, entscheidende Nachteile bei der Erfassung der hohen Wachstumsdynamik der Pflanzenbestände während der Vegetationsperiode mit sich bringen.

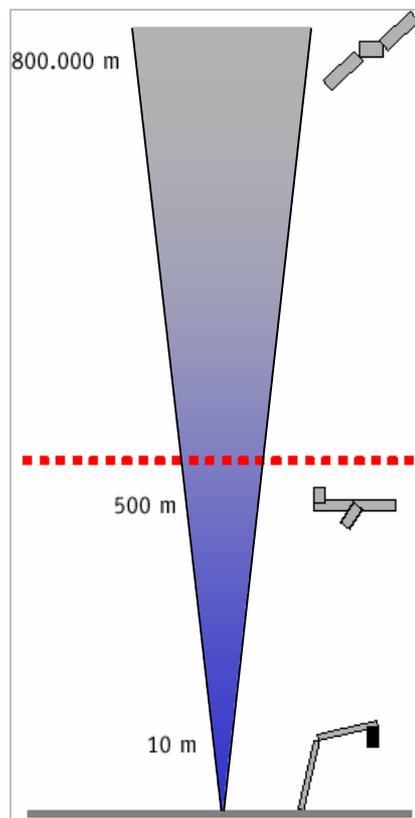


Abbildung 4-1: Kran- und flugzeuggestützte Systeme für die erdnahe Erdbeobachtung (unterhalb der gestrichelten Linie) als Ergänzung zu den herkömmlichen Fernerkundungssystemen.

In Kapitel 4.2 wird zunächst ein krangestütztes Messsystem beschrieben. Als Ergänzung zu den herkömmlichen Fernerkundungssystemen lassen sich mit dem hier zum Einsatz kommenden erdnahen, multisensoriellen System hohe räumliche Auflösungen (<10 cm) realisieren. Durch die kombinierte Verwendung eines Hyperspektralscanners, der feinste spektrale Merkmale im optischen und infraroten Wellenlängenbereich (400 – 900 nm)

aufzeichnet und eines Laserscanners, der ein hochgenaues digitales Oberflächenmodell erstellt, wird für lokal begrenzte Gebiete eine außerordentlich hohe Informationsdichte erreicht.

Um hochaufgelöste, multisensorielle Fernerkundungsdaten für Fragestellungen in der Landwirtschaft einzusetzen, ist die Weiterverarbeitung in einem Geographischen Informationssystem (GIS) notwendig. Erst durch räumliche Abfragen, statistische Analysen, Plausibilitätskontrollen, Volumen- und Differenzberechnungen sowie durch Verschneidungen mit anderen Informationen vom Untersuchungsgebiet kann das Potenzial der erdnahen Erdbeobachtung aufgezeigt werden. Es sei erwähnt, dass die Entwicklung und detaillierte Beschreibung solch eines GIS nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, doch es wird auf Methoden und Verfahren zurückgegriffen, die im Rahmen des Forschungsprojektes INGEER (Integrierte Nutzung von GIS und erdnahe Erdbeobachtung in der Landwirtschaft, AIROBOTICS 1999) entwickelt wurden.

Es werden daher zwei konkrete Fragestellungen formuliert:

- < Sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Kompostaufbringung mit Methoden der erdnahen, multisensoriellen Erdbeobachtung nachzuweisen?
- < Falls ja, kann zu bestimmten Zeitpunkten eine Ernteprognose gestellt werden?

Als Ergänzung zum krangestützten, multisensoriellen Vermessungssystem für lokale, kleinräumige Gebiete wurde der Hyperspektralscanner AISA in einem nächsten Entwicklungsschritt flugzeuggestützt eingesetzt (Kap. 4.3). Durch diesen Schritt wird die für landschaftsökologische Fragestellungen geforderte Flächenleistung deutlich verbessert, wenn auch auf Kosten der spektralen und räumlichen Auflösung. Es wird auf die technischen Besonderheiten des eingesetzten flugzeuggestützten Messsystems eingegangen, die von einer krangestützten Vermessung etwas abweichenden Rohdatenkorrekturverfahren beschrieben sowie einige beispielhafte Klassifikationen bzw. Auswerteverfahren anhand von zwei konkreten Datensätzen dargestellt.

4.2 Krangestützter Messaufbau

4.2.1 Komponenten des krangestützten Vermessungssystems

Für die hochgenaue, multisensorielle Vermessung von kleinräumigen Gebieten wurde ein leichter Sensorikträger entwickelt und konstruiert, der an einem Steiger oder Kran montiert wird (Abbildung 4-2), um in Abhängigkeit von der Messhöhe und den verwendeten Scanner-Einstellungen detaillierte Aufzeichnungen der Untersuchungsfläche durchzuführen. Die typische Flächenausdehnung aus ca. 20 m Höhe beträgt 20 m x 50 m bei einer räumlichen Auflösung von 5 cm (im Nadir).



Abbildung 4-2: Krangestützte Vermessung. Oben links: Sensorikträger mit dem Laserscanner und dem Hyperspektralscanner AISA. Optional kann auch eine Digitalkamera an den AISA-Scanner fixiert werden.

Beim Sensorikträger handelt es sich um eine stabile, viereckige Holzplatte (siehe Abbildung 4-2), an der die Sensorik montiert ist. Die beiden Scanner sowie die Kamera werden so angebracht, dass sie nahezu das gleiche FOV (*field of view*) haben. Eine feste Verbindung der beiden Scanner ermöglicht es, dass die Drehbewegung des Laserkopfes (*frame scan*) auch für den AISA-Scanner und die Digitalkamera genutzt werden kann. Da es sich beim Laserscanner sowie beim AISA um Zeilenscanner handelt, wird diese Drehbewegung benötigt, um den zeilenhaften Aufbau des Bildes durchzuführen, sodass am Ende des Scanvorganges eine flächenhafte Abbildung der Untersuchungsfläche entsteht (Abbildung 4-3).

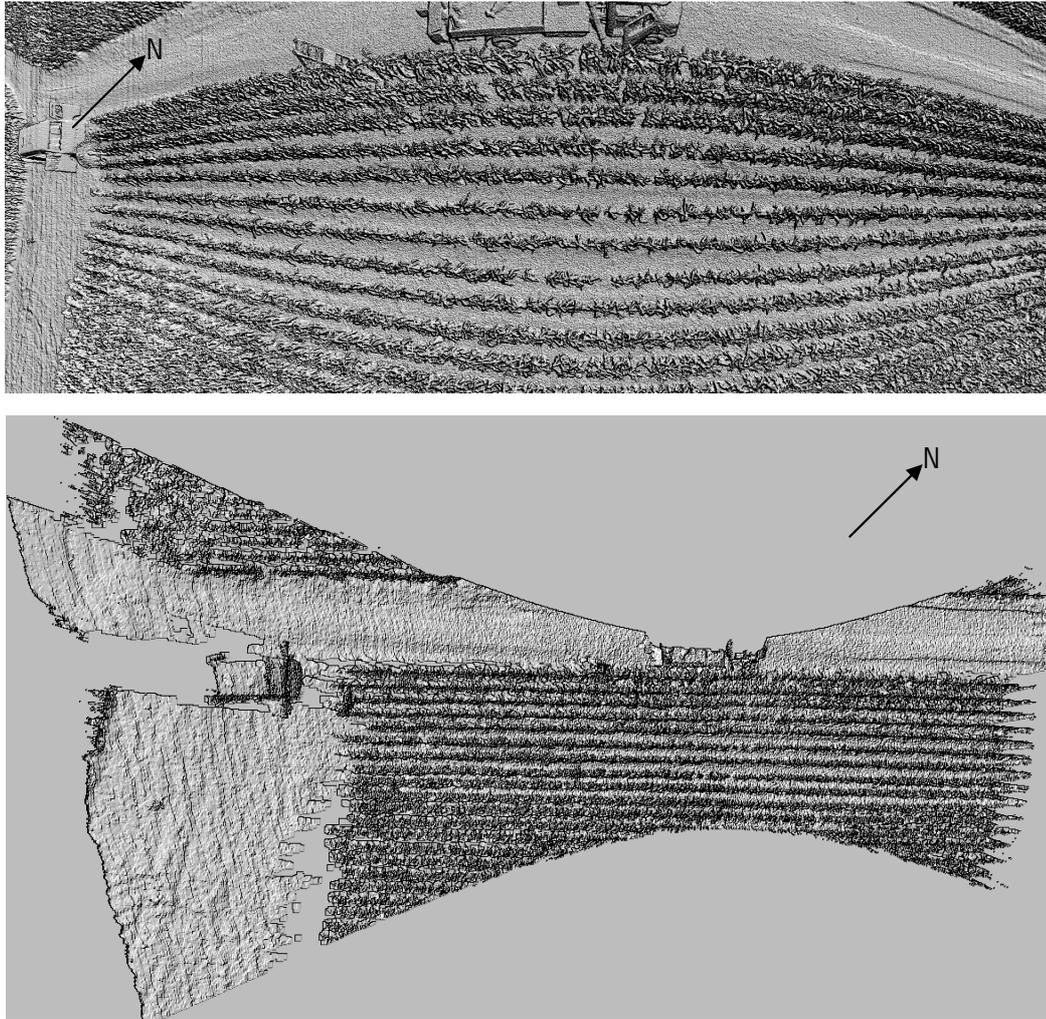


Abbildung 4-3: Reliefdarstellung der Laserscanner-Rohdaten (oben) eines Maisfeldes. Man beachte die zunehmende Verzerrung des Bildes zu den Rändern hin, die mithilfe eines geometrischen Entzerrungsverfahrens korrigiert werden muss (unten) (Kap. 4.2.2).

4.2.2 Datenaufbereitung

Eine wichtige Voraussetzung für die späteren Auswertungen der erzeugten Scannerdaten ist die Entwicklung von Methoden zur Datenaufbereitung, denn die nach der Analog-/Digital-Wandlung gewonnenen Rohdaten (*raw data*) stellen noch nicht die gewünschten physikalischen Messwerte dar. Sie bestehen meistens aus unkalibrierten Zahlenwerten (DNs = *digital numbers*) und beinhalten systembedingte Ausfälle und Fehler, die regelmäßiger oder unregelmäßiger Art sein können. Ein wichtiger Zweck der Datenaufbereitung ist die Beseitigung solcher Fehler. Um die notwendigen Methoden der Vorverarbeitung entwickeln zu können, sind Einblicke in die technischen Details des Scanners ebenso erforderlich wie Kenntnisse über die physikalischen Rahmenbedingungen während der Messvorgänge.

4.2.3 Rohdatenformate

Im Wesentlichen sind hier vier Rohdatentypen zu nennen:

- < AISA-Rohdaten (*.raw),
- < AISA-Dunkelstromdaten (*.drk),
- < AISA-Optikkorrekturdaten (*.cal),
- < Laser-Rohdaten (*.3DD).

AISA-Rohdatendatei

Eine aufgezeichnete AISA-Rohdatendatei (*raw file*) besteht aus zwei Teilen (SPECIM 1997b). Der erste Teil (*header*) beinhaltet Dateiinformationen im ASCII-Format wie das Aufnahmedatum, die Bytengröße eines *Frame*, die Anzahl der Kanäle, FODIS-Pixel, Dunkelstromwerte und der spektralen Bildelemente sowie den Modus und die Integrationszeit. Diese Informationen sind für das spätere Einlesen und Aufbereiten der Rohdaten notwendig.

Der zweite Teil umfasst die eigentlichen spektralen Daten im Binärformat, unterteilt in die einzelnen aufgezeichneten *Frames*. Je *Frame* gibt es drei Datenpakete, welche die GPS-Informationen, Inertialsystemwerte (INS) sowie die eigentlichen spektralen Daten (inkl. FODIS- und Dunkelstromdaten) enthalten. Je nach Aufzeichnungsmodus kann die Anzahl der spektralen Kanäle und Bildpunkte je *Frame* variieren. Daher ist auch das AISA-Dateiformat nicht starr, sondern variabel.

Aus den Datenpaketen eines *Frames* werden für die Weiterverarbeitung nur die spektralen Daten und die FODIS-Werte benötigt. Die GPS- und INS-Informationen pro *Frame* enthalten keine Werte, da die Geräte im vorliegenden krangestützten Messaufbau nicht an den AISA-Scanner angeschlossen sind.

AISA-Dunkelstromdatei

Eine separat erzeugte Dunkelstromdatei hat den gleichen Dateiaufbau wie eine AISA-Rohdatendatei. Der einzige Unterschied zur Rohdatei besteht darin, dass die Daten mit einer geschlossenen Blende aufgezeichnet werden. Die Anzahl der Kanäle und Bildpunkte pro *Frame* hängt auch hier, wie bei der Rohdatei, von der Wahl des Aufzeichnungsmodus ab. Die Anzahl der aufzuzeichnenden *Frames* wird vom Benutzer festgelegt. Bei dieser AISA-Rohdatenart werden nur die spektralen Datenwerte benötigt, alle anderen Informationen bleiben unberücksichtigt.

Optikkorrekturdatei des AISA-Scanners

Für jede eingesetzte Optik (8 mm und 23 mm) wurde seitens des Herstellers eine spezielle Datei bereitgestellt, die bei der radiometrischen Korrektur benötigt wird. Es handelt sich hierbei um eine radiometrische Responsefunktion, die durch zwei Kalibrierungskoeffizienten, *offset* und *gain*, beschrieben wird. Diese Informationen liegen für die maximale Anzahl Kanäle (286) und spektralen Pixel (364) vor. Die Bestimmung der Koeffizienten erfolgte anhand von Lichtmessungen im Labor.

Rohdaten des Laserscanners

Die Laser-Rohdaten bestehen ebenfalls aus zwei Teilen. Der erste Teil beinhaltet Dateiinformationen im ASCII-Format, und der zweite Teil umfasst die eigentlichen Daten im binären Format. Für jedes Pixel eines *Frames* werden der Abstand (*range*), der Azimut- und Polarwinkel sowie die Intensität gespeichert. Darüber hinaus ist es möglich, pro *Frame* einen Zeitstempel (*timestamp*) aufzuzeichnen. Die Rohdaten werden über eine Exportfunktion unter 3D-RiSCAN in ASCII-Werten ausgegeben (RIEGL 2000).

4.2.4 Radiometrische Korrektur der AISA-Daten

Inhalt dieses Kapitels ist die Beschreibung der radiometrischen Korrektur der AISA-Rohdaten. Die Abbildung 4-4 zeigt die einzelnen radiometrischen Verarbeitungsschritte, die während der radiometrischen Korrektur durchlaufen werden. Nachfolgend erfolgt eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte (SUHR 2001).

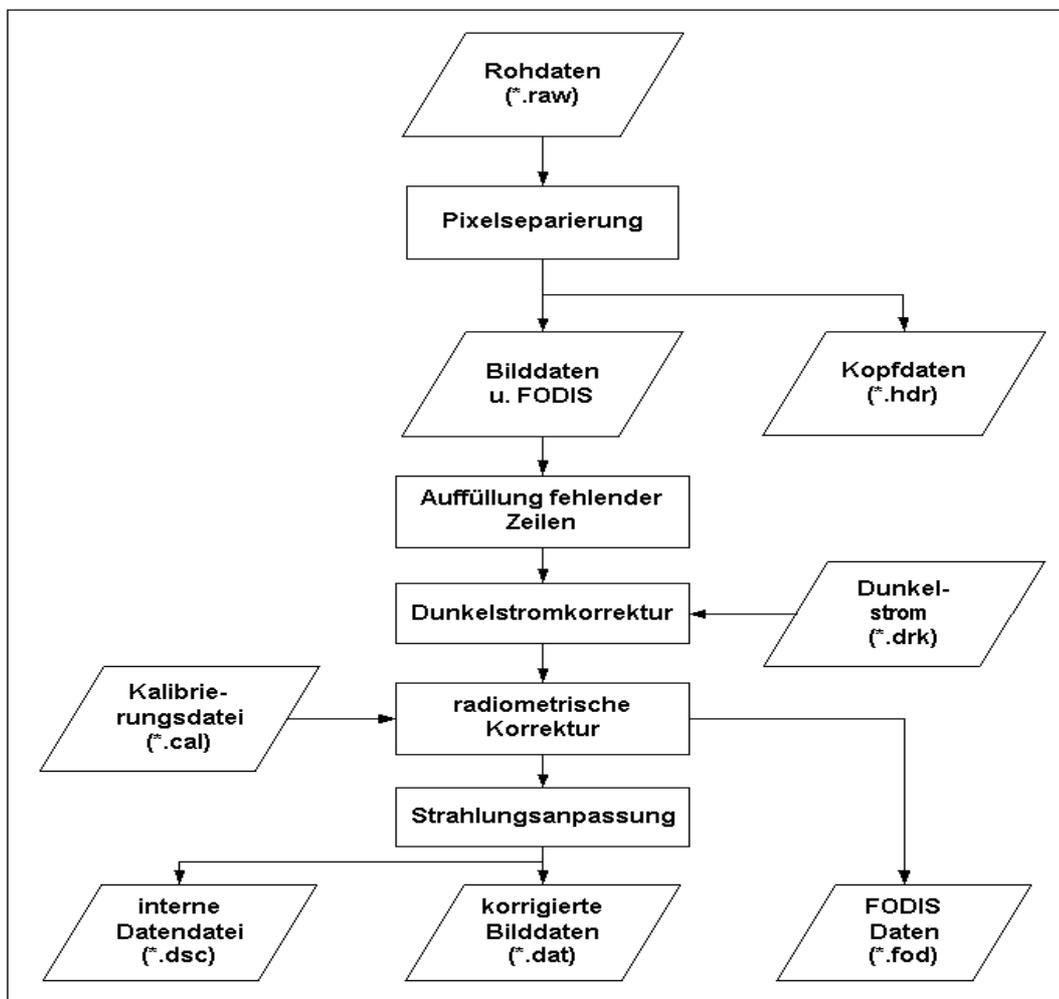


Abbildung 4-4: Radiometrische Datenaufbereitungsschritte (SUHR 2001).

4.2.4.1 Auffüllung fehlender Pixelwerte

Bei der Aufzeichnung der AISA-Daten kann es zu Fehlern kommen, die zu einem teilweisen oder kompletten Verlust von spektralen Daten führen können. Das Erkennen solcher Fehler ist wichtig, um dann fehlende oder fehlerhafte Linien aus der Verarbeitung auszuschließen oder mit Werten aus den benachbarten Linien zu ersetzen. Eine Identifikation solcher Fehler ist aufgrund verschiedener Merkmale möglich. Eine komplett fehlende Linie kann anhand der laufenden Identifikationsnummer jedes *Frame* erkannt werden. Einzelne fehlende Werte erkennt man beim Vergleich der vorgegebenen Größe eines *Frames* mit der tatsächlichen Datenblockgröße (SPECIM 1997b).

Fehlende Pixel oder Zeilen in der Bildszene sind auf jeden Fall aufzufüllen, da es ansonsten zu einer Verschiebung/Stauchung der Szene kommt. Selbst komplett fehlende Linien sollten in der Szene aufgefüllt werden, um eine spätere Verknüpfung der AISA-Daten mit den Laserdaten zu ermöglichen, da ansonsten falsche Koordinaten für die nachfolgenden Linien berechnet werden würden. Mit welchem Wert die fehlenden Pixel aufgefüllt werden sollten, stellt eine grundsätzliche Überlegung dar. Eine Möglichkeit ist, fehlende Pixel mit dem Wert 0 zu belegen. Es können aber auch andere Interpolationsverfahren angewandt werden, um die Fehlpixel mit Werten der Nachbarzellen aufzufüllen (STROBL 1999, SPECIM 2000). Bei der ersten Variante kann man eine solche Zeile im Image als dunkle Linie deutlich erkennen.

4.2.4.2 Radiometrische Kalibrierung

Hyperspektraldaten sind nicht nur „Bilder“, sondern können als physikalische Messungen betrachtet werden. Daher sollte bei der Auswertung von Hyperspektraldaten ein Schwerpunkt auf der radiometrischen Kalibrierung der Daten liegen (BACH 1995). Dieses ist insbesondere wichtig, damit quantitative Aussagen über die gewonnenen Fernerkundungsdaten getroffen werden können.

Dunkelstromkorrektur

Allgemein dient die Dunkelstromkorrektur zur Verbesserung der Bilddaten aufgrund von inhomogener Beleuchtung und Staubpartikeln. Die Dunkelstromkorrektur ist notwendig, weil nur in den seltensten Fällen eine gleichmäßige Objektbeleuchtung der beobachteten Szene vorliegt. Darüber hinaus können sich kleine Staubpartikel auf dem Glasfenster vor dem CCD-Sensor ansiedeln, die zu einer Verfälschung des Eingangswertes führen. Das Glas hat in der Regel einen gewissen Abstand zum Sensor, sodass auch kleinste Partikel unscharf auf die Sensorebene projiziert werden. Diese Partikel absorbieren Licht und verändern das Bild derart, dass sie bei einem homogenen Hintergrundbild deutlich zu erkennen sind.

Zusätzlich kann es zu Ungleichmäßigkeiten im Bild kommen, wenn die CCD-Sensoren keine gleichmäßige Sensitivität aufweist. Die beiden genannten Störungen stellen eine Beeinträchtigung der Bildqualität dar und können zu systematischen Fehlern bei weiteren Bildverarbeitungen führen. Zur Korrektur dieser Fehler benötigt man ein Referenz-

bild ohne absorbierendes Objekt. Die ungleichmäßige Beleuchtung kann durch eine Division mit dem Referenzbild korrigiert werden (JÄHNE 1997).

Im Bezug auf Hyperspektraldaten kommen Korrekturverfahren zum Tragen, bei denen man auf ein Referenzbild mit Dunkelstromdaten zurückgreift (STROBL 1999, ROTHFUSS 1994). Es werden vor, während oder nach der Aufnahme einer Szene mehrere Dunkelstromzeilen bei geschlossener Strahleneingangsöffnung (*closed shutter*) aufgezeichnet. Für den DAIS-7915 z. B. werden in der Regel vor jeder Szene ca. 200 Zeilen Dunkelstrom aufgezeichnet (STROBL 1999). Dieses kann als gesonderte Dunkelstrommessung (manuell) erfolgen oder mit den spektralen Daten zusammen (automatisch) aufgezeichnet werden. Wichtig bei den Dunkelstrommessungen ist, dass sie unter den gleichen Bedingungen (Linse, Parameter etc.) wie die Spektralmessungen aufgezeichnet werden, da ansonsten falsche Signalkorrekturen erfolgen können. Die eigentliche Korrektur der Rohdaten erfolgt durch Abzug des Signalwertes des Dunkelstroms vom Signalwert der Rohdaten (STROBL 1999).

Korrektur der Optik

Bei der Korrektur der Optik wird auf die Kalibrierungsdateien mit den Verstärkungsfaktoren (*gain*) zurückgegriffen. Die Faktoren haben die Einheit $W/cm^2 \cdot str \cdot nm$ je Zahlenwert (DN). Als zusätzliche Angabe benötigt man für die Berechnung des Strahlenwertes die Integrationszeit, da die Verstärkungsfaktoren auf die Integrationszeit normalisiert sind. So ist es möglich, die Korrekturdatei für jede Integrationszeit anzuwenden. Die Kalibrierung setzt auf die um die Dunkelstromdaten korrigierten Rohdaten (Gl. 4-1) auf und errechnet sich nach der Gleichung (4-2) wie folgt (SUHR 2001):

$$DN_{drkcor} = DN_{raw} - DN_{drk}$$

mit

$$DN_{drkcor} : \text{Dunkelstromkorrigierter Wert} \quad (4-1)$$

$$DN_{raw} : \text{Rohdatenwert}$$

$$DN_{drk} : \text{Dunkelstromwert}$$

$$DN_{radcor} = DN_{drkcor} \cdot gain / itime / BW_{raw}$$

mit

$$DN_{radcor} : \text{kalibrierter spektraler Wert}$$

$$DN_{drkcor} : \text{Dunkelstromkorrigierter Wert} \quad (4-2)$$

$$gain : \text{Verstärkungsfaktor des jeweiligen Pixels}$$

$$itime : \text{Integrationszeit in ms}$$

$$BW_{raw} : \text{Bandbreite des spektralen Kanals, bezogen auf die Anzahl der Reihen}$$

Nach der Kalibrierung (DN_{radcor}) liegen die Daten in Einheiten der Strahldichte [$W/cm^2 \cdot str \cdot nm$] vor. Möchte man den Strahlenwert in $W/cm^2 \cdot str$ haben, so muss man mit dem spektralen *Sampling* der jeweiligen Reihe multiplizieren. Dieser *Sample*-Wert

liegt zwischen 1,6 und 1,8 nm und hängt von der Position der Reihe im jeweiligen Wellenlängenbereich ab (SPECIM 2000).

Berücksichtigung der FODIS-Daten

Wenn die kalibrierten Strahlungswerte aus Gleichung 4-2 als FODIS-Ratio umgerechnet werden sollen, benötigt man die gemittelten FODIS-Werte. Da eine derartige Messsonde in anderen hyperspektralen Fernerkundungssystemen nicht eingesetzt wird, handelt es sich hier um eine AISA spezifische Umrechnung (SUHR 2001). Die Gleichung (4-3) sieht dann wie folgt aus (SPECIM 2000a):

$$DN_{\text{fodis}} = \frac{DN_{\text{radcor}}}{\text{fodis}} \quad (4-3)$$

mit

DN_{fodis} : UmFODIS korrigierter digitaler Wert (DN)
 fodis : FODIS - Wert pro Band und Frame

Umrechnungen in skalierte Strahlungswerte

Da die kalibrierten Werte üblicherweise digital weiterverarbeitet werden, greift man hier oftmals auf Integer-Werte zurück. Ein Integer-Wert ist ein 16-Bit-Feld, das ganze Zahlen mit Vorzeichen speichern kann. Der Wertebereich eines solchen Feldes reicht von -32768 bis +32768. Um diesen Bereich voll ausschöpfen zu können, ist es sinnvoll die kalibrierten Werte für diesen Feldtyp umzurechnen. Grundlage für die Umrechnung (4-4) kann der kalibrierte Wert (DN_{radcor}), aber auch der FODIS angepasste Wert (DN_{fodis}) sein (SUHR 2001).

$$DN_{\text{scal}} = \frac{32768 * DN_{\text{radcor}}}{\text{Max}_{\text{rad}}} \quad (4-4)$$

mit

DN_{scal} : angepasster Strahlungswert
 DN_{radcor} : kalibrierter digitaler Wert
 Max_{rad} : gewünschter maximaler Strahlungswert

Üblicherweise verwendet man einen Skalierfaktor von 1000. Dies entspricht im Bereich der stärksten Sonneneinstrahlung bei 0,5 μm bei idealen Beobachtungsbedingungen einem Bodenreflexionsgrad von über 60 % (STROBL 1999). Wird der maximale Wert zum Beispiel auf 32,768 gesetzt, so entspricht die Berechnung einem Skalierfaktor von 1000.

4.2.5 Geometrische Korrekturverfahren

Die Besonderheit des hier zum Einsatz kommenden krängestützten Vermessungssystems besteht in der gleichzeitigen Aufnahme von zwei unterschiedlichen Datensätzen, die unterschiedlichen Aufnahmegeometrien unterliegen. Ziel der geometrischen Korrektur ist es daher

- < die aufnahmebedingten Verzerrungseffekte des AISA-Datensatzes mithilfe von Lageinformationen aus dem Laserdatensatz zu korrigieren,
- < beiden Datensätzen eine gemeinsame räumliche Bezugsebene zu geben, um eine kombinierte Datenauswertung durchführen zu können,
- < beide Datensätze mittels *Ground Control Points* (GCPs) in ein geodätisches Koordinatensystem zu transformieren, um eine Integration der Daten in einem Geographischen Informationssystem vornehmen zu können.

4.2.5.1 Aufnahmetechnik

Im Gegensatz zu photographischen Aufnahmen werden Scannerbilder fortlaufend zeilenweise aufgenommen. Auf die Geometrie hat dieses einen entscheidenden Einfluss, da jede Bildzeile sich auf einen anderen Ort und eine andere räumliche Position des Sensors bezieht. Im Wesentlichen sind es drei Einflussfaktoren, die sich auf die Abbildungsgeometrie auswirken. Zu nennen sind die Aufnahmetechnik, die Bewegung des Sensorträgers und die Oberflächenform des aufgezeichneten Geländes.

Der Laserscanner ist von der Technik her mit einem opto-mechanischen Scanner zu vergleichen, da auch beim Laserscanner die Winkelinkremente gleich groß sind (Abbildung 4-5). Die einzelnen aufgezeichneten Bodenpixel sind jedoch unterschiedlich.

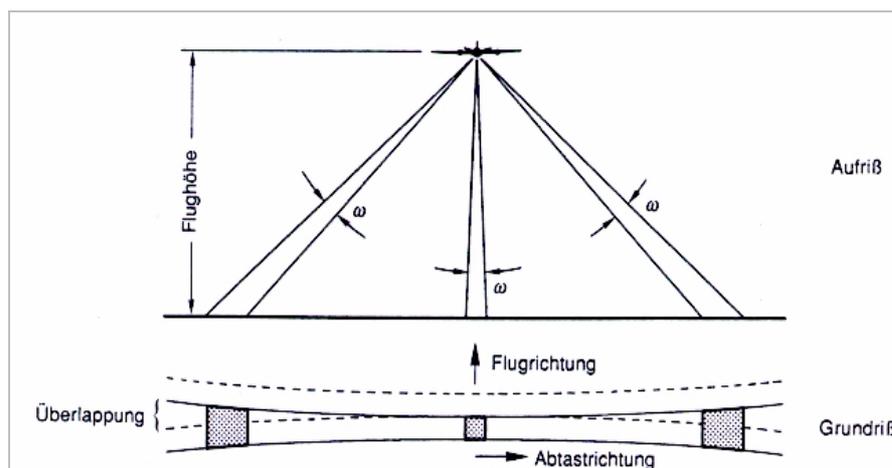


Abbildung 4-5: Abbildungsgeometrie bei opto-mechanischen Scannern (ALBERTZ 1991).

Im Gegensatz zu dieser Abbildungsgeometrie sind bei einem opto-elektronischen Scanner, wie dem AISA-Scanner, die Bodenpixel gleichgroß (Abbildung 4-6) und Winkelinkremente unterschiedlich.

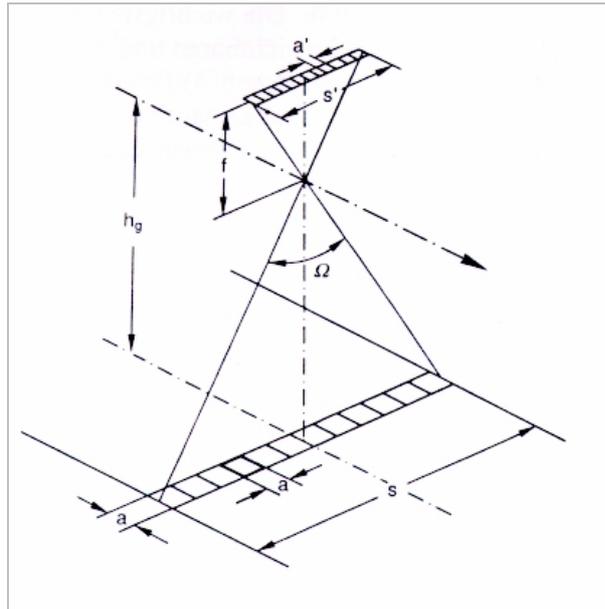


Abbildung 4-6: Abbildungsgeometrie bei opto-elektronischen Scannern (ALBERTZ 1991).

Panoramaeffekt

Beim Abtastverfahren von opto-mechanischen Scannern kommt es zu charakteristischen Verzerrungen der Bilder (Abbildung 4-7). Sie entstehen dadurch, dass der Abstand zum Boden im Nadir kleiner ist und zum Rand hin zunimmt. Somit wachsen auch die beobachteten Flächenelemente und deren Zwischenabstände. Würde man eine mit konstanter Winkelgeschwindigkeit aufgezeichnete Datenszene in gleichen Streckeninkrementen wiedergeben, so könnte man eine zunehmende Stauchung der Szene vom Nadir zum Bildrand hin erkennen. Diese Erscheinung wird auch Panoramaverzerrung genannt (ALBERTZ 1991).

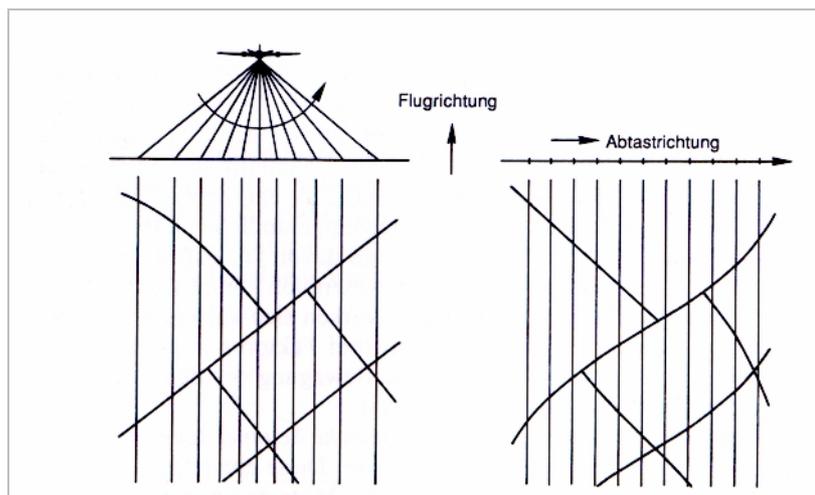


Abbildung 4-7: Entstehung von Panoramaverzerrungen (ALBERTZ 1991). Links: Die Abtastung erfolgt mit gleichen Winkelinkrementen. Der untere Teil gibt die abgetasteten Geländeelemente mit deren unterschiedlichen Pixelbreiten wieder. Rechts: Darstellung des Panoramaeffekts mit gleichen Streckenabschnitten.

Störungen durch Bewegung des Sensorträgers

Neben der Abbildungsgeometrie tragen auch räumliche Bewegungen des Sensorträgers bei der Entstehung von Verzerrungen bei. Hierfür können unterschiedliche Mechanismen verantwortlich sein. Nachfolgend werden diese kurz beschrieben und mögliche Ansätze zur Problemlösung genannt (ROTHFUSS 1994, ALBERTZ 1991).

- < Projektive Verzerrungen:
Aufgrund von unvermeidbaren Plattformschwankungen während des Abtastvorganges kann es zu Lageänderungen benachbarter Scanlinien kommen. Diese Schwankungen können als Winkeländerungen um die drei Flugzeugachsen Gier-, Nick- und Rollwinkel von einer INS erfasst werden. Werden die Winkeländerungen erfasst, ist eine Korrektur der Daten möglich.
- < *Over- bzw. Undersampling.*
Bei einer nicht idealen Abstimmung der Fluggeschwindigkeit, Flughöhe und Abtastfrequenz kann es in Flugrichtung zu Lücken zwischen Scanzeilen (*undersampling*) bzw. zu Überlappungen von Daten (*oversampling*) kommen. Durch eine möglichst genaue Abstimmung zwischen Fluggeschwindigkeit, -höhe und Abtastfrequenz können die Effekte vermieden werden. Eine teilweise Überlappung von bis zu 25 % sollte jedoch angestrebt werden (ROTHFUSS 1994).
- < Drifteffekte:
Kursabweichungen aufgrund von translatorischen Verschiebungen der Scannerplattform bzw. des Flugzeuges z. B. durch Scherwind führen zu Verschiebungen von benachbarten Zeilen. Diese Verschiebungen können dann ermittelt werden, wenn die Position der Plattform über GPS ermittelt wird. Problematisch bleiben jedoch die Ränder einer Szene, da durch die Verschiebung unterschiedliche Streifen gescannt werden.

Die Abbildung 4-8 zeigt die oben beschriebenen verschiedenen Verzerrungseffekte.

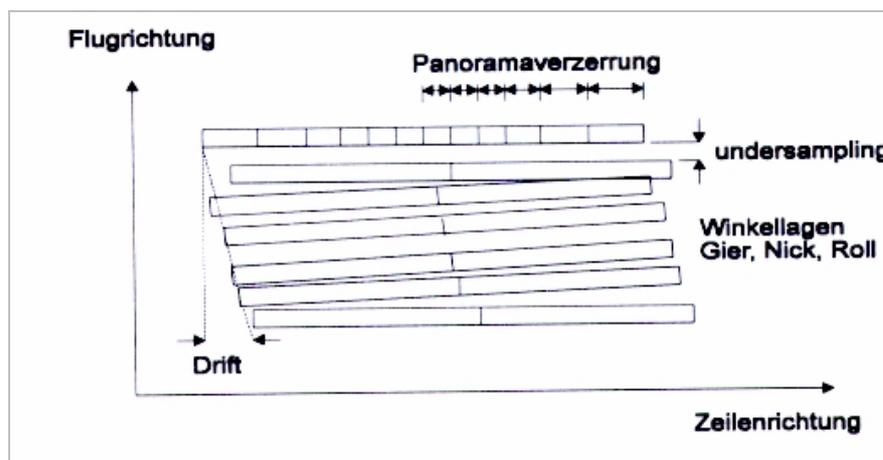


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der verschiedenen Verzerrungen (ROTHFUSS 1994).

Oberflächenform

Auch die Oberfläche eines Geländes spielt bei der Entzerrung eines Bildes eine Rolle, denn genau genommen ist eine Entzerrung nur dann möglich, wenn die Oberflächenform bekannt ist. Die Auswirkungen der Nichtberücksichtigung der Oberflächenform auf die Qualität der Entzerrung hängen naturgemäß im starken Maße von der Geländemorphologie ab. Steht kein Oberflächenmodell zur Verfügung, muss die Entzerrung der Bilder mit Näherungslösungen erfolgen (ALBERTZ 1991).

4.2.5.2 Verzerrungseffekte

Für die in dieser Arbeit verwendeten Fernerkundungsdaten treten einige der oben beschriebenen Effekte auf, die korrigiert werden müssen.

Panoramaeffekt

Bei opto-elektronischen Scannern, zu denen AISA gehört, treten genau genommen keine Panoramaeffekte auf. Aufgrund der Verbindung des AISA-Scanners mit dem Laserscanner und der Nutzung des Schwenkmechanismus kommt es jedoch zu einem vergleichbaren Effekt, und zwar in „Längs- oder Flugrichtung“.

Der Laserscanner schwenkt in Längsrichtung nach beiden Seiten mit 75 Grad, wobei die einzelnen Winkelinkremente gleich groß sind. Dieses Verfahren ist somit mit der Technik eines opto-mechanischen Scanners vergleichbar und führt dadurch auch zu Panoramaverzerrungen.

Änderungen der Plattformposition

Auch wenn sich die Position des Sensorträgers während einer Messung nicht erheblich verändert, kann es durch den Einfluss von Windböen zu kleinen Drifteffekten kommen. Außerdem ist eine exakte waagerechte Ausrichtung des Sensorikträgers zum Boden nicht möglich. Somit kommt es bei einer geneigten Aufnahmeplattform zu projektiven Verzerrungen.

Oberflächenform

Insbesondere die Oberflächenform spielt aufgrund der niedrigen Höhe (bis 30 m) eine besondere Rolle. Da jedoch mithilfe der Laserscannerdaten ein hochgenaues Geländemodell parallel zu den AISA-Daten zur Verfügung steht, fließen die Laserinformationen in die Errechnung der x -, y - und z -Koordinaten für den AISA-Scanner direkt ein.

Lageoffsets

Eine absolut exakte Ausrichtung beider Scanner auf der waagerechten Achse ist aus technischen Gründen nicht möglich (Abbildung 4-9), daher müssen bei der späteren geometrischen Datenkorrektur so genannten Lageoffsets rechnerisch ermittelt werden.

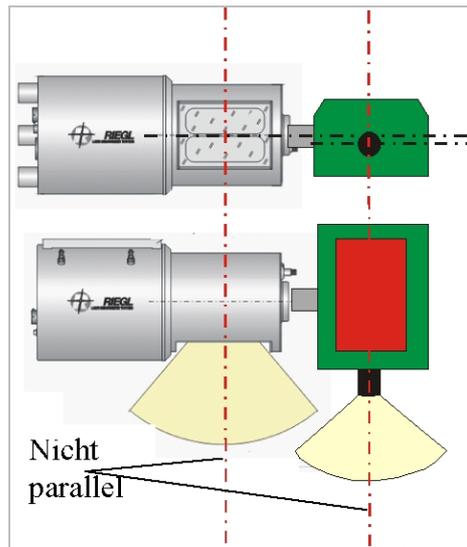


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung der Lageoffsets.

4.2.5.3 Lösungsansätze

In dieser Arbeit soll auf die einzelnen programmtechnischen Schritte zur kombinierten Entzerrung von AISA- und Laserscannerdaten nicht im Detail eingegangen werden. Im Rahmen von verschiedenen technischen Forschungsarbeiten bei der airobotics GmbH (z. B. SUHR 2001) wurden Methoden und Algorithmen entwickelt, die ein kombiniertes Entzerrungsverfahren anhand der Lage- und Winkelmesswerten des Laserscanners sowie der genauen Kenntnis der Position von Messmarken ermöglichen. Voraussetzung für ein gutes Entzerrungsergebnis ist das Vorhandensein von:

- < eindeutig identifizierbaren Merkmalen in beiden Datensätzen, sodass eine Zuweisung dieser Messpunkte in Laser- und AISA-Bild stattfinden kann,
- < diese Merkmale über die gesamte Szene gut verteilt sind,
- < für eine anschließende Transformation der entzerrten Bilder in ein geographisches Koordinatensystem die Lage (x, y, z) von *Ground Control Points* (GCPs) hochgenau bestimmt werden.

Abbildung 4-10 zeigt den Ablauf des geometrischen Korrekturverfahrens. Links sind die verzerrten AISA- und Laserscanner-Rohdaten zu sehen, wo es aufgrund der Schwenkung bzw. Drehung des Scanners während der Datenaufzeichnung zu einer Stauchung des Bildes zu den Bildrändern hin kommt. Dieser Effekt wird in der geometrischen Korrektur behoben werden (Mitte). Anschließend werden die entzerrten Daten mittels am Boden vermessenen GCPs georeferenziert (rechts).

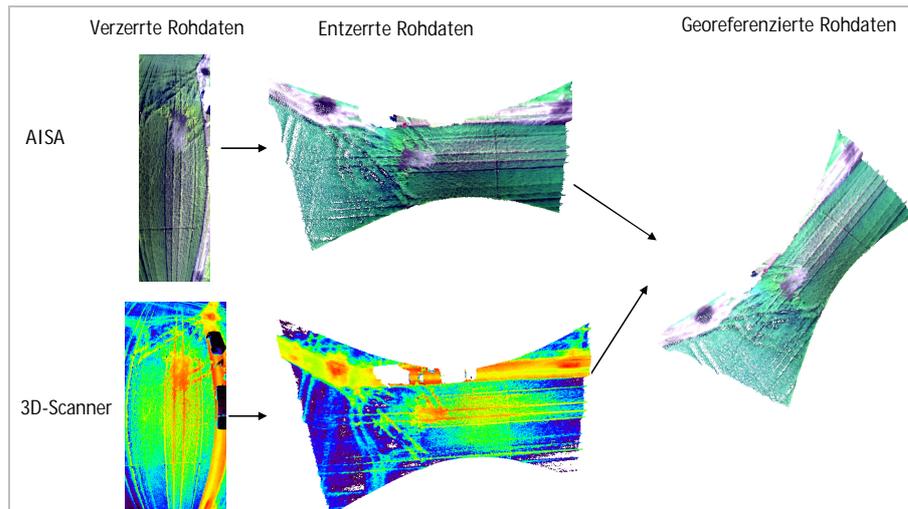


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des Ablaufs des geometrischen Korrekturverfahrens.

4.2.6 Missionsplanung

Die Planung einer Mission stellt einen wichtigen Bestandteil der gesamten Messkampagne dar, um einen reibungslosen und effizienten Verlauf der Mission zu garantieren. Die Missionsplanung und das damit einhergehende *Ground Truthing* sollen an dieser Stelle nicht im Detail dargestellt werden, weil sie einen eigenen Forschungsschwerpunkt am Institut für Geographie der Universität darstellt. Es sollen die wesentlichen Arbeitsschritte bei der Vorbereitung einer Mission daher nur kurz erwähnt werden.

- < Besichtigung:
Eine Besichtigung des zu vermessenden Geländes ist notwendig, um vorab zu ermitteln, welche Verhältnisse vor Ort vorliegen, z. B. wie die Zuwegung beschaffen ist oder wo bzw. ob Messpunkte für das Aufstellen der GPS-Referenzstation vorliegen. Wenn eine Besichtigung nicht möglich ist, kann auch auf möglichst aktuelle Luftbilder zurückgegriffen werden, um einen Eindruck von der Situation vor Ort zu erhalten.
- < Aufnahmedesign:
Bei der Gestaltung des Aufnahmedesigns wird festgelegt, wo der Kran positioniert werden muss, um die Gesamtfläche am effektivsten zu vermessen. Des Weiteren wird auch festgelegt, wie die Scannereinstellungen (z. B. Scan-Winkel, Scan-Rate etc.) programmiert werden sollten, um ein optimales Verhältnis zwischen Abdeckung und Auflösung zu erreichen.
- < *Ground Truthing*.
Die Planung eines effizienten, bedarfsgerechten *Ground Truthing* ist bei der Durchführung von Fernerkundungsmissionen von zentraler Bedeutung, weil in einem engen Zeitfenster so viele Informationen vom Untersuchungsgebiet wie möglich gesammelt werden müssen, die bei der späteren Auswertung benötigt werden. Die Bedeutung des *Ground Truthing* wird deswegen in Kapitel 4.3.5 in einem eigenen Abschnitt detailliert beschrieben.

4.2.7 Untersuchungsgebiet Heitzhausen

Das Untersuchungsgebiet liegt südöstlich von Wildeshausen. Auf einer landwirtschaftlich genutzten Testfläche von 50 m x 100 m wurden unterschiedliche Kompostvarianten und -mengen mit dem Ziel aufgebracht, die Bodeneigenschaften zu verbessern und die Ernteerträge zu steigern.

Um das Potenzial des hier entwickelten multisensoriellen Erdbeobachtungssystems entsprechend abschätzen zu können, werden Testflächen benötigt, in denen kleinräumige Unterschiede vorliegen, deren Ausprägungen bestens bekannt sein müssen. Aus diesem Grunde wurden die Versuchsflächen sowie die Geodaten aus dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsvorhabens bereitgestellt (Titel: „Studien zum Komposteinsatz zur Vermeidung des Boden- und Nährstoffabtrages durch Winderosion sowie zur Beeinflussung der Bodentemperaturen im Hinblick auf Optimierung der pflanzlichen Jugendentwicklung und Ertragssicherung bei Mais auf ausgewählten Agrarstandorten im Raum Wildeshausen“; Kurztitel: „Studien zum Komposteinsatz“) (HARTMANN 2003).

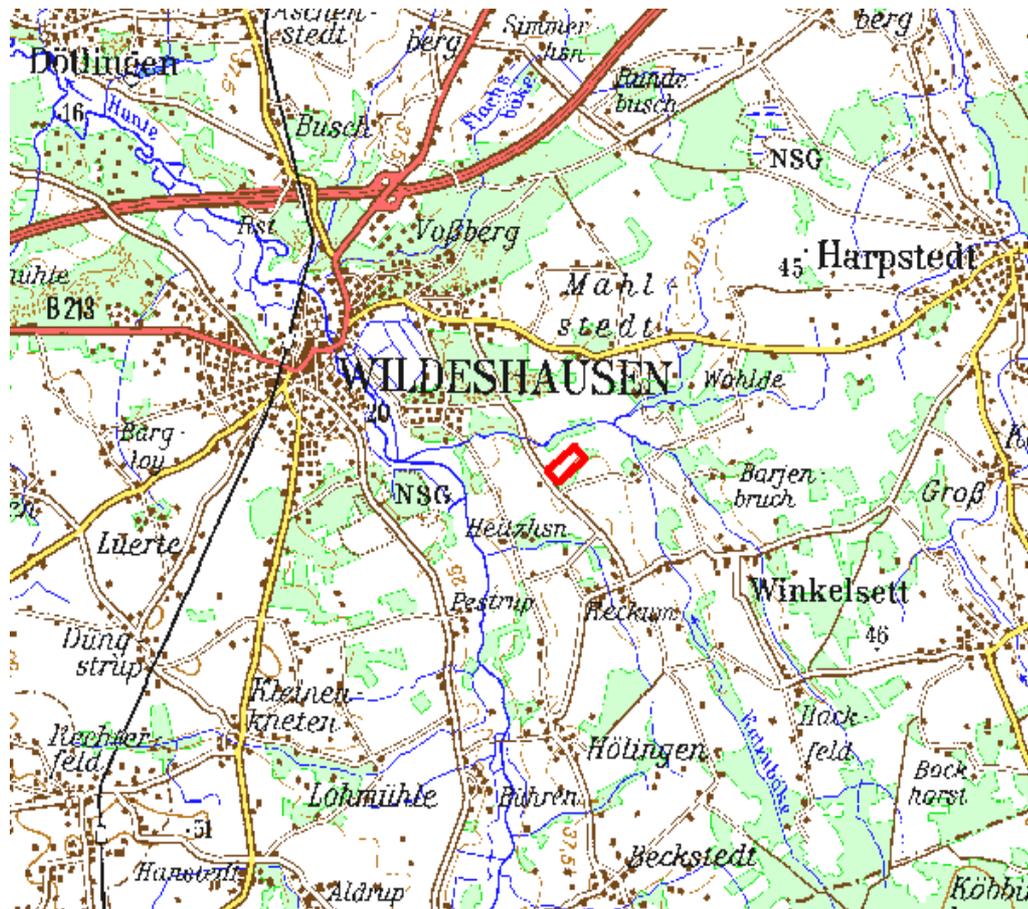


Abbildung 4-11: Lage des Untersuchungsgebietes Heitzhausen.

Es handelt sich hierbei um morphologisch und pedologisch unterschiedliche Kompostversuchsflächen südlich von Wildeshausen (Abbildung 4-11), die ein hohes Gefährdungspotenzial bezüglich der Winderosion und der Wasserhaltefähigkeit sowie der Verschlammung aufweisen. Die Versuchsflächen sind in jeweils 48 Versuchspartzellen zu je

100 m² differenziert. Dadurch liegt eine extrem kleinräumige Variation der Anbaufläche vor, die nur mit einem hochauflösenden System messbar ist. Außerdem sind für jede einzelne Parzelle *Ground-Truth*-Daten (detailliertes Boden- und Klimamonitoring sowie Untersuchungen zum Pflanzenwachstum und den Pflanzenerträgen) verfügbar (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Übersicht der im Rahmen des Kompostprojektes erhobenen Boden-, Pflanzen- und Klimaparameter (HARTMANN 2003).

Bodenparameter	Pflanzenparameter	Klimaparameter
Bodenart	Pflanzenart	Windrichtung
Wasserhaltefähigkeit	Bestandsstruktur	Windgeschwindigkeit
Porenvolumen	Nährstoffversorgung	Lufttemperatur
Korngrößenverteilung	Ernteerträge	Luftfeuchte
Saugspannung	Erntequalität (Hektoliter/ha)	Strahlungsbilanz
Organische Substanz		Niederschlag
Nutzbare Feldkapazität		
Aggregatstabilität		
Bodentemperatur		
Nährstoffspeicherfähigkeit		
pH-Wert		
Nährstoffversorgung		
Schwermetalle		

Diese Daten stehen nach der Digitalisierung und Integration ins GIS als Geodaten für den Flugdatenauswerteprozess zur Verfügung. Um die Fernerkundungsdaten zu entzerren und zu georeferenzieren, ist es notwendig, mittels GPS eingemessene Messmarken (*ground control points*) anzubringen, die bei der anschließenden Auswertung eindeutig identifiziert werden können (Abbildung 4-12). Eine Weiterverarbeitung der georeferenzierten und klassifizierten Fernerkundungsdaten erfolgt dann im GIS, da erst im Kontext mit weiteren Geodaten vom Untersuchungsgebiet eine Interpretation möglich ist.

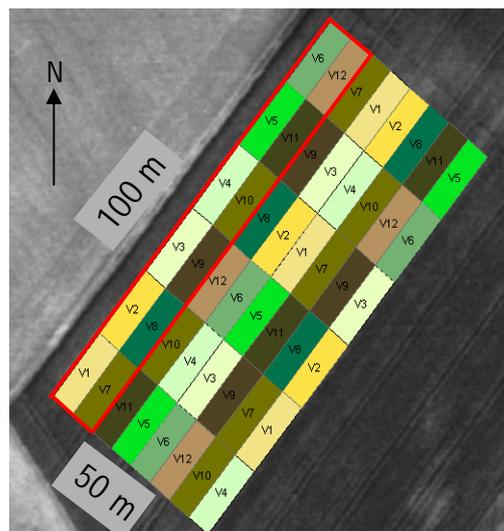


Abbildung 4-12: Anordnung der Parzellen unterteilt nach aufgetragenen Kompostvarianten. Rot umrandet sind die Parzellen, die während der krangestützten Messkampagne fernerkundlich erfasst wurden.

4.2.8 Messkampagne

Die Termine der Messkampagnen (Abbildung 4-13) wurden zu typischen phänologischen Entwicklungsstadien von Winterroggen gelegt (03.05. beginnende Jugendphase, 22.05. Reifephase, 26.07. Abschlussphase), um so die Vegetationsentwicklung zu dokumentieren.

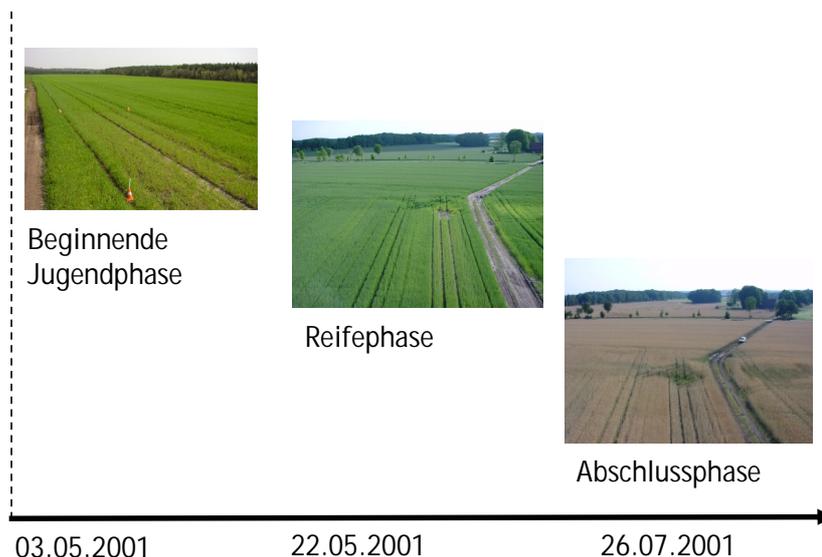


Abbildung 4-13: Termine der Messkampagne.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits ausführlich beschrieben, kommt ein krangestütztes, multisensorielles System, bestehend aus einem Hyperspektralscanner und einem Laserscanner zum Einsatz. Der Kran wird auf dem angrenzenden Feldweg so positioniert, dass mit einem Scanvorgang zwei nebeneinander liegende Parzellen in der Nadir-Achse erfasst werden (Abbildung 4-14). Für die weiterführenden Analysen wird nur der zentrale Bereich des Scans verwendet, um zu vermeiden, dass die zu den Rändern hin zunehmende Verschlechterung des Bildes die Auswertung negativ beeinflusst.

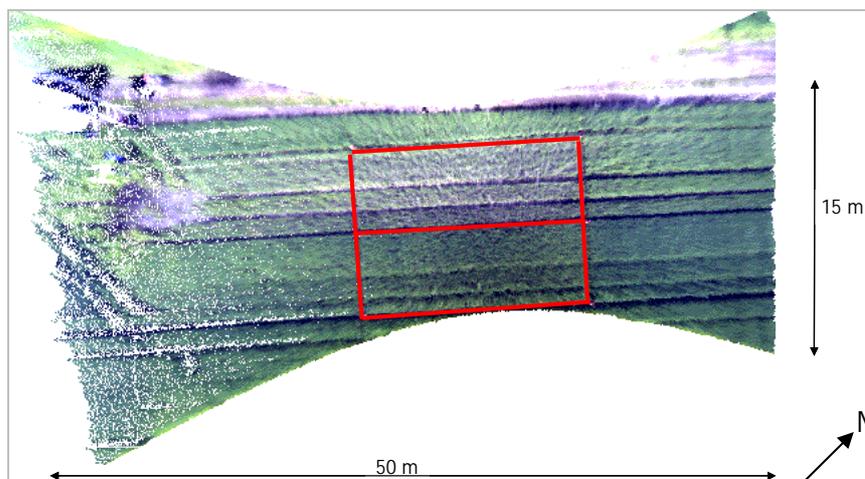


Abbildung 4-14: Räumliche Abdeckung eines Scanvorganges. Rot umrandet sind die zwei nebeneinander liegenden Parzellen.

Nach jedem Scan wird der Kran zur nächsten Parzelle gefahren, sodass sich am Ende der Messung ein Streifen der aneinander liegenden Parzellen bilden lässt. Da die Eckkoordinaten jeder Parzelle bekannt sind, kann jede Parzelle einzeln „ausgeschnitten“ werden. Anschließend können sie als Gesamtmosaik wieder zusammengefügt werden (Abbildung 4-15).

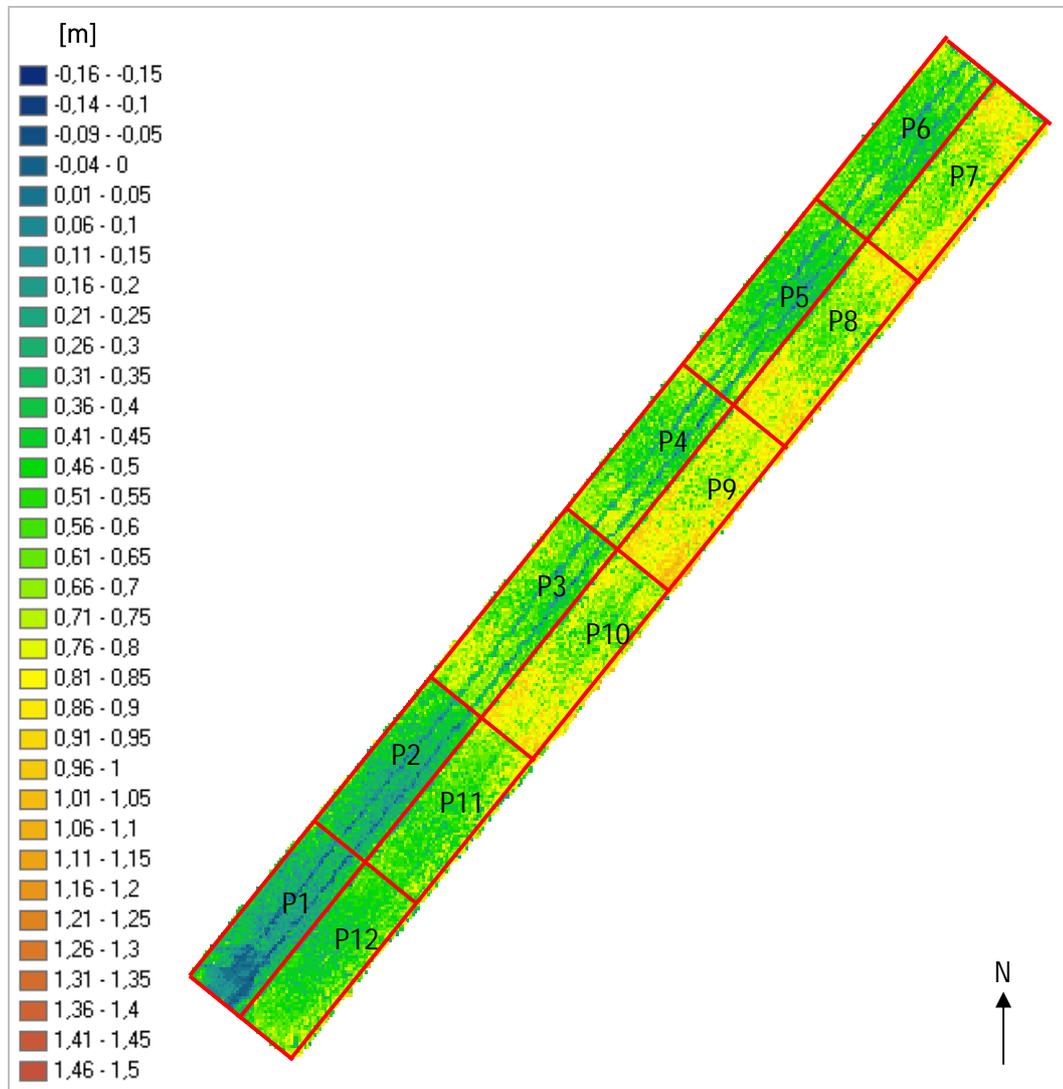


Abbildung 4-15: Aus 12 Parzellen bestehendes Gesamtmosaik der mithilfe des Laserscanners ermittelten Wuchshöhe vom 26. 7. 2001.

Durch die „Parzellierung“ der Daten können hinsichtlich der im Rahmen dieser Arbeit gestellten Frage nach der Eignung der multisensoriellen erdnahen Erdbeobachtung für die hochgenaue Kartierung zwei zentrale, interessante Betrachtungsebenen genauer untersucht werden:

- < Auf der inter-parzellaren Ebene wird aus allen Pixeln der Parzelle ein Mittelwert für die gesamte Parzelle berechnet (z.B. Wuchshöhe [Kapitel 4.2.9.2], Vitalität [Kapitel 4.2.9.3]) und mit den ebenfalls nur auf Parzellenebene vorliegenden Geodaten in Beziehung gesetzt.

- < Auf der intra-parzellaren Ebene wird jede einzelne Parzelle auf Pixelebene betrachtet mit dem Ziel, die hohe Detailschärfe für Plausibilitätsprüfungen zu nutzen.

In den beiden folgenden Kapiteln sollen diese beiden Betrachtungsebenen beispielhaft erläutert werden.

4.2.9 Inter-parzellare Ebene

Ziel der inter-parzellaren Analyse ist es zu ermitteln, ob die Auswirkungen der unterschiedlichen Kompostanwendungen pro Parzelle mit Parametern wie Wuchshöhe oder Vitalität fernerkundlich erfasst werden können, welche Sensorik hierfür geeignet ist, und ob schon zu einem frühen Zeitpunkt der Ernteertrag prognostiziert werden kann.

4.2.9.1 Geodatenbasis

Als Geodatenbasis liegen für jede Parzelle detaillierte Informationen vor (siehe Kap. 4.2.7). Für die nachfolgenden Analysen wurden die Parameter „Kompostvariante“ und „Ernteertrag“ (Abbildung 4-16) (HARTMANN 2003) gewählt:

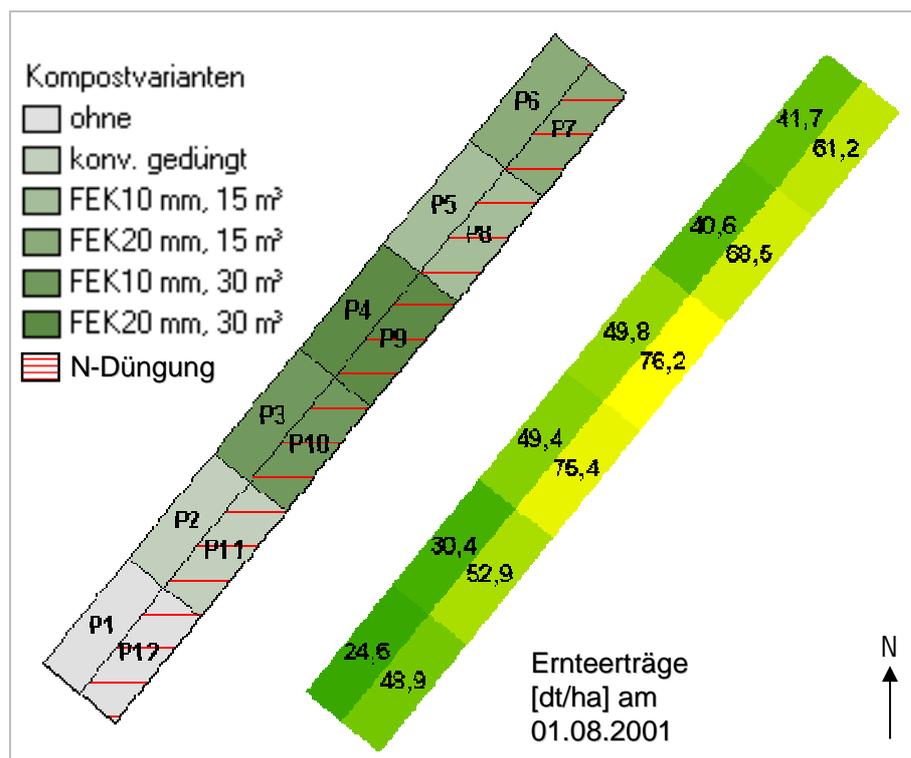


Abbildung 4-16: Die beiden Parameter „Kompostvarianten“ und „Ernteerträge“ als Geodatenbasis für die weiteren Untersuchungen (FEK= Fertigkompost).

4.2.9.2 Höhenmodell

Um die Wuchshöhe zu erfassen, wurde auf Basis der Laserscannerdaten an allen drei Messtagen ein hochgenaues Höhenmodell erstellt (Abbildung 4-17). In der Abbildung

wird die Wuchshöhe von Winterroggen an drei Messtagen (03.05, 22.05 und 26.07) und auf 12 Parzellen (P1 bis P12) dargestellt. Als Referenz stehen ganz rechts die labor-technisch ermittelten Erträge in dt/ha der am 01.08 stattgefundenen Ernte. Die Farbkodierung der Wuchshöhe reicht von blau (-0,16 m) bis rot (1,5 m), wobei es auch zu negativen Werten kommen kann (z. B. Fahrspuren). Die Farbkodierung der Ernteerträge wurde so gewählt, dass eine Korrespondenz zwischen der Ertragsmenge und der Wuchshöhe optisch hergestellt wird. Der Erdboden stellt die Bezugsebene 0 m dar. Die Pixelgröße beträgt 5 cm, die Höhengenaugkeit liegt bei $\pm 2,5$ cm.

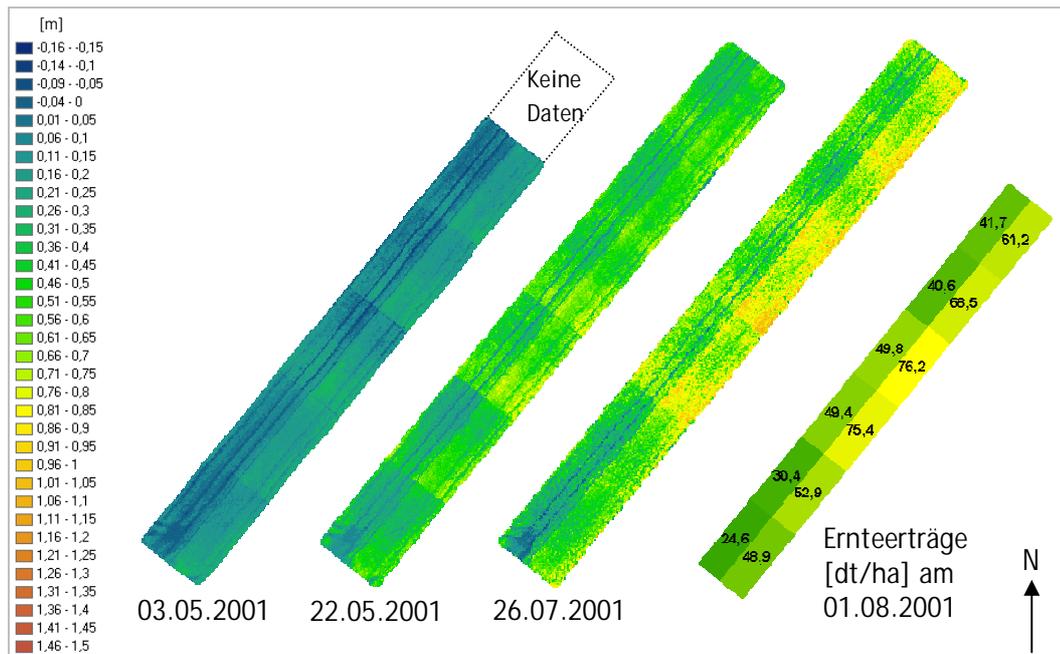


Abbildung 4-17: Farbkodierte Darstellung der Wuchshöhe auf den zwölf Parzellen P1-P12 an den drei Messtagen sowie der Ernteerträge am 01.08.2001.

Bei näherer Betrachtung der Abbildung 4-17 wird auffällig, dass die Wuchshöhe erwartungsgemäß im Laufe der Vegetationsperiode stetig zunimmt. Viel interessanter jedoch ist der Umstand, dass sich die einzelnen, unterschiedlich bewirtschafteten Parzellen in ihrer Ausprägung im Höhenbild „durchpausen“. Aufgrund der hohen Detailschärfe können feinste Wuchshöhenunterschiede ermittelt werden. Es lässt sich dadurch bestätigen, dass z. B. die Parzellen mit der höchsten Wuchshöhe auch die höchsten Ernteerträge hervorbringen, und umgekehrt, auf den weniger oder nicht gedüngten Flächen die Wuchshöhe im Laufe der Vegetationsperiode deutlich unterdurchschnittlich bleibt.

Das führt zu der Frage, ob und zu welchem Zeitpunkt eine Ernteprognose alleine aufgrund der Wuchshöhe angestellt werden kann? Hierfür wurde die mittlere Wuchshöhe pro Parzelle an den drei Messtagen mit den Ernteerträgen in Beziehung gesetzt (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Auflistung der Parzellen mit den eingebrachten Kompostvarianten, der mittleren Wuchshöhe an den jeweiligen Messtagen sowie den Ernteerträgen (FEK: Fertigkompost).

Parzelle	Kompostvariante	Mittlere Wuchshöhe [m]			Ernteerträge [dt/ha]
		03.05	22.05	26.07	
P1	ohne	0,03	0,13	0,24	24,6
P2	konv. gedüngt	0,07	0,21	0,37	30,4
P3	FEK 10 mm, 30 m ³	0,1	0,33	0,57	49,4
P4	FEK 20 mm, 30 m ³	0,06	0,35	0,55	49,8
P5	FEK 10 mm, 15 m ³	0,04	0,25	0,49	40,6
P6	FEK 20 mm, 15 m ³	-	0,29	0,51	41,7
P7	FEK 20 mm, 15 m ³ + N	-	0,51	0,74	61,2
P8	FEK 10 mm, 15 m ³ + N	0,17	0,49	0,73	68,5
P9	FEK 20 mm, 30 m ³ + N	0,18	0,55	0,8	76,2
P10	FEK 10 mm, 30 m ³ + N	0,17	0,57	0,83	75,4
P11	konv. gedüngt + N	0,18	0,44	0,65	52,9
P12	ohne + N	0,17	0,34	0,59	48,9

In der Tabelle 4-2 sind die Parzellen eingetragen, die eingebrachten Kompostvarianten (HARTMANN 2003), die Wuchshöhe an den jeweiligen Messtagen sowie die gemessenen Ernteerträge ca. eine Woche nach der letzten Vermessung. Für den 03.05. gibt es aus technischen Gründen keine Wuchshöhenangaben für die Parzellen P6 und P7.

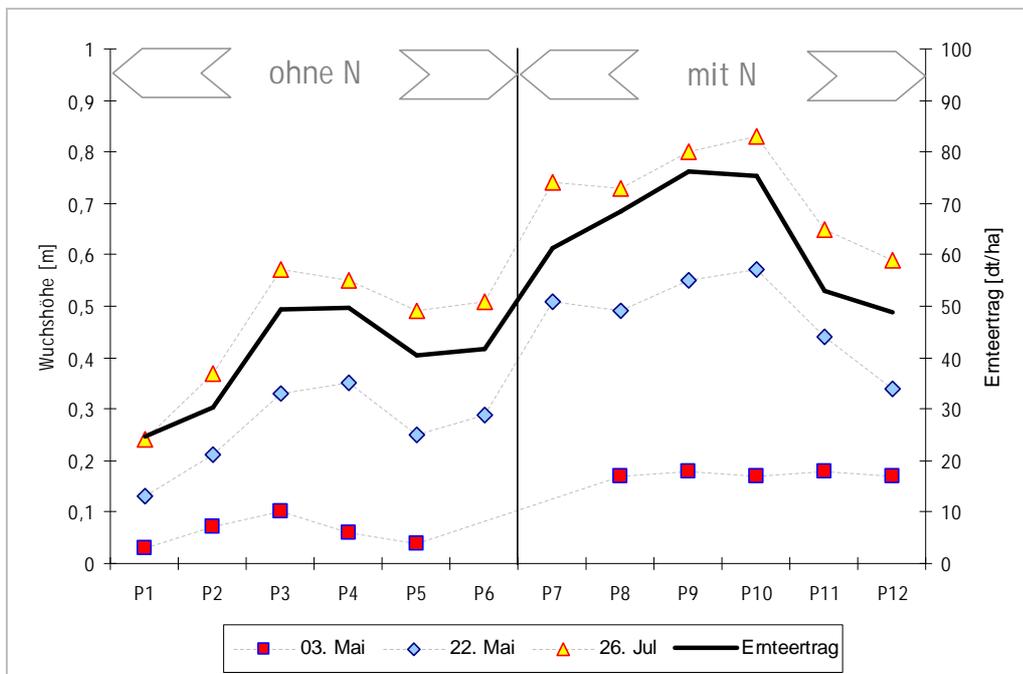


Abbildung 4-18: Graphische Darstellung der Wuchshöhe am 03.05, 22.05 und 26.07 sowie des Ernteertrages am 01.08.

Bei der graphischen Darstellung der Daten (Abbildung 4-18), werden verschiedene Phänomene augenfällig, die in der farbkodierten Darstellung (Abbildung 4-17) nicht offensichtlich sind. Zunächst ist auffällig, dass die zusätzliche Düngung mit Stickstoff eine Erhöhung des Ernteertrages mit sich bringt (P7 bis P12), und dass diese Tendenz schon zur beginnenden Jugendphase (03.05.) anhand der Wuchshöhe feststellbar ist. Des Weiteren kann erkannt werden, dass die Anwendung von Kompost zu einer deutlichen Steigerung des Ertrages führt, unabhängig davon, ob Stickstoff zugefügt wird. Bezüglich der oben gestellten Frage, ob und wann mithilfe der per Laserscanner erfassten Wuchshöhe eine Ernteprognose erfolgen kann, wird klar ersichtlich, dass

- < bereits in der Reifephase (Messung vom 22.05.) eine hohe Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Ernteertrag vorliegt,
- < die Wuchshöhenunterschiede im Subdezimeter-Bereich liegen und daher nur von einem Messsystem mit der entsprechenden Messgenauigkeit detektiert werden können.

Es soll an dieser Stelle klar betont werden, dass die hier vorgestellten Ergebnisse nicht zu der Annahme führen sollten, eine Ernteprognose alleine aufgrund der Wuchshöhe vornehmen zu wollen. Denn hier wurden nur die relativen Wuchshöhenunterschiede zwischen den einzelnen Parzellen in einem klar definierten Versuchsaufbau betrachtet. Dies lässt aber auf keinen Fall den Schluss zu, alleine aufgrund der absoluten Wuchshöhe der Pflanze die zu erwartende Erntemenge prognostizieren zu wollen, wenn die für das Pflanzenwachstum prägende Rolle der Standortfaktoren nicht berücksichtigt wird.

4.2.9.3 Hyperspektraldaten

Der Hyperspektraldatensatz wurde in der maximalen spektralen Auflösung von 286 Kanälen mit 1,6 nm Kanalbreite im Wellenlängenbereich 422,2 nm - 899,8 nm aufgezeichnet.

Die Daten wurden nach der in Kap. 4.2.2 beschriebenen Vorgehensweise radiometrisch und geometrisch korrigiert, sodass die Auswertung analog zu den Laserscanneraufnahmen durchgeführt wird. Wie bereits mehrfach erwähnt, kam das hier beschriebene multisensorielle System 2001 erstmals zum Einsatz, sodass diverse Korrekturen, wie z. B. eine Atmosphärenkorrektur mittels Bodenspektrometerdaten oder die nachfolgend beschriebene Sonnenwinkelkorrektur, nicht durchgeführt wurden.

Mit der Sonnenwinkelkorrektur soll ein systembedingter Effekt korrigiert werden. Da der Scanner starr positioniert ist und im Laufe eines Scanvorganges einmal komplett von links nach rechts rotiert, werden nämlich in der einen Hälfte der Szene die sonnenabgewandten und in der anderen Hälfte der Szene die sonnenzugewandten Seiten des Objektes aufgenommen (Abbildung 4-19). Je nach Sonnenstand und -winkel können die Beleuchtungsverhältnisse innerhalb einer Szene deshalb extrem unterschiedlich sein.

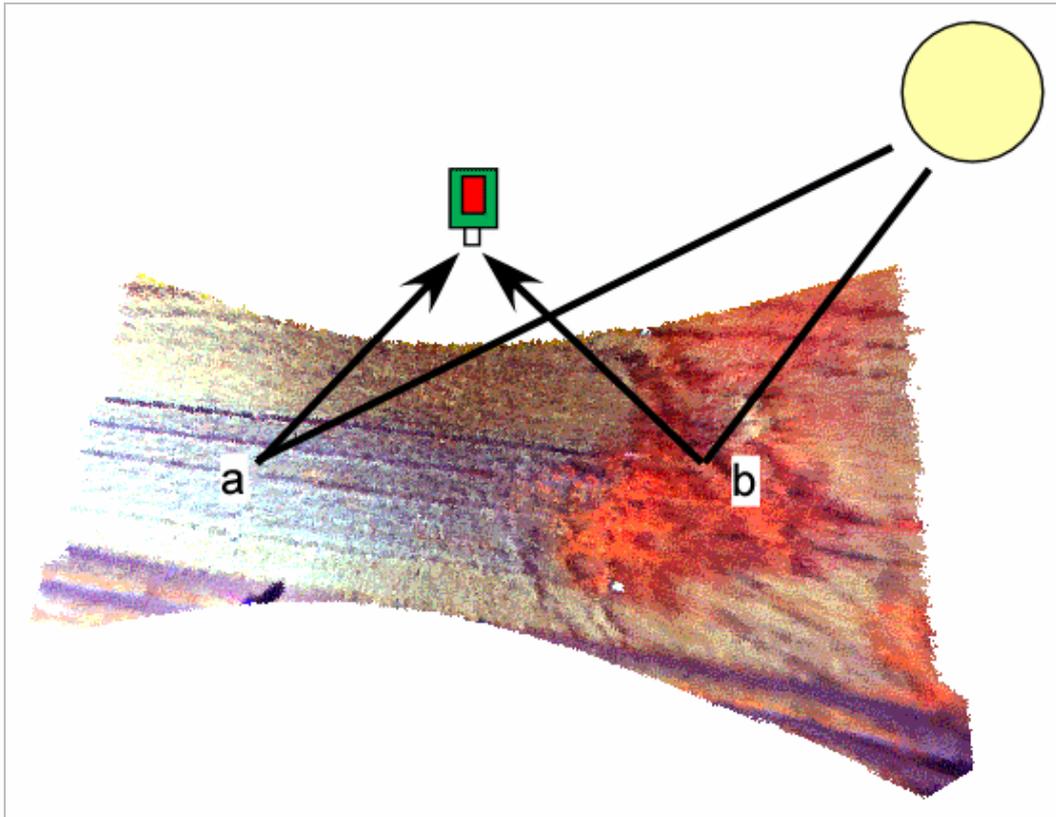


Abbildung 4-19: Schematische Darstellung der sonnenwinkelabhängigen, ungleichmäßigen Beleuchtung der Szene: Die sonnenzugewandte Seite der Vegetation (a) reflektiert stärker als die schattigere, sonnenabgewandte (b) Seite.

Bisher wurden im Rahmen der Entwicklung des Systems keine Anstrengungen unternommen, solch einen Sonnenwinkelkorrekturalgorithmus zu programmieren um die Ausgangsdaten zu optimieren. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die Anwendung von komplexen hyperspektralen Klassifikationsverfahren verzichtet, sondern lediglich eine Standardmethode zur Ermittlung der Pflanzenvitalität angewandt, den so genannten *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

In den letzten drei Jahrzehnten wurden breitbandige Vegetationsindizes sowie insbesondere der vom Landsat TM abgeleitete NDVI vielfältig genutzt, um Informationen über die "Grünheit" der Vegetation bzw. die "Jugend" pflanzlicher Zellen oder die Dichte der Vegetation zu erlangen (TUCKER 1979, WIEGAND et al. 1992). Diese breitbandigen Indizes nutzen die spektrale Information der TM-Kanäle 3 (Rot: 630-690 nm) und 4 (IR: 760-900 nm). Neuere Studien jedoch belegen, dass bei der Verwendung von breitbandigen Kanälen der Informationsverlust im Vergleich zu schmalbandigen Systemen wie AVIRIS oder CASI erheblich ist (BLACKBURN 1998). In einer ausführlichen Vergleichsstudie verschiedener Vegetationsindizes zur Bestimmung von biophysikalischen Parametern von Getreide empfehlen THENKABAIL et al. (2000) die Verwendung von Bändern bei 682 nm ($\Delta\lambda=4$ nm) für Rot und 920 nm ($\Delta\lambda=20$ nm) für Infrarot. Für die Berechnungen des NDVI im Rahmen dieser Arbeit wurde der Kanal 682 nm für Rot verwendet. Da der hier verwendete Hyperspektralscanner AISA nur einen Wellenlängenbe-

reich bis 899 nm abdeckt, wurde der Kanal 899 nm für Infrarot gewählt. Der NDVI berechnet sich demnach folgendermaßen (Gl. 4-5):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR}(899\text{nm}) - \text{R}(682\text{nm})}{\text{NIR}(899\text{nm}) + \text{R}(682\text{nm})} \quad (4-5)$$

Der NDVI ist eine Verhältniszahl (ohne Einheit) mit Werten zwischen -1 und +1. In Abbildung 4-20 sind die NDVI-Werte an den zwei Messtagen pro Parzelle dargestellt (am 03.05. wurden wegen eines Defektes am Scanner keine Messwerte erfasst). Man beachte die Auswirkung der fehlenden Sonnenwinkelkorrektur bei den scharfen Übergängen zwischen den Parzellen.

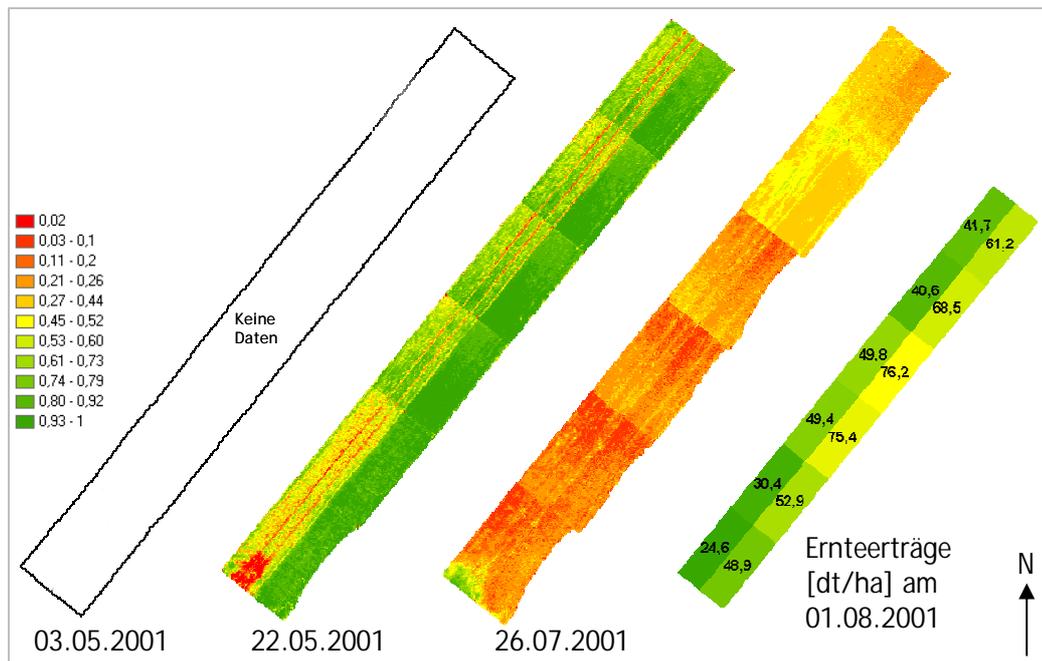


Abbildung 4-20: Farbkodierte Darstellung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) auf den zwölf Parzellen P1-P12 an zwei Messtagen sowie der Ernteerträge am 01.08.2001.

Doch auch wenn die Datenausgangsbasis noch verbesserungswürdig ist, lassen sich einige interessante Phänomene herauslesen. Zu allererst ist anzumerken, dass der NDVI zwischen dem 22.05 und 26.07 stetig abnimmt, was nicht weiter verwunderlich ist, denn kurz vor der Ernte ist das Chlorophyll in der Pflanze fast vollständig abgebaut. Betrachtet man die Parzellen am 22.05, so ist auch hier ein deutlicher Unterschied zwischen dem linken, nicht N-gedüngten Streifen (P1-P6) und dem rechten, N-gedüngten Streifen (P7-P12). So scheint die Vegetationsdecke in den Parzellen P1-P6 immer noch nicht dicht zu sein, da Fahrspuren (mit den geringeren NDVI-Werten) gut zu erkennen sind. Auf die Auffälligkeiten im unteren Bereich des Streifens (P1) wird in Kap. 4.2.10 im Detail eingegangen.

Auch hier soll die Frage gestellt werden, ob und zu welchem Zeitpunkt eine Ernteproggnose aufgrund eines Vitalität-Indikators wie dem NDVI angestellt werden kann? Dafür

wurden wie bei der Auswertung der Laserscannerdaten die mittleren NDVI-Werte pro Parzelle gebildet und graphisch dargestellt (Abbildung 4-21).

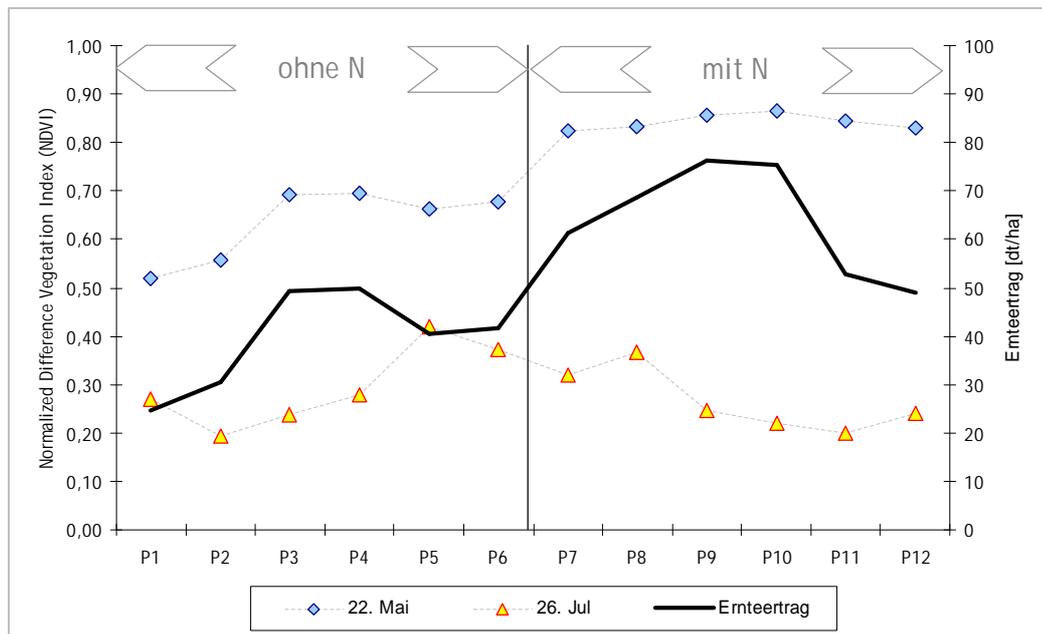


Abbildung 4-21: Graphische Darstellung der NDVI-Werte am 22.05 und 26.07 sowie des Ernteertrages am 01.08.

Zunächst kann festgestellt werden, dass - wie auch schon in Abbildung 4-20 (optisch) erkennbar ist - die mittleren NDVI-Werte in der Reifephase (22.05) ca. doppelt so hoch sind wie in der kurz vor der Ernte stehenden Abschlussphase (26.07). Auch fällt auf, dass zumindest in der Reifephase die N-gedüngten Parzellen (P7-P12) eine klar höhere photosynthetische Aktivität aufweisen. Die ohne Kompost (P1) bzw. konventionell gedüngten Parzellen (P2) weisen die niedrigsten NDVI-Werte auf. Ausnahmen bilden hier die Parzellen P1 und P5 mit zunächst unerklärlich hohen NDVI-Werten am 26.07. Des Weiteren ist bemerkenswert, dass die NDVI-Werte der Abschlussphase (26.07) keine Korrelation mit den Ernteerträgen aufweisen und somit auch nicht für eine Ernteproggnose hinzugezogen werden können. Andererseits weisen die NDVI-Werte während der Reifephase (22.05) eine starke Ähnlichkeit mit den tatsächlich erzielten Ernteerträgen auf. Das lässt den Schluss zu, dass im hier vorliegenden Versuchsaufbau bereits am 22.05 die zwei Monate später labortechnisch ermittelte Erntemenge prognostiziert werden kann. Allerdings gelten auch hier all die Einschränkungen bezüglich der Repräsentativität der Ergebnisse, die bereits in Kap. 4.2.9.2 ausführlich erläutert wurden.

4.2.10 Intra-parzellare Ebene

In den bisherigen Betrachtungen kam die hohe geometrische Auflösung des erdnahen Erdbeobachtungssystems nicht zur vollen Geltung, weil für jede Parzelle ein Mittelwert aller zur Parzelle dazugehörigen Pixel gebildet wurde, um sie mit den Geodaten in Beziehung setzen zu können.

Auf der intra-parzellaren Ebene wird jede einzelne Parzelle auf Pixelebene betrachtet mit dem Ziel, die hohe Detailschärfe für Plausibilitätsprüfungen zu nutzen. Wie im vorigen Kapitel bereits angedeutet sind sowohl in der pixelbasierten, farbkodierten (Abbildung 4-20) als auch in der graphischen (Abbildung 4-21) Darstellung der NDVI-Werte Auffälligkeiten bei der Parzelle P1 anzumerken. So gibt es dort am unteren Rand der Parzelle einen Bereich, der am 22.05 durch sehr niedrige und am 26.07 durch relativ hohe NDVI-Werte auffällt. Der mittlere *Normalized Difference Vegetation Index* für P1 beträgt am 26.07 den Wert 0,27, erwartet wurde aber aufgrund der allgemeinen Tendenz ein Wert $<0,20$.

Die hochaufgelöste erdnahe Erdbeobachtung kann an dieser Stelle dazu dienen, solche Ungereimtheiten aufzuklären, weil auf die fragwürdige Stelle in der Parzelle im Detail geschaut werden kann.

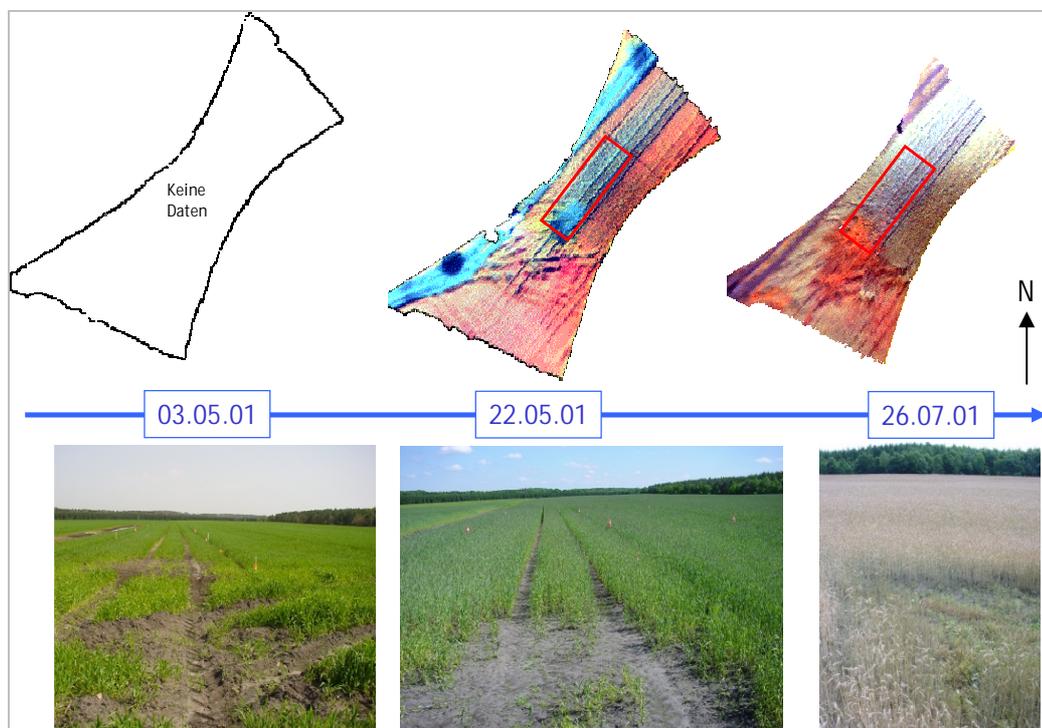


Abbildung 4-22: Dokumentation der Parzelle P1 im Verlauf der Vegetationsperiode. Oben: Color-Infrared-Bild. Unten: Foto. Erläuterungen im Text.

In Abbildung 4-22 ist ebendiese Stelle per Foto (unten) sowie per *Color Infrared* (CIR)-Darstellung der AISA-Daten (oben) dokumentiert. In CIR-Bildern wird der infrarote Wellenlängenbereich dargestellt. Dadurch wird grüne, chlorophyllhaltige Vegetation in Rottönen, freier Boden in bläulichen Farben abgebildet.

Auffällig am 03.05 sind die tiefen Fahrspuren, sodass davon ausgegangen werden kann, dass in diesem Bereich die Einsaat nicht optimal verlief. Am 22.05 wird diese Vermutung bestätigt, weil eine mehrere Quadratmeter große Fläche weiterhin ohne Bewuchs bleibt. Diese Fläche wird im CIR-Bild bläulich dargestellt. Am 26.07 allerdings ist diese Fläche mit vitalen Ackerkräutern vollkommen bedeckt, was sich im CIR-Bild anhand der kräftigen roten Einfärbung widerspiegelt.

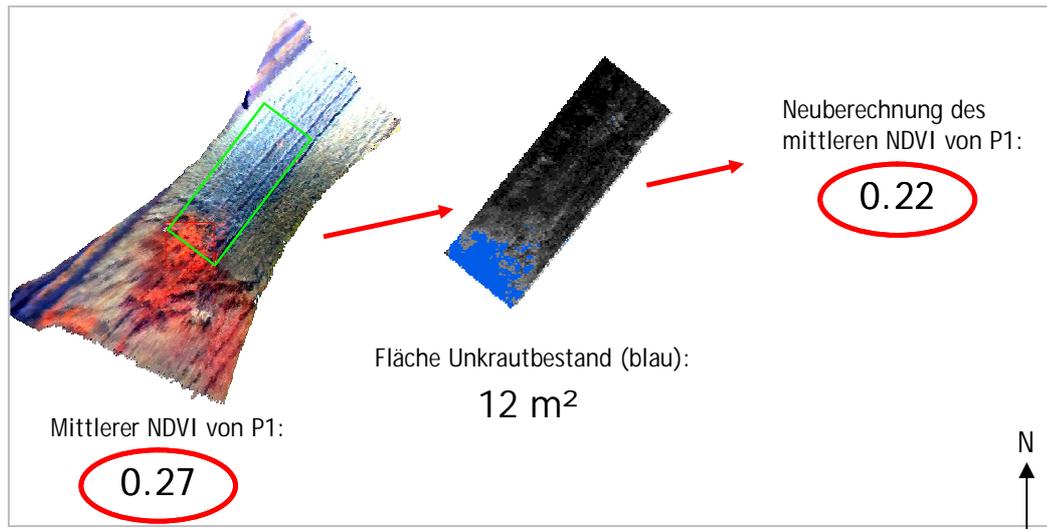


Abbildung 4-23: Neuberechnung des mittleren NDVI anhand von statistischen Abfragen im GIS.

Wird dieser Bereich bei der parzellenbasierten Mittelwertbildung nun nicht berücksichtigt, kommt es zu einem höheren mittleren NDVI-Wert, der die Realität nicht widerspiegelt. Wie in Abbildung 4-23 schematisch dargestellt, wird anhand einer statistischen Abfrage im GIS der mit überhöhten NDVI-Werten belegte Bereich ausgeschnitten (blau), sodass die, im Vergleich zum verblühten Winterroggen, hohen NDVI-Werte der am 26.07 noch photosynthetisch aktiven Ackerkräuter bei der neuen Mittelwertbildung nicht mehr mit einfließen. Dadurch verringert sich der mittlere NDVI von P1 von 0,27 auf 0,22, was im Vergleich zu den Nachbarparzellen nun auch plausibel erscheint (Abbildung 4-21).

4.3 Flugzeuggestützte Vermessung

Als Ergänzung zum krangestützten, multisensoriellen Vermessungssystem für lokale, kleinräumige Gebiete wurde der Hyperspektralscanner AISA in einem nächsten Entwicklungsschritt flugzeuggestützt eingesetzt. Durch diesen Schritt wird die für landschafts-ökologische Fragestellungen geforderte Flächenleistung deutlich verbessert, wenn auch auf Kosten der spektralen und räumlichen Auflösung. Im Folgenden werden die technischen Besonderheiten des eingesetzten flugzeuggestützten Messsystems erläutert, die von einer krangestützten Vermessung etwas abweichenden Rohdatenkorrekturverfahren beschrieben sowie einige beispielhafte Klassifikationen bzw. Auswerteverfahren anhand von zwei konkreten Datensätzen dargestellt.

4.3.1 Ausrüstung der Messplattform

Bei den Vermessungsflügen kam eine für Senkrechtaufnahmen ausgerüstete Cessna 172 zum Einsatz (Abbildung 4-24). Der Scanner AISA und eine digitale Kamera wurden im Rumpf des Flugzeuges so eingebaut, dass sie eine freie, senkrechte Sicht nach unten haben. Der Lichtsensor FODIS wurde an der Vorderkante der Tragfläche angebracht. Eine für die Navigationseinheit benötigte GPS-Antenne wurde von innen am Heckfenster des Flugzeuges montiert.



Abbildung 4-24: Das Vermessungsflugzeug.

Bei den flugzeuggestützten Missionen konnte der Laserscanner aufgrund seiner zu geringen Reichweite von max. 300 m sowie der zu großen Ausmaße nicht eingesetzt wer-

den. Neben dem in Kap. 3.3.4.1 ausführlich beschriebenen Hyperspektralscanner AISA kam dafür eine kommerzielle, hochauflösende 6-Megapixel-Digitalkamera zum Einsatz, die einen ähnlichen Bildausschnitt wie der Hyperspektralscanner liefert (Abbildung 4-25).

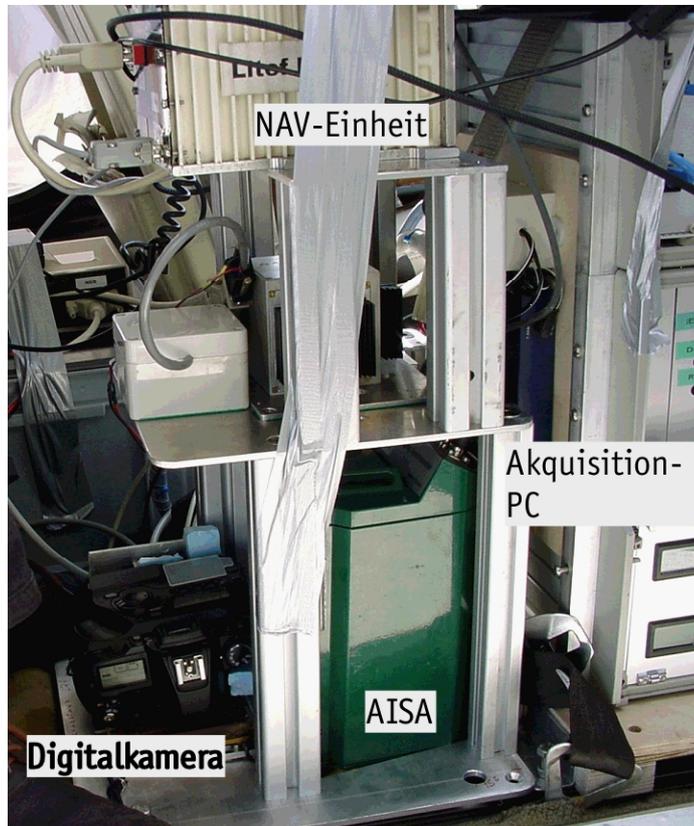


Abbildung 4-25: Die Messvorrichtung bestehend aus dem Hyperspektralscanner AISA, einer Luftbildkamera, der Navigationseinheit (NAV) und einem Akquisitions-PC.

Nachfolgend soll die bei den krangestützten Vermessungen nicht zum Einsatz gekommene Navigationseinheit (NAV) im Detail beschrieben werden, denn sie stellt eine für die spätere Entzerrung der Rohdaten essenzielle Komponente dar. Die Navigationseinheit LEO (*Local Earth Observation*) wird an der Fachhochschule Bochum entwickelt (BÄUMKER et al. 1999). Es handelt sich um eine hochgenaue, stabilisierte Plattform, die die Bewegungen des Flugzeuges mit Hilfe von Servomotoren dynamisch ausgleicht, sodass die Fernerkundungssensorik in jeder Fluglage senkrecht nach unten gerichtet bleibt (Abbildung 4-26). Ein wesentlicher Vorteil dieser Plattform ist, dass die externe Orientierung während des Fluges gewährleistet ist und eine anschließende geometrische Korrektur per Messmarken überflüssig macht. Im Rahmen der hier beschriebenen Missionen wurde allerdings nicht die stabilisierte Plattform eingesetzt, weil der konstruktive Aufwand für die Änderung der Grundplatte für die Montage von AISA in kurzer Zeit nicht realisierbar war. Aus diesem Grunde wurde „unstabilisiert“ geflogen, das bedeutet, dass mithilfe der NAV-Einheit die hochgenauen Navigationsdaten (Position und Lage des Flugzeuges bzw. des Scanners) mit einer Messrate von 64 Hz aufgezeichnet wurden, um eine nachträgliche Korrektur der Flugdaten zu ermöglichen (Kapitel 4.3.4).

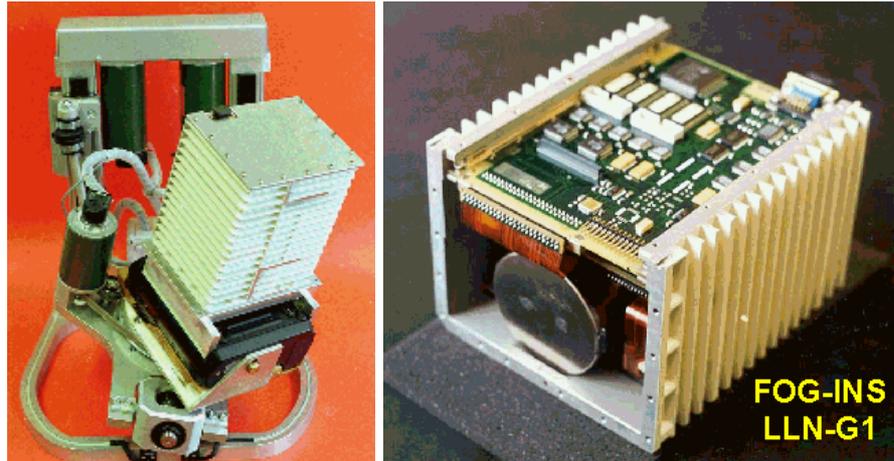


Abbildung 4-26: Links: Stabilisierte Plattform LEO bestehend aus einer hochgenauen Dreipunkte-Aufhängung, drei hoch dynamischen Servo-Motoren, dem hochgenauen faseroptischen Kreisel sowie einer digitalen Rollei Kamera (4000x4000 Pixel). Rechts: Faseroptischer Kreisel (FOG) (BÄUMKER et al. 1999).

4.3.2 Datenakquisition

Die AISA-Datenakquisition erfolgt auf der Basis von Hard- und Softwarekomponenten, die im Rahmen von mehrjährigen Entwicklungsarbeiten bei der Fa. airobotics GmbH entwickelt wurden. Ziel dieser Entwicklungen war es, ein robustes Akquisitionssystem (AISA-DAQ) zu bauen, das aus den drei Modulen 1) Datenakquisition, 2) Datenakquisitions-Steuerung und 3) Datenmonitoring besteht (AIROBOTICS 2003). Die Hardware des AISA-Akquisitionssystems besteht aus folgenden Komponenten (Tabelle 4-3 und Abbildung 4-27):

Tabelle 4-3: Komponenten des AISA-Akquisitionssystems (AIROBOTICS 2003).

DAQ- Rack	DAQ data processor unit (SMA CPU5B, Intel Pentium MMX 233, 64 MB Ram, SVGA, 2x RS232, 1x LPT, 2x USB, PS/2, Netzwerk Schnittstelle, National Instruments Multi- I/O card PXI6070E) ComPort Server mit 4 seriellen Ports Vibrationsfreie, aufgehängte 2 1/2" Notebook Festplatte 20 GB
Netzwerk-Plattform	Netzwerk-Switch 5 ports
Stromversorgung mit Akkus	3 Akkus 12 V @ 12 Ah Spannungsregler 5 V @ 22 A Liefert 5 V und 12 V
Stromversorgung mit Wechselstrom 250V	Liefert 5 V @ 22 A und 12 V @ 8 A
Sensor	AISA- Scanner
Optionales System – Navigations-Rack	Novatel GPS 3151R für Zeitsynchronisation FPGA für Zeitsynchronisation



Abbildung 4-27: Hardware-Racks des AISA-Akquisitionssystems (von oben nach unten: DAQ-Rack, optionales Navigations-Rack, Stromversorgungs-Rack; an der Seite: Netzwerk-Plattform) (AIROBOTICS 2003).

Das AISA-Akquisitionssystem wurde derart konzipiert und gebaut, dass

- < es in den widrigen Umgebungsbedingungen in einem Flugzeug (z. B. Vibrationen, Hitze) voll funktionsfähig ist,
- < es über eine eigene Stromversorgung mit einer Betriebszeit von ca. 2 Std. verfügt,
- < es kompakt, leicht und schnell (in 30 Min.) ein- und ausgebaut werden kann, um die Verweildauer des Flugzeuges am Boden so kurz wie möglich zu halten,
- < es von einem Operator per Notebook bedient werden kann,
- < die Synchronisation mit der Navigationseinheit im *Post-Processing* über das GPS-Zeitsignal erfolgt, sodass nichtproprietäre Navigationseinheiten verwendet werden können.

In der Abbildung 4-28 ist das Datenflussdiagramm für die Akquisition von AISA-Daten schematisch dargestellt.

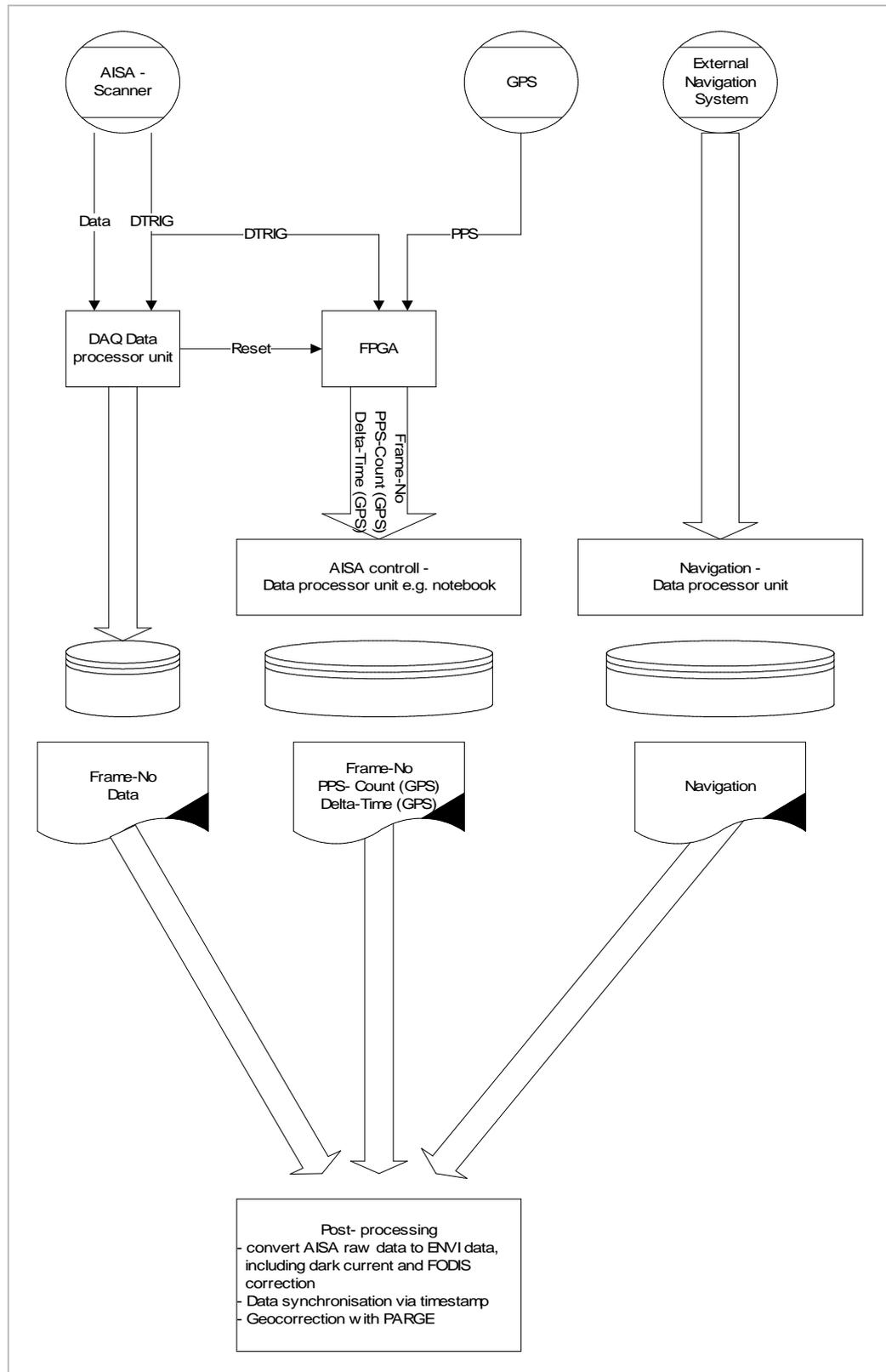


Abbildung 4-28: Datenflussdiagramm für das AISA-Datenakquisitionssystem (AIROBOTICS 2003).

Während der Daten-Akquisition werden drei verschiedene Datenströme verarbeitet: die Hyperspektraldaten vom AISA-Scanner, das GPS-Zeitsignal sowie die externen Navigationsdaten. Vom AISA-Scanner werden zum einen die Zeilen (*Frames*) inklusive *Frame*-Nr. auf einer Festplatte gespeichert. Zum anderen löst jeder erfasste AISA-*Frame* ein so genanntes *Trigger-Signal* (DTRIG) aus, das zusammen mit dem GPS-Zeitsignal (PPS) auf einem FPGA (*Field Programmable Gate Array*) in Echtzeit verarbeitet wird, sodass für die anschließende Synchronisation mit den externen Navigationsdaten jede AISA-Zeile mit einer GPS-Zeit versehen ist. Im *Post-Processing* werden die AISA-Rohdaten inklusive Dunkelstrom- und FODIS-Korrektur in ein lesbares Format konvertiert (ENVI-Format *.dat) (Kap. 4.2.4) und zusammen mit den Navigationsdaten via Zeitstempel mit der kommerziellen Software PARGE entzerrt (Kap. 4.3.4).

4.3.3 Radiometrische Korrektur

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass auch bei der flugzeuggestützten Vermessung eine radiometrische Korrektur der Daten erfolgt. Diese wurde bereits in Kap. 4.2.4 ausführlich beschrieben, und soll an dieser Stelle nicht wiederholt werden.

4.3.4 Geometrische Entzerrung

Die geometrische Entzerrung mit der anschließenden Georeferenzierung der Flugdaten stellt eine besondere Schwierigkeit dar. In Kap. 4.2.5 wurden die grundlegenden Verzerrungseffekte bereits beschrieben. Um diese Effekte zu verdeutlichen, ist in Abbildung 4-29 ein unkorrigierter Flugstreifen dargestellt. Es handelt sich hier um unkorrigierte AISA-Rohdaten eines Überfluges der Start- und Landebahn der ASL in Lemwerder am 15.07.2003. Die durch starke Thermik verursachten lateralen Bewegungen des Flugzeuges können an den ausgefransten Rändern der Piste klar erkannt werden. Vertikale Bewegungen des Flugzeuges sind am Bild nicht so offensichtlich erkennbar, wirken sich aber durch unterschiedliche Pixelgrößen ebenso aus.



Abbildung 4-29: Unkorrigierte (links) und korrigierte (rechts) AISA-Daten eines Überfluges der Start- und Landebahn Lemwerder am 15.07.2003.

Mit Hilfe von Navigationsdaten, d. h. bei genauer Kenntnis der Zeit, der Position (x, y, z) sowie der Lage (Roll-, Nick- und Gierwinkel) des Flugzeuges zu jeder AISA-Zeile, kann im *Post-Processing* das Bild entzerrt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierfür die kommerzielle Software PARGE (*Parametric Geocoding*) (SCHLÄPFER 2002) eingesetzt. Die in IDL/ENVI (*Interactive Data Language/Environment for Visualizing Images*) implementierte Software PARGE eignet sich im besonderen Maße, Zeilenscannerdaten und insbesondere Hyperspektralscannerdaten zu verarbeiten. Ergebnisse können in nur

wenigen Arbeitsschritten erzielt werden (Abbildung 4-29). Als Datenbasis werden benötigt:

- < AISA-Datensatz (inkl. Angaben zur verwendeten Optik, zur Messrate etc.),
- < Digitales Höhenmodell (wenn vorhanden),
- < Navigationsdaten,
- < über die Szene verteilte *Ground Control Points* (GCPs).

4.3.5 Ground Truthing

Die Methodik des *Ground Truthing*, also die Erhebung von Parametern vor Ort zur Kontrolle der Auswertungsergebnisse, gilt schon immer als fester Bestandteil in der Auswerteprozesskette von Fernerkundungsdaten. *Ground-Truth*-Daten sind Informationen vom Untersuchungsgebiet, die zur Kalibrierung, Klassifikation und Weiterverarbeitung von Fernerkundungsdaten benötigt werden. Diese können zum einen digitale Karten oder Sachinformationen aus verfügbaren Geodaten-Beständen sein, zum anderen aber auch umfangreiche Untersuchungen und Kartierungen vor Ort. Die verfügbaren Auswerteverfahren ermöglichen typische Flächencharakteristika wie Vegetation, Wasser, Boden und Gestein ohne weitere Verifikation zu unterscheiden. Auch die Verwendung von Geländeinformationen zur Korrektur von atmosphärischen und topographischen Einflüssen in den Fernerkundungsdaten sowie die Einbeziehung von Höheninformation für eine genaue Georeferenzierung der Daten gehört zu den fernerkundlichen Standardverfahren.

Sind allerdings differenzierte Fragestellungen geplant, beispielsweise zur Vitalität der Vegetation, zur Kontamination von Böden oder zur Untersuchung bestimmter Wasserinhaltsstoffe, bedarf es zusätzlicher Detailinformation. Beim Einsatz der neuen höchstauflösenden flugzeug- und satellitengestützten Sensoren sind die Anforderungen an das *Ground Truthing* hoch. Aus diesem Grund werden zeitgleich zur fernerkundlichen Aufnahme des Untersuchungsgebietes (vom Satelliten oder Flugzeug aus) umfangreiche und detaillierte Geländeerhebungen in repräsentativen Trainingsgebieten durchgeführt. Da solche Einsätze in der Regel kosten- und personalaufwändig sind, sollte es das Ziel sein, das immer notwendige *Ground Truthing* auf ein Minimum zu beschränken.

Da bei der multispektralen, räumlich schlechter aufgelösten Satellitenfernerkundung nur grobe Klassifizierungen z. B. der Landnutzung (Vegetation, Wasser, Boden etc.) möglich sind, sind die Anforderungen an das *Ground Truthing*, insbesondere bezüglich der Verortung der Kontrollgebiete, dementsprechend gering. Erst seit der Einführung der räumlich hochauflösenden Satelliten, wie zum Beispiel IKONOS (1 m x 1 m Pixelgröße) im Jahre 1999, spielt nunmehr auch die hochgenaue Positionsbestimmung der Beobachtungsstandorte per Differential-GPS (DGPS) eine große Rolle.

Beim Einsatz der abbildenden Spektrometrie, die im Grunde genommen einer flächenhaften, direkten physikalischen Messung des Untersuchungsobjektes entspricht, werden die Anforderungen an das *Ground Truthing* nochmals gesteigert. Um das ganze Potenzial dieser neuen Technologie ausschöpfen zu können (z. B. die Erkennung von Pflanzen-

schädlingen, die Detektion von Schadstoffen im Untergrund, die Bestimmung von Algengehalten im Wasser), kommt neben der hochgenauen Verortung der Standorte nun noch ein beträchtlicher Kalibrierungsaufwand hinzu. Als Beispiel seien hier Begriffe wie z. B. Atmosphärenkorrektur, Sonnenwinkelkorrektur, Topographieeffekte, Misch-Pixel-Analysen genannt, die es bei der Auswertung zu berücksichtigen gilt.

Um die Auswertung der fernerkundlich erfassten hyperspektralen Daten zu validieren, ist also zeitgleich zur fernerkundlichen Aufnahme des Untersuchungsgebietes (ob vom Satelliten oder Flugzeug aus) ein umfangreiches und detailliertes *Ground Truthing* in sogenannten Trainingsgebieten durchzuführen. Trainingsgebiete sind kleinräumige Kontrollflächen, deren Größe und Anzahl von der Fragestellung bzw. Heterogenität innerhalb des Untersuchungsgebiets abhängt sowie von dem Differenzierungsgrad der Objekte, der sich aus der erwarteten Pixelgröße der Fernerkundungsdaten ergibt.

Im Rahmen der hier vorgestellten Missionen wurde parallel zur Flugmission eine ausführliche Bodenkampagne durchgeführt. Die detaillierte Beschreibung solcher Bodenkampagnen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Im Folgenden wird jedoch auf ein für die atmosphärische Korrektur der Hyperspektraldaten verwendetes Messgerät, das Handspektrometer, im Detail eingegangen.

Beim Handspektrometer FieldSpec der Fa. Analytical Spectral Devices, Inc. (ASD), handelt es sich um ein handliches, für Geländearbeiten optimiertes Messgerät, das ähnliche spektrale Merkmale aufweist wie der zum Einsatz kommende flug- und krangestützte Hyperspektralscanner AISA. Somit können die Handspektrometerdaten hervorragend für die Kalibrierung der AISA-Daten und für den Aufbau von Spektralbibliotheken verwendet werden. In Tabelle 4-4 sind die wichtigsten spektralen Merkmale beider Messgeräte gegenübergestellt:

Tabelle 4-4: Technische Daten des Handspektrometers ASD FieldSpec und des Hyperspektralscanners AISA (ASD 1999).

Name	FieldSpec® Handheld	AISA
Spektralbereich	325-1075 nm	430-900 nm
Spektrale Auflösung	1.6 nm	1.8 nm
Spektrale Bänder	512	286
Gewicht	1.2 kg	4.5 kg

Mit dem Handspektrometer wurden zeitgleich zur Befliegung charakteristische Flächen spektral erfasst, die in der anschließenden Datenauswertung als Referenzspektren eingesetzt werden, um die gesamte Flugszene radiometrisch zu korrigieren. Diese Methode wird als *Empirical Line Calibration* bezeichnet und ist in ENVI implementiert (ENVI 2001). Sie basiert auf die Tatsache, dass der atmosphärische Strahlungstransfer sehr gut mit einer linearen Übertragungsfunktion darzustellen ist, sodass anhand einer Regressionsanalyse zwischen im Gelände erhobenen Reflexionsmessungen die entsprechenden Reflexionsgrade für jedes Pixel der Flugszene bestimmt werden können. Vorausset-

zung ist lediglich das Vorhandensein von mindestens zwei Referenzspektren (KRUSE et al. 1990). Die Ergebnisse solcher Korrekturen werden in Kap. 4.3.8 beschrieben.

4.3.6 Hyperspektraldaten

Im Gegensatz zur krangestützten Vermessung, wo der Scanvorgang langsam erfolgt und somit die Integrationszeit des Scanners so hoch eingestellt werden kann (300 ms), dass die Daten mit der maximalen spektralen Auflösung von 286 Kanälen erfasst werden können, müssen bei der flugzeuggestützten Vermessung Parameter wie Fluggeschwindigkeit und –höhe berücksichtigt werden, um eine optimale Scanner-Einstellung vornehmen zu können. Für die Ermittlung dieser optimalen Scanner-Konfiguration wurde ein Software-Tool entwickelt, das folgende Parameter berücksichtigt:

- < Messhöhe über Grund,
- < Fluggeschwindigkeit über Grund,
- < verwendete Optik (IFOV, FOV),
- < Integrationszeit.

Aus diesen Berechnungen ergibt sich eine Konfigurationsdatei, die bei den in den nachfolgenden Kapiteln 4.3.9 und 4.3.10 verwendeten AISA-Daten zu folgender Kanalauswahl führte (Tabelle 4-5):

Tabelle 4-5: Auflistung der verwendeten Kanäle mit Angaben zur Kanalmitte und –breite. Die Integrationszeit liegt bei 40 ms (25 Hz).

Kanalnummer	Kanalmitte [nm]	Kanalbreite [nm]
1	470,93	9,59
2	482,13	9,59
3	491,71	9,59
4	506,10	9,59
5	525,27	9,59
6	536,46	9,59
7	546,04	9,59
8	555,64	9,59
9	565,21	9,59
10	576,40	9,59
11	585,99	9,59
12	595,59	9,59
13	606,15	10,29
14	616,44	10,29
15	635,30	10,29
16	647,31	10,29
17	657,60	10,29

18	667,89	10,29
19	678,18	10,29
20	695,33	10,29
21	705,64	10,35
22	721,26	10,35
23	731,61	10,35
24	741,96	10,35
25	752,31	10,35
26	771,28	10,35
27	781,63	10,35
28	795,43	10,35
29	807,51	10,35
30	823,03	10,35
31	838,56	10,35
32	857,53	10,35
33	871,33	10,35
34	881,68	10,35
35	895,48	10,35

Als Optik wurde eine 8-mm-Linse mit einem *field of view* (FOV) von $57,6^\circ$ gewählt, sodass die Streifenbreite in etwa der Flughöhe über Grund entspricht (ca. 500 m). Bei einer Flughöhe von ca. 500 m und einer Integrationszeit von 40 ms haben die Pixel eine physikalische Auflösung von 1,3 m quer zur Flugrichtung (*across track*) mal 1,2 m in Flugrichtung (*along track*). Bei der anschließenden Bearbeitung mit PARGE wurde die Pixelauflösung auf 2 m mal 2 m gesetzt.

4.3.7 Digitale Luftbilder

Neben dem Hyperspektralscanner wurde während der Messflüge auch eine digitale 6-Megapixel-Farbkamera der Fachhochschule Bochum mitgeführt, die über einen ähnlichen Ausschnitt wie der Hyperspektralscanner verfügt. Sie wurde direkt hinter dem Scanner eingebaut, doch wegen der etwas zu kleinen Bodenluke wurde bei den hier beschriebenen Testflügen der Rand der Bodenluke mit aufgenommen (Abbildung 4-30). Durch nachträgliches Bildbearbeiten kann dieser schwarze Bereich jedoch einfach entfernt werden.



Abbildung 4-30: Luftbild aus dem Bereich „Wümmewiesen“. Die Auflösung beträgt ca. 15 cm (siehe auch Ausschnittsvergrößerungen).

Die eigentliche Besonderheit des Messaufbaus besteht darin, dass die mit dem Navigationsrechner verbundene Kamera über eine Flugführungssoftware vollautomatisch ausgelöst wird, um hochgenaue Orthophotos zu erstellen. Mithilfe solcher Orthophotos können wiederum hochgenaue digitale Geländemodelle berechnet werden, die bei der Geokodierung der Hyperspektraldaten mit PARGE genutzt werden können.

Am Tag des Testfluges fiel die für den vollautomatischen Betrieb vorgesehene Kamerasteuerung aufgrund eines technischen Defektes leider aus, sodass eine manuelle Auslösung der Kamera durch den Operator erfolgen musste. Da der Operator jedoch maßgeblich damit beschäftigt war, den AISA-Scanner zu bedienen, konnte eine für die Erstellung von Orthophotos nötige Überlappung der Bilder in Flugrichtung von mindestens 55 % nicht dauernd eingehalten werden. Nichtsdestotrotz dienen die hochaufgelösten Farbbilder hervorragend zur optischen Kontrolle von Klassifikationsergebnissen oder zur Aufklärung von Auffälligkeiten im Hyperspektralbild. Darüber hinaus sind sie auch bestens für eine klassische Luftbildinterpretation geeignet.

4.3.8 Messkampagne

Die flugzeuggestützte Messkampagne fand am 15.07.2003 statt. Als Testgebiet wurde ein etwa 40 km östlich von Bremen liegender Bereich aufgrund seiner landschaftlichen Vielfalt gewählt:

- < Siedlungsflächen der Gemeinde Sottrum,
- < Grünlandflächen der Wümmeniederung,
- < Forstbereiche bei der Ahauser Mühle,
- < und landwirtschaftliche Flächen im Bereich Stelle.

Die Befliegung erfolgte auf verschiedenen Flugniveaus (Abbildung 4-31), um die Grenzen des räumlichen Auflösungsvermögens des Scanners auszuloten.

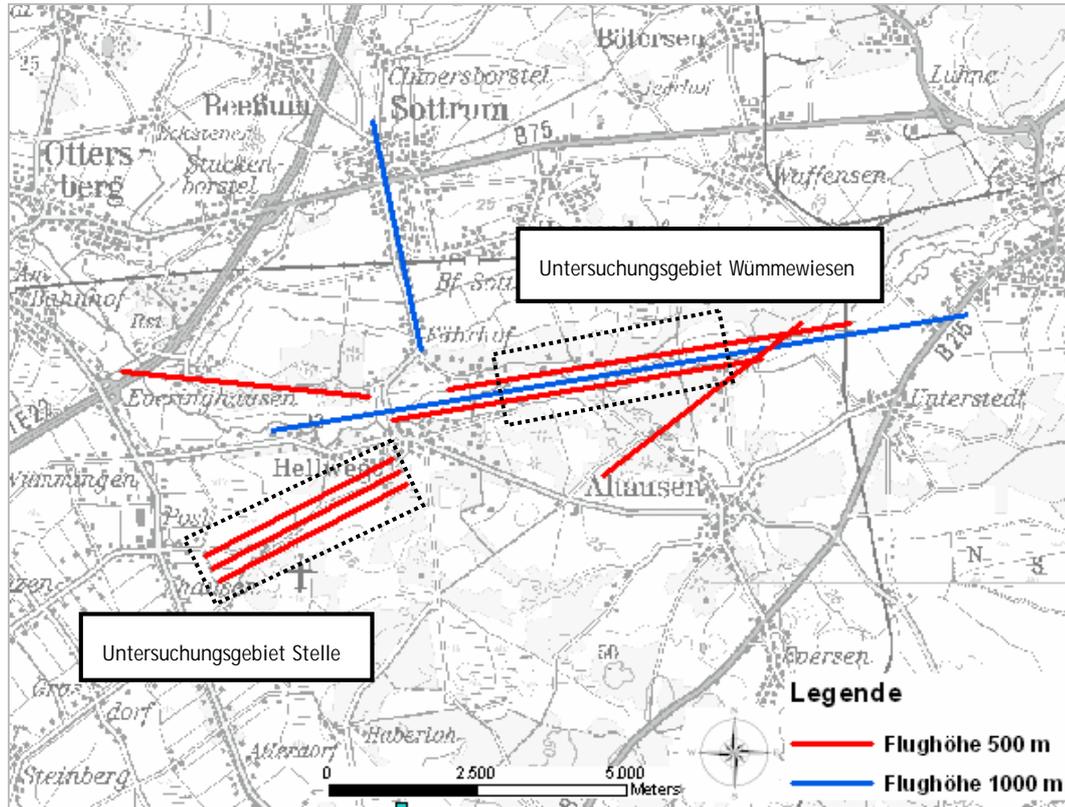


Abbildung 4-31: Darstellung der Flugrouten auf den beiden Flugniveaus 500 und 1000 m über Grund.

Da es sich beim verwendeten Flugzeug um ein Sportflugzeug vom Typ Cessna 172 handelte und nicht um ein professionelles Vermessungsflugzeug, wurde die Maschine von einem erfahrenen Kunstflieger auf Sicht und ohne Autopilot geflogen. Dem Piloten stand für die Einhaltung der Flugroute eine mit dem Navigationssystem verbundene Flugführungssoftware der Fachhochschule Bochum zur Verfügung, die die nötigen Kurskorrekturen anzeigt. Im *Post-Processing* kann anhand der aufgezeichneten Navigationsdaten die Flugroute mit dem vorgesehenen Flugpfad verglichen werden. Wie aus Abbildung 4-32 ersichtlich ist, wurde der Flugpfad „Stelle“ so präzise geflogen, dass die größte Abweichung nur 12 m betrug.

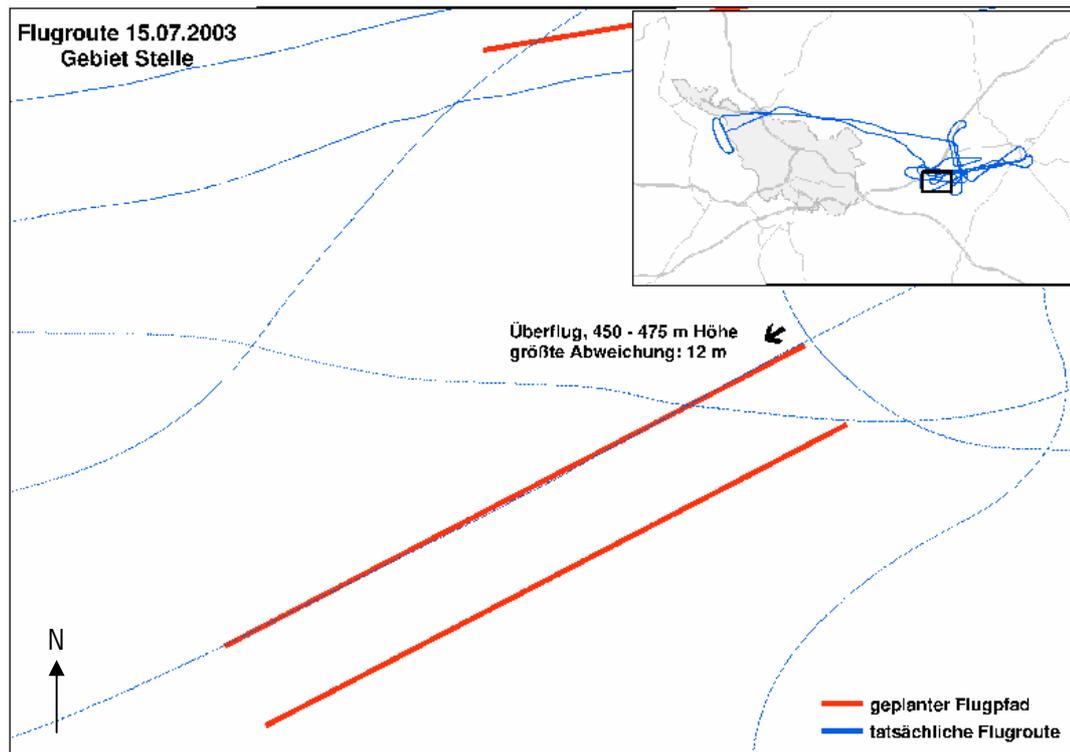


Abbildung 4-32: Darstellung der tatsächlich geflogenen Flugroute und des geplanten Flugpfades im Bereich „Stelle“.

Bei der Planung und Durchführung von flugzeuggestützten Vermessungen spielen auch das Wetter und die Tageszeit eine wichtige Rolle. Nach ERASMI (2002) sollte sich die Vermessung im Bereich ± 2 Stunden um den Sonnenhöchststand abspielen, weil dann die Schattenanteile am geringsten sind. Außerdem sollte der Himmel wolkenfrei sein, damit der Flugstreifen nicht ungleichmäßig beleuchtet ist. Diese Voraussetzungen sind nicht immer einzuhalten, insbesondere nicht, wenn man bedenkt, dass gerade im Sommer in der Mittagszeit oftmals kleine Wolken entstehen und die Thermik dann am stärksten ist. Genau diese Wetterbedingungen herrschten am Tag der Befliegung am 15.07.2003 vor: Es war ein sonniger Tag mit ca. 25°C Lufttemperatur am Boden. Der Start erfolgt um ca. 12:00 vom Flughafen Lemwerder aus und wurde gegen 14:00 in Lemwerder beendet. Starke Thermik erforderte hohes Können des Piloten um die Maschine sowohl lateral als auch vertikal auf dem Flugpfad zu halten. Leichte Bewölkung warf mehr oder weniger großflächige Schatten am Boden, wie in den nachfolgenden Bildbeispielen ersichtlich wird (Kap. 4.3.9 und 4.3.10).

In den folgenden Kapiteln werden exemplarisch die hyperspektralen Datensätze von zwei unterschiedlichen Untersuchungsgebieten vorgestellt, und dabei zwei verschiedene Fragestellungen beantwortet werden. Im Untersuchungsgebiet „Wümmewiesen“ geht es um die radiometrische Korrektur eines Ausschnittes mittels der *Empirical-Line-Calibration*-Methode, und im Untersuchungsgebiet „Stelle“ wird für einen kompletten, geokodierten Flugstreifen eine statistische Klassifikationsmethode zur Flächennutzungskartierung vorgestellt.

4.3.9 Untersuchungsgebiet Wümmewiesen

Im Rahmen dieses Kapitels sollen die Ergebnisse einer radiometrischen Korrektur mittels der *Empirical-Line-Calibration*-Methode überprüft werden. Dies erfolgt am Beispiel eines Bildausschnittes aus dem Flugstreifen „Wümmewiesen“.

4.3.9.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Wie in Kap. 4.3.8 erwähnt, befindet sich der Bereich „Wümmewiesen“ nördlich von Ahausen, ca. 40 km östlich von Bremen. Die Wümmewiesen bei Hellwege, Landkreis Rotenburg/Wümme, weisen eine für die Gegend typische landwirtschaftliche Bewirtschaftung auf. Intensiv genutzte, relativ homogene Flächen - auf denen bis zu dreimal im Jahr gemäht wird - treten in unmittelbarer Nachbarschaft zu heterogenen, für den Naturschutz sehr wertvollen, mesophilen Grünlandflächen auf. Abbildung 4-33 zeigt einen ca. 200 m x 300 m großen Ausschnitt eines hochaufgelösten Luftbildes der Messkampagne vom 15. Juli 2003. Zu dem Zeitpunkt können fünf Felder aufgrund unterschiedlicher Bewirtschaftung, geomorphologischer oder pflanzensoziologischer Charakteristik unterschieden werden.

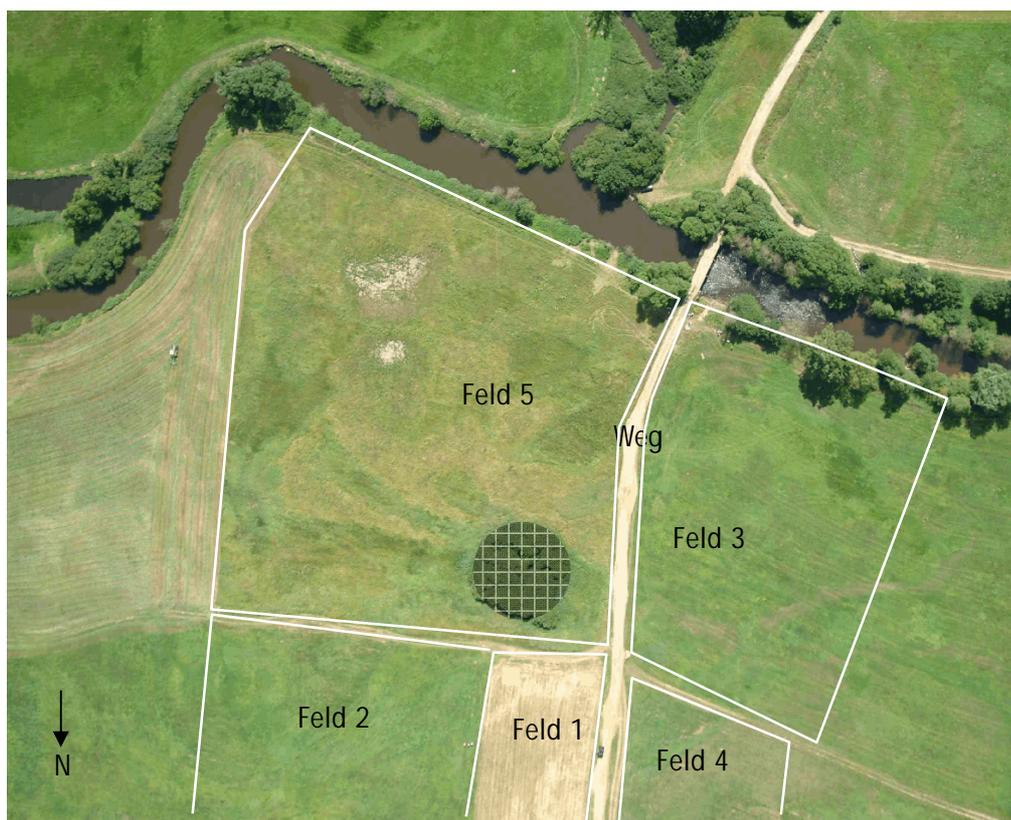


Abbildung 4-33: Ca. 200 m x 300 m großen Ausschnitt eines hochaufgelösten Luftbildes der Messkampagne vom 15. Juli 2003.

Das Feld 1 ist ein frisch gemähter Bereich mit wenig grüner Vegetation. Auf den Feldern 2 und 3 hat bereits eine Mahd stattgefunden, sie sind gekennzeichnet durch unterschiedliche Pflanzengesellschaften, die z. T. aus morphologischen Unterschieden

resultieren. Feld 4 weist einen hohen Anteil von alter Streu des Vorjahres auf. Feld 5 ist der einzige Bereich, der noch nicht gemäht wurde und dessen Pflanzengesellschaften eine große Vielfalt aufweisen.

4.3.9.2 Empirical-Line-Kalibrierung

Bei der Datenkalibration und Atmosphärenkorrektur erfolgen die in Abbildung 4-34 dargestellten Schritte.

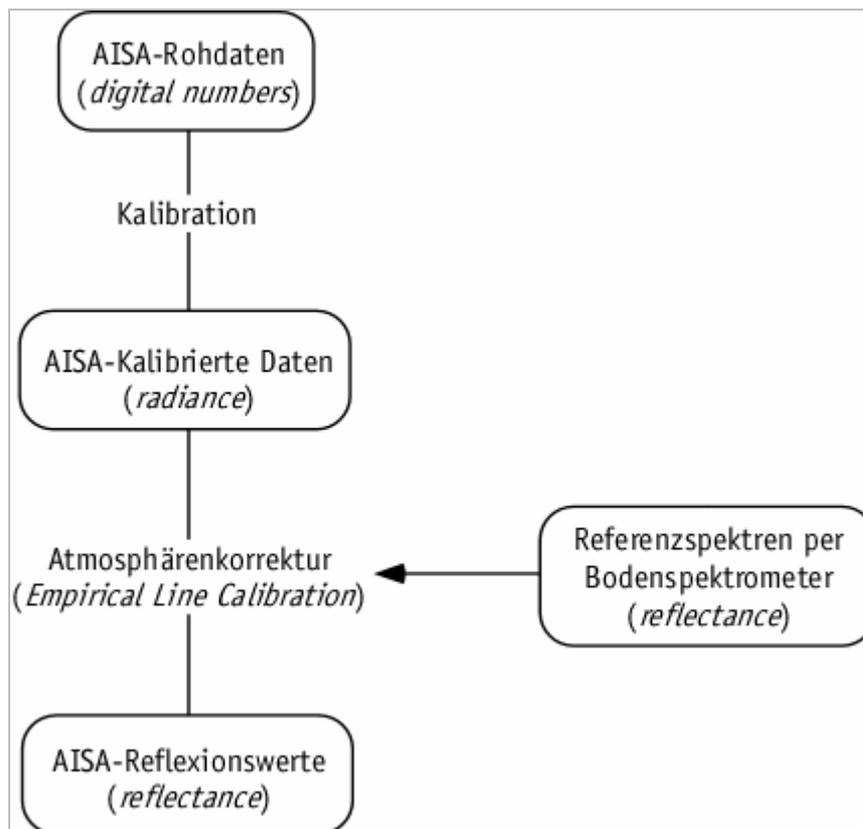


Abbildung 4-34: Schematischer Ablauf der Atmosphärenkorrektur am Beispiel der Empirical-Line-Calibration-Methode.

Bei dieser Methode werden einzelnen oder einer Gruppe von Bildpixeln (ROI: *Region of Interest*) am Boden erfasste Spektren zugewiesen. Diese Methode setzt voraus, dass die Spektren von Merkmalen aufgenommen werden, die im Laufe der später erfolgenden Auswertung auch in der Flugszene eindeutig identifiziert werden können, und dass sie zeitgleich zur Befliegung erfasst werden, um vergleichbare atmosphärische Verhältnisse zu messen (Dwyer et al. 1995).

Im Rahmen der Messkampagne wurden die Spektren von neun verschiedenen Standorten erhoben. Mit der Bildanalyse-Software ENVI wurden diese Standorte in der AISA-Szene identifiziert und anhand der in ENVI implementierten *Empirical-Line-Calibration*-Funktion der gesamte AISA-Flugstreifen korrigiert. Die Qualität der Korrekturergebnisse kann anhand eines Vergleiches der Spektralkurven vorgenommen werden (Abbildung 4-35).

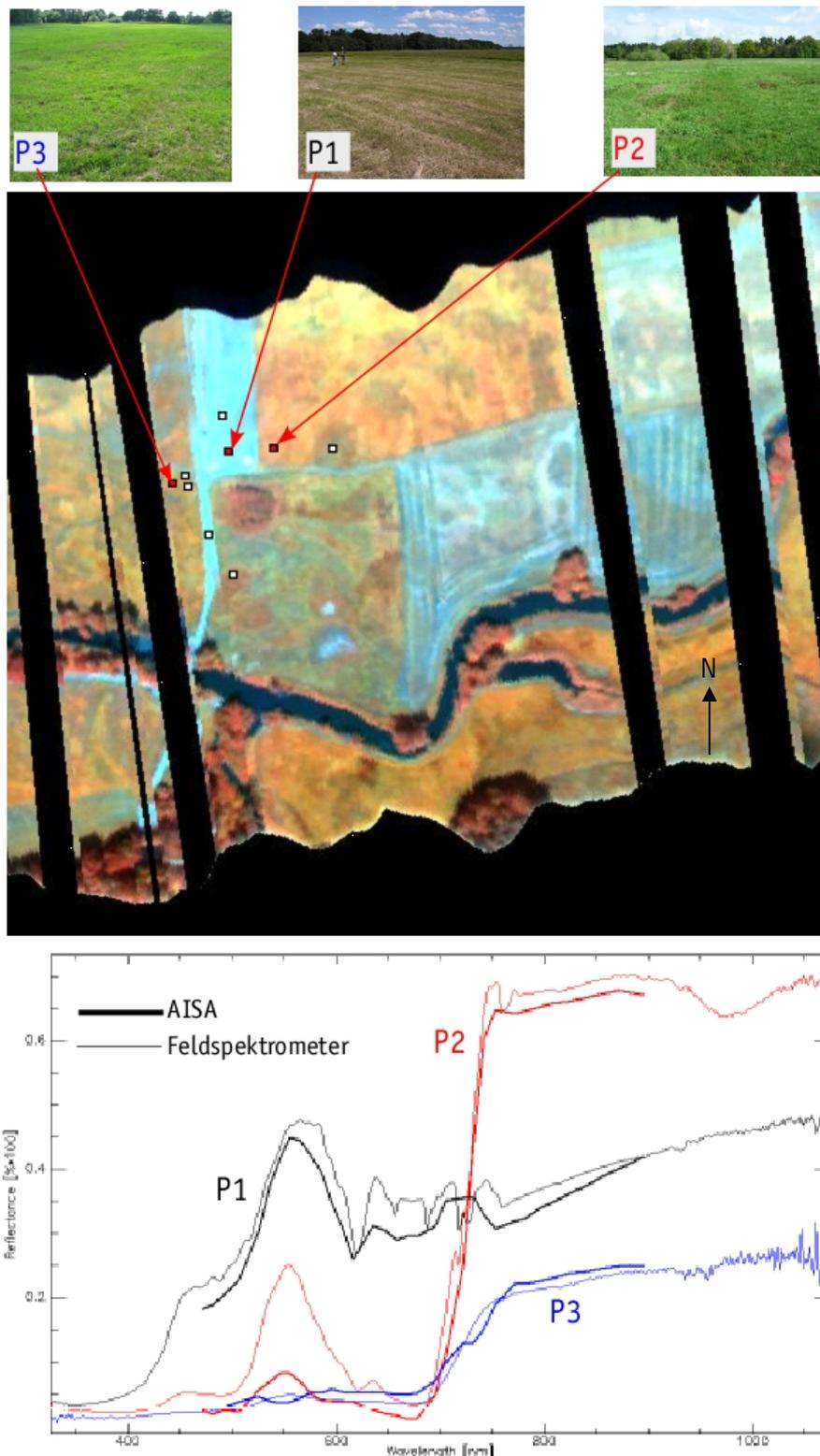


Abbildung 4-35: Oben: Foto der ausgewählten Feldspektrometer-Messstandorte. Mitte: CIR-Darstellung der AISA-Daten (die schwarzen Blöcke entstanden durch Datenaussetzer aufgrund von Vibrationen des Flugzeuges) mit allen neun Feldspektrometerstandorten, die zur Empirical-Line-Kalibration herangezogen wurden. Unten: Vergleich der AISA- und Feldspektrometer-Spektralkurven an drei ausgewählten Standorten: P1) gemähte Wiese; P2) vitale Vegetation auf feuchtem Standort; P3) vitale Vegetation auf trockenem Standort.

Die Abbildung 4-35 belegt, dass die AISA-Spektren nach der *Empirical-Line*-Kalibration hohe Ähnlichkeiten mit den Bodenspektren aufweisen. Der somit atmosphärisch korrigierte AISA-Datensatz kann nun in die weitere Auswerteprozedur einfließen.

Obwohl das hier angewandte Korrekturverfahren in diesem Fallbeispiel zu guten Ergebnissen führt, besitzt es eine Reihe von Nachteilen, die nicht unerwähnt bleiben sollen. Wie bereits genannt, ist die Messung der Bodenspektren gleichzeitig zum Überflug vorzunehmen, um unter ähnlichen atmosphärischen Verhältnissen bzw. Beleuchtungsbedingungen zu messen. Dies ist nicht immer gegeben, insbesondere wenn der Himmel leicht bewölkt ist und sich in der Missionsnachbereitung herausstellt, dass durch einen unglücklichen Zufall der Spektrometer-Messstandort im Schatten liegt. Solchem Unglück kann man nur entgehen, indem man die Standortanzahl erhöht und die Messstandorte über die gesamte Szene gut verteilt, was allerdings zum nächsten Nachteil dieser Methode führt, nämlich dem hohem personellen und zeitlichen Aufwand.

Alternativ können hier modellbasierte Atmosphärenkorrekturverfahren wie z. B. MODTRAN (BERK et al. 1989) oder ATCOR4 (RICHTER 2000) zum Einsatz kommen. Solche Verfahren basieren auf die Berücksichtigung von Atmosphären-Parametern (z. B. Atmosphärendruck- und -temperaturprofilen, Sichtweite, Oberflächenalbedo, Aerosolmodell) bei der Berechnung der am Boden reflektierten Strahlung. Solche Methoden konnten im Rahmen dieser Arbeit leider nicht untersucht und mit den Ergebnissen der *Empirical-Line*-Kalibration verglichen werden, doch werden sich spätere Arbeiten auch mit diesem Thema beschäftigen.

4.3.10 Untersuchungsgebiet Stelle

Um die Aussagekraft von Hyperspektraldaten bei der Flächennutzungskartierung zu ermitteln, sollen in diesem Kapitel exemplarisch zwei unterschiedliche Klassifikationsverfahren beschrieben und angewandt werden. Beide Methoden liefern unterschiedliche Ergebnisse, die im Anschluss bewertet werden. Sie sind in ENVI implementiert, sodass hier keine eigenen Algorithmen zur Anwendung kommen.

4.3.10.1 Beschreibung und Lage des Untersuchungsgebietes

Als weiteres Trainingsgebiet zur Erprobung des *Ground-Truthing*-Verfahrens wurde der Flugstreifen südwestlich von Hellwege ausgewählt, da dieses Gebiet gekennzeichnet ist durch eine enge Nachbarschaft von landwirtschaftlich genutzten Flächen, die bereits abgeerntet waren oder kurz vor der Ernte standen sowie stark heterogenen Heide- und Brachflächen (Abbildung 4-36).



Abbildung 4-36: Untersuchungsgebiet Stelle, südwestlich von Hellwege, Landkreis Rotenburg/Wümme.

4.3.10.2 Hyperspektrale Klassifikationsverfahren

Im letzten Jahrzehnt hat sich die abbildende Spektrometrie als ein Bereich aktiver Forschung und Entwicklung dargestellt. Zur effektiven Nutzung von hyperspektralen Daten muss jedoch zunächst analysiert werden, welche Prozessierungsschritte notwendig sind und welche Auswerteroutinen für die unterschiedlichen Anwendungen es zu entwickeln gilt (BACH 1995, LANDGREBE 1999).

Durch die große Bandanzahl stoßen die traditionellen, multispektralen Klassifizierungsmethoden wie *Isodata*, *Maximum Likelihood* und *Minimum Distance* an ihre Grenzen (ERDAS Inc. 1997). Neue Methoden müssen sowohl die größere Anzahl an Bändern als auch die hohe spektrale Auflösung der Daten berücksichtigen (LANDGREBE 1999). Anspruchsvolle Methoden zur Analyse sollten die spektralen und die räumlichen Muster in den Daten berücksichtigen (BOARDMAN 1999).

Der Unterschied zwischen zwei in der Wellenlänge benachbarten Bändern ist im Allgemeinen sehr klein, die Graustufen-Bilder erscheinen nahezu identisch. Es scheint dabei, als wäre ein großer Teil der Daten verzichtbar und redundant, aber gerade in diesen sehr feinen Unterschieden zwischen zwei benachbarten Bändern können sich die Informationen befinden, die zur Identifizierung der Oberflächen-Materialien führen können. Es ist also wichtig, adäquate Funktionalitäten zur Visualisierung und Analyse von Hyperspektraldaten zu entwickeln, um die essenziellen Informationen aus einer Szene extrahieren zu können.

Im Folgenden sind die wichtigsten derzeit verwendeten Methoden zur Analyse von Hyperspektraldaten aufgelistet (SKUBSKI 2000). Diese unterschiedlichen Methoden sind in den gängigen Softwarepaketen (z. B. ENVI, ERDAS und TNTmips) implementiert, sollen aber im Rahmen dieser Arbeit nicht im Detail beschrieben werden. Die hier zum Einsatz kommenden Methoden sind Fett gedruckt. Die Methoden lassen sich wie folgt gliedern:

- < Methoden zur Ermittlung von *Endmembers* aus den Bilddaten selbst:
 - o *Minimum Noise Fraction Rotation (MNF)*,
 - o *Pixel Purity Index (PPI)*,

- *N-Dimensional Visualizer (NDV)*.
- < Methoden zur Ermittlung von *Endmembers* unter Einbeziehung von Zusatzinformationen:
 - Spektrale Bibliotheken,
 - *Regions of Interest (ROI)* aus anderen Aufnahmen, Vorortrecherche, Trainingsgebiete.
- < Klassifizierungsmethoden:
 - *Spectral Matching*. Zuordnung der Pixel der Szene zu den gewählten bzw. ermittelten Klassen (*Endmembers*),
 - Bestimmung der spektralen Ähnlichkeit.

Die Klassifizierungsmethoden lassen sich wiederum in Voll-Pixel-Identifikationsmethoden und Sub-Pixel-Identifikationsmethoden (Detektion und Klassifikation im Subpixelbereich) unterscheiden:

- < Voll-Pixel-Identifikationsmethoden:
 - Binary Encoding,
 - *Spectral Angle Mapper (SAM)*,
 - Spectral Feature Fitting (SFF).
- < Sub-Pixel-Identifikationsmethoden:
 - Matched Filtering,
 - Mixture Tuned Matched Filtering,
 - Linear Spectral Unmixing,
 - Partial Unmixing.

Abbildung 4-37 zeigt einen standardisierten Verlauf der Klassifikation von hyperspektralen Fernerkundungsdaten. Nach der Korrektur der sensorspezifischen Fehler, der radiometrischen Korrektur, der Entzerrung und Georeferenzierung sollte im Allgemeinen eine Kalibrierung der Daten durchgeführt werden. Nach der Kalibrierung und der Atmosphärenkorrektur, welche häufig schon direkt nach der Aufnahme der Daten automatisch durchgeführt wird, ist es notwendig festzulegen, auf welcher Basis die Zuordnung der Pixel in eine Klasse erfolgen kann.

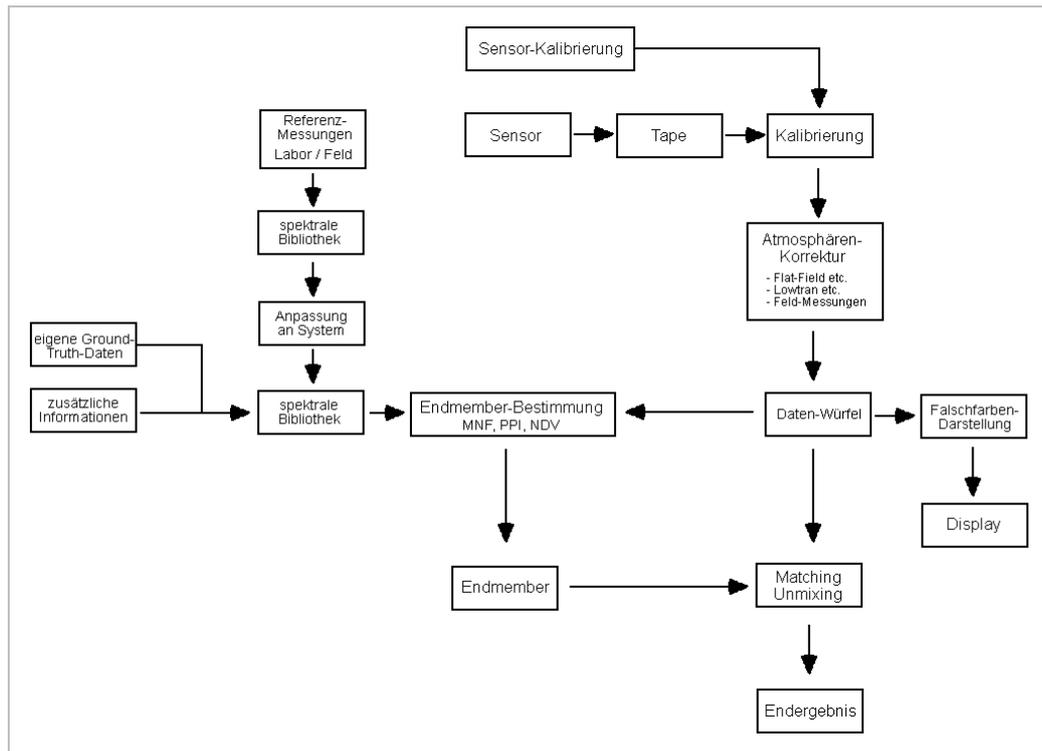


Abbildung 4-37: Standardisierter Verlauf der Klassifikation von hyperspektralen Fernerkundungsdaten (verändert nach BARR 1994 in CAMPBELL 1996).

Dies geschieht durch die Definition von *Endmembers*, also der aus den Bilddaten durch die Klassifikation zu ermittelnden Materialien. Dabei wird sowohl die Anzahl der Klassen bzw. *Endmember* als auch deren spektrale Signatur bestimmt (BOARDMAN 1999). Jeder *Endmember* bezeichnet genau eine gesuchte Oberflächenkomponente.

Nachdem die *Endmember* definiert wurden, kann mit den so genannten Voll-Pixel Identifikationsmethoden das spektrale Profil eines Pixels über alle Bänder einem Referenz-Spektrum zugeordnet werden. Mit anderen Worten: Es wird ein mathematischer Vergleich eines unbekanntes Spektrums mit einem Referenz-Spektrum durchgeführt.

Diese Referenz-Spektren finden sich, wenn sie nicht durch eigene Untersuchungen ermittelt werden, im Allgemeinen in spektralen Bibliotheken. Sie beinhalten Reflexionsspektren verschiedener Oberflächenmaterialien, welche im Labor oder bei Feld-Tests ermittelt und zusammengetragen werden.

Die Zuordnung der Bild-Spektren zu den Referenz-Spektren auf der Basis der spektralen Ähnlichkeit wird durch die Tatsache erschwert, dass in den meisten hyperspektralen Szenen viele Pixel enthalten sind, die aus einer Mischung verschiedener Materialien bestehen (Abbildung 4-38). Dies ist beispielsweise häufig an Kanten, also einer abrupten Änderung des Oberflächenmaterials, innerhalb der Szene der Fall. Diese räumlichen Mischungen von Materialien innerhalb des IFOV eines Pixels führen dazu, dass die spektralen Signaturen der Reflexion ebenfalls gemischt sind (BOARDMAN 1999).

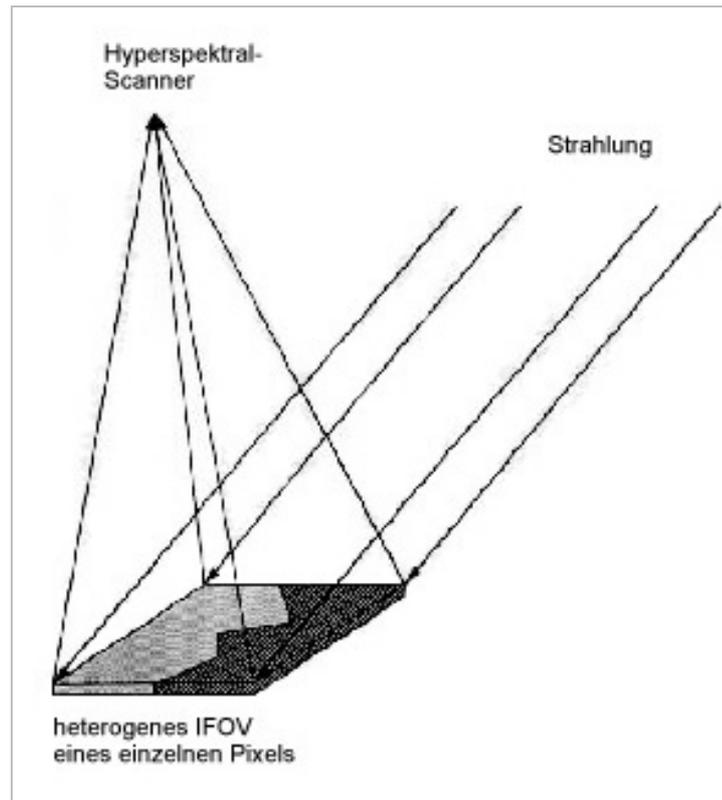


Abbildung 4-38: Spektrale Mischpixel entstehen durch die Aufnahme eines Bereiches auf der Oberfläche, der aus verschiedenen Materialien besteht (BOARDMAN 1999, verändert).

4.3.10.3 Angewandte Auswerteverfahren

Im Folgenden soll vom Flugstreifen „Stelle“ mittels zwei unterschiedlicher Auswerteverfahren eine Flächennutzungskartierung erfolgen und anschließend die Ergebnisse verglichen werden. In Abbildung 4-39 ist der Ablauf der Auswertung schematisch dargestellt. Die Analyse der Daten erfolgt mit der Software ENVI.

Beide Auswerteverfahren basieren auf der *Spectral-Angle-Mapper (SAM)*-Klassifikationsmethode, die in zwei verschiedenen Modi angewandt werden:

- < Bei der so genannten „überwachten“ Klassifizierung wird das Bild auf der Basis von *Ground-Truth*-Erhebungen bzw. vorab definierten *Endmembers* (Trainingsgebieten) klassifiziert.
- < Bei der „unüberwachten“ Klassifizierung werden keine Trainingsgebiete definiert, sondern die Auswahl der *Endmember* erfolgt über eine rein statistische Berechnung der Hyperspektraldaten.

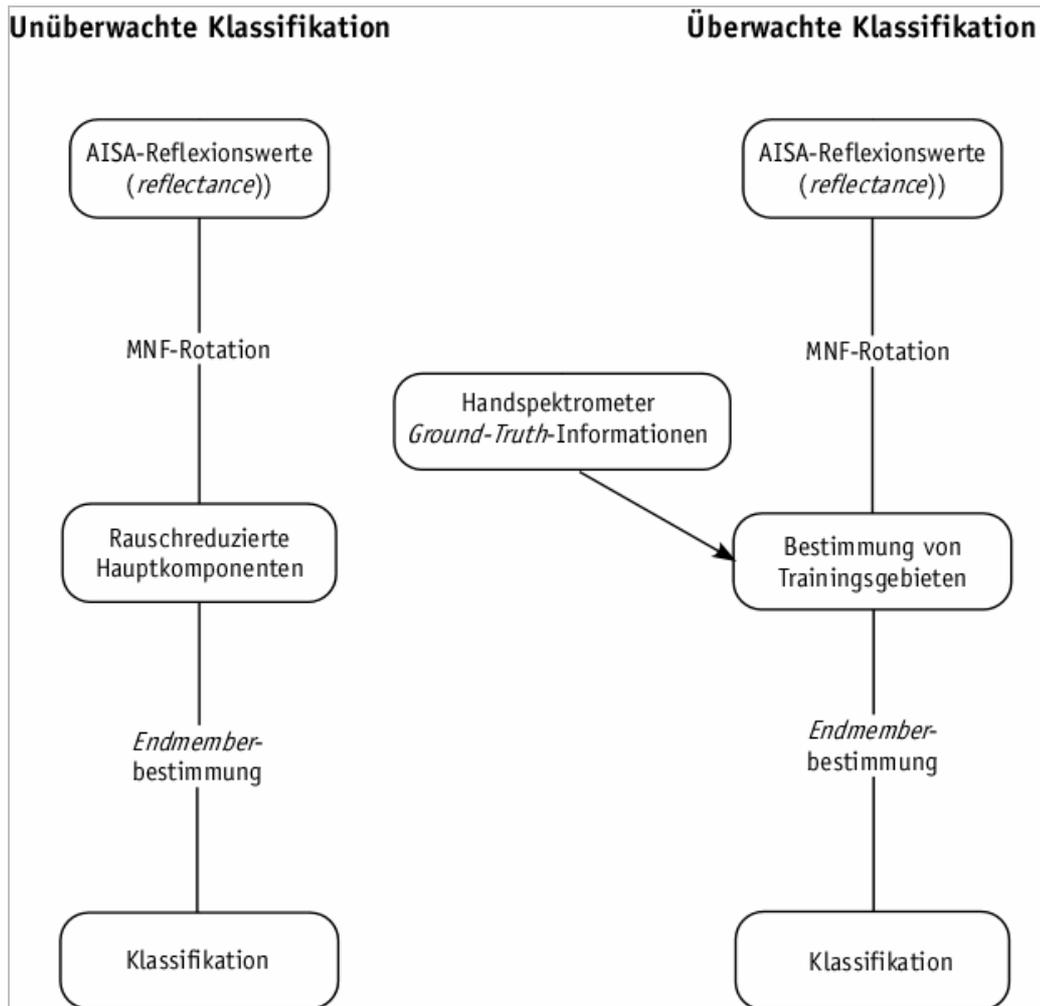


Abbildung 4-39: Fließdiagramm der durchgeführten Klassifikationen.

Auswahl der Trainingsgebiete

Trainingsgebiete können aufgrund von eigenen Geländeerhebungen (Kartierungen, Spektralmessungen etc.) definiert werden, wenn aber eine intensive Geländebegehung zum Zeitpunkt der Befliegung nicht stattfinden kann, weil das Untersuchungsgebiet unzugänglich ist, können Trainingsgebiete z. B. auch auf der Basis von hochaufgelösten Luftbildern bestimmt werden.

Wie aus Abbildung 4-40 ersichtlich, wurden auf der Basis von hochaufgelösten Luftbildern, die zeitgleich zur Hyperspektralmessung aufgenommen wurden, elf Trainingsgebiete benannt, die in die überwachte SAM-Klassifikation einfließen. So wurden u. a. Ackerflächen, die entweder kurz vor der Ernte stehen oder bereits abgeerntet sind, mehrere Grünlandflächen, Brachflächen, Waldflächen und eine versiegelte Fläche (Parkplatz) ausgewählt.

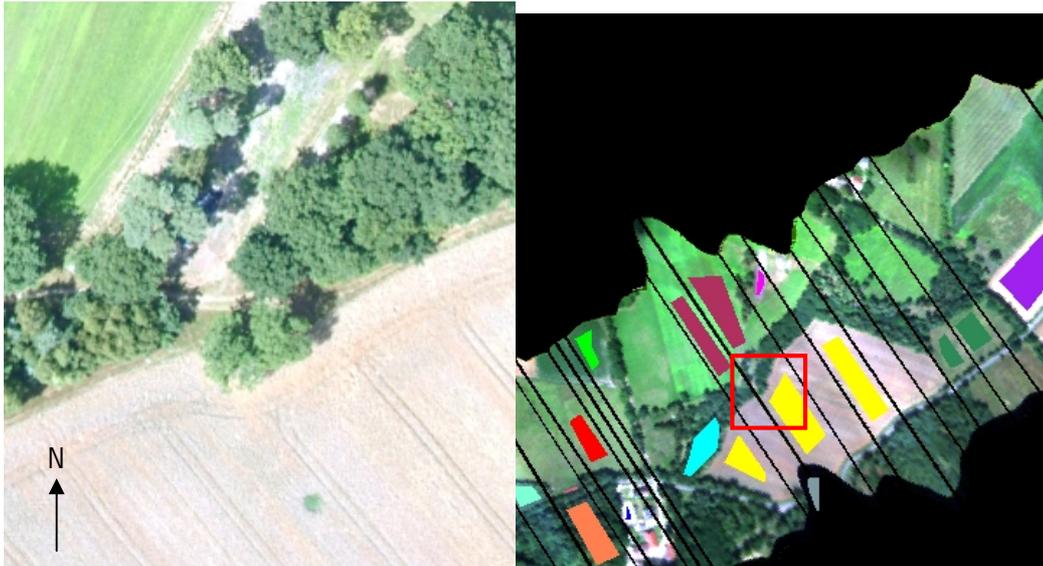


Abbildung 4-40: Links: Ausschnitt eines hochauflösenden Luftbildes, das zur Bestimmung von Trainingsgebieten herangezogen wurde. Rechts: Lage der Trainingsgebiete. Die schwarzen Streifen stellen Datenlücken aufgrund von Aufzeichnungsaussetzern während der Datenakquisition dar.

Hyperspektrale Analyseverfahren

Im ersten Schritt zur Bestimmung der *Endmember* wird eine vorwärts gerichtete MNF-Transformation durchgeführt. Sie isoliert das Rauschen und filtert die Korrelationen zwischen benachbarten Bändern heraus. Die MNF-Transformation beinhaltet eine Hauptkomponenten-Analyse, welche die Bänder nach ihrem Anteil an Rauschen sortiert. Als Ergebnis werden rauschreduzierte MNF-Bänder ausgegeben. Der Eigenwert eines Bandes steht für den Anteil der Variation des Signals, der von dieser Hauptkomponente (von diesem Band) erklärt wird. Je höher dieser Anteil ist, desto stärker ist die Bedeutung des Bandes für die gesamte Szene. Aus diesem Grund werden nur die Bänder mit den höchsten Eigenwerten für die weiteren Analysen ausgewählt. Anzumerken bleibt, dass es sich bei den jetzt zur Verfügung stehenden MNF-Bändern um neu erzeugte Bänder handelt, die aus den Eingangsdaten hervorgegangen sind, und nicht mehr um die Spektralkanäle.

Im nächsten Schritt erfolgt die Bildung eines so genannten *Pixel Purity Index* (PPI). Die *Pixel-Purity-Index*-Methode trennt "reine" Pixel von Misch-Pixeln. Ihr Ziel ist das Auffinden der spektral „reinsten“ Pixel der Szene, aus denen die *Endmember* bestimmt werden können. Die ausgewählten rauschreduzierten Bänder aus der MNF-Transformation werden als Eingangsdaten verwendet. Um die Analyse durchführen zu können, muss die Anzahl der Iterationen und der Schwellenwert angegeben werden, ab welchem ein Pixel als extrem eingestuft wird. Die Anzahl der Iterationen gibt an, wie häufig die Daten auf einen zufällig im Raum aufgespannten Vektor projiziert werden. Je mehr Iterationen durchgeführt werden, desto sicherer ist das Ergebnis. Hier muss abgewogen werden zwischen Ergebnis-Qualität und zur Verfügung stehender Zeit. Der Schwellenwert-Faktor gibt an, ab wann ein Pixel als „extrem“ eingestuft wird. Bei-

spielsweise markiert ein Faktor von 2 alle Pixel, die mehr als 2 Werteinheiten von den extremen Pixeln (nach oben und unten) entfernt sind, als „extrem“. Ein neues Band wird erzeugt (*pixel purity index image*), welches angibt, wie häufig ein Pixel als „extrem“ eingestuft wurde. Hellere Pixel repräsentieren spektral „extremere“ Bereiche, und stehen für „reine“ Pixel, dunkle Pixel sind spektral weniger „rein“.

Im dritten Schritt 3 wird der „*N-Dimensional Visualizer*“ verwendet um die spektral „reinen“ Pixel (Import vom PPI) im n-dimensionalen Merkmalsraum zu visualisieren und die *Endmember* zu bestimmen. Die ausgewählten Klassen werden anschließend als *region of interest* (ROI) exportiert und bei der Klassifikation verwendet. Alternativ zu der rein bildbasierten Methodik der *Endmember*-Bestimmung wäre es auch möglich ein oder mehrere *Endmember* direkt aus den Bilddaten zu ermitteln, in dem visuell aufgrund von Objektsignaturen (Textur, Struktur, Helligkeit, Form, Muster etc.) ROI abgegrenzt werden oder auf eine spektrale Bibliothek zurückgegriffen wird.

Im letzten Schritt erfolgt die Klassifizierung der Daten, in diesem Fall nach der *Spectral-Angle-Mapper* (SAM)-Methode (KRUSE et al. 1993). Der *Spectral Angle Mapper* misst den Winkel zwischen unbekanntem Spektrum und Referenz-Spektrum im n-dimensionalen Merkmalsraum. Der Winkel dient als Maß für die spektrale Ähnlichkeit der beiden Spektren. Da nur die Richtung der Spektren verglichen wird, ist SAM unempfindlich gegenüber Beleuchtungseinflüssen.

Vergleich der Klassifikationsergebnisse

Bei der Klassifikation der Daten wird zwischen einer so genannten „überwachten“ Klassifizierung (dabei wird das Bild auf der Basis von eigenen Erhebungen bzw. vorab definierten Trainingsgebieten klassifiziert) und einer „unüberwachten“ Klassifizierung (wobei Klassen nach rein statistischen Verfahren gebildet werden) unterschieden. Beide Methoden liefern unterschiedliche Ergebnisse, die es zu bewerten gilt. Abbildung 4-41 zeigt einen Vergleich der überwachten und der unüberwachten SAM-Klassifikation. Bei der unüberwachten Klassifikation wurden mehr *Endmember* ermittelt als bei der überwachten Klassifikation (18+1 gegenüber 11+1).

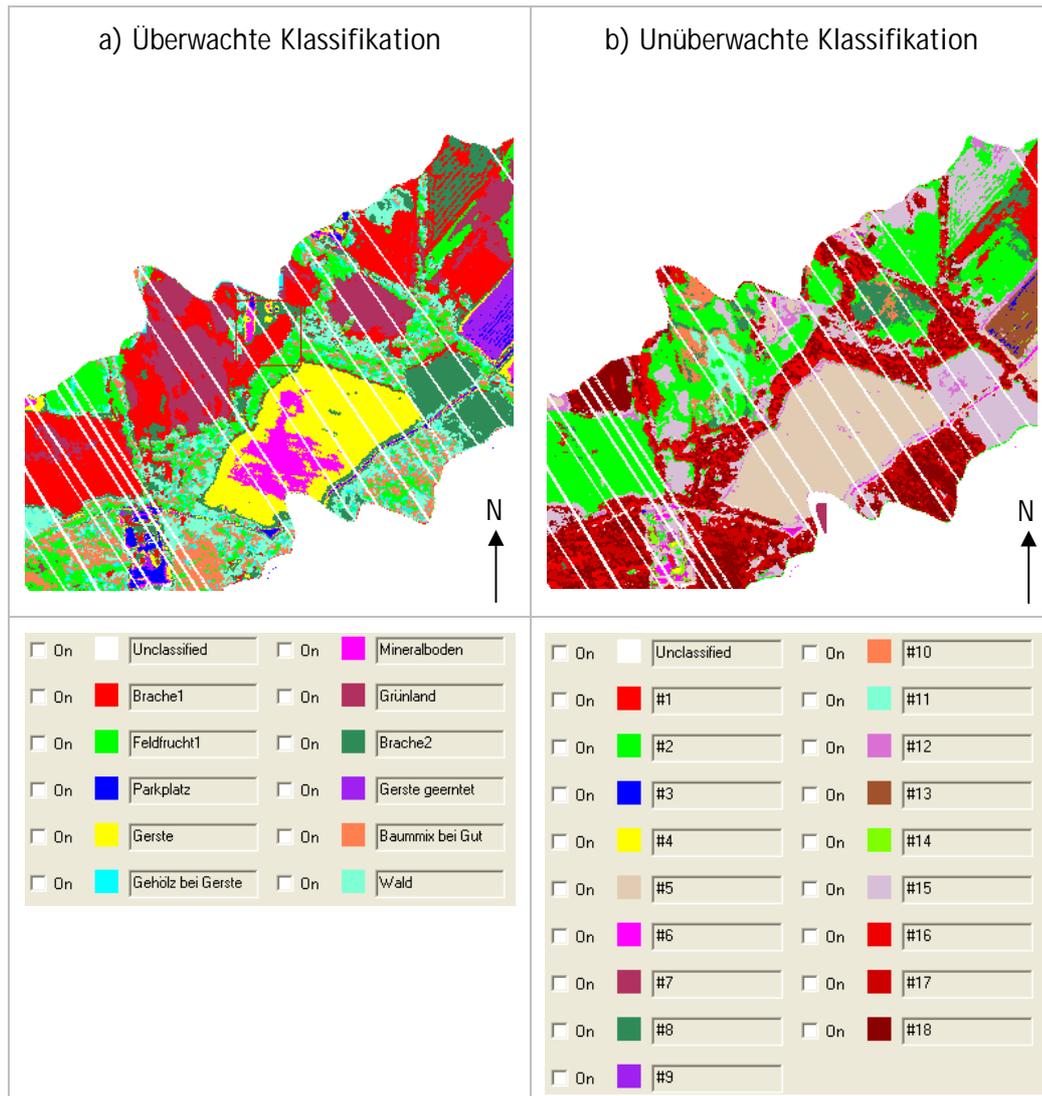


Abbildung 4-41: Vergleich der Ergebnisse einer überwachten und unüberwachten SAM-Klassifikation für das Gebiet „Stelle“. Die weißen Streifen stellen Datenlücken aufgrund von Aufzeichnungsaussetzern während der Datenakquisition dar.

Abbildung 4-41 (links) zeigt das Ergebnis einer „überwachten“ Klassifikation auf der Basis von repräsentativen *Ground-Truth*-Daten. Dabei ergibt sich die Anzahl der Klassen aus der Anzahl der für die Analyse ausgewählten *Ground-Truth*-Informationen (in diesem Fall elf Klassen und eine unklassifizierte). Das bedeutet, dass bei dieser Methode die Auswahl von repräsentativen Trainingsgebieten bereits während der Geländebegehung erfolgen muss und gute Kenntnisse des Untersuchungsgebietes vorhanden sein müssen. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Klassifizierungsergebnisse einfacher zu verstehen und zu interpretieren sind, weil die Ausgangsdaten bekannt sind. Der Nachteil dieser Methode ist, dass für ein befriedigendes Klassifikationsergebnis deutlich mehr *Ground-Truth*-Erhebungen durchgeführt werden müssen.

Bei der unüberwachten Klassifizierung fließen keine Geländeinformationen in die Berechnung ein, sondern die Klassen werden nur aufgrund von feinsten spektralen Unterschieden zwischen den einzelnen Bildpixeln berechnet. Als Berechnungsergebnis wer-

den fast doppelt so viele Klassen wie bei der überwachten Klassifikation ermittelt, was ein deutlich differenzierteres Klassifikationsbild ergibt (Abbildung 4-41, rechts). Aufgrund der hohen hyperspektralen Auflösung wurden Merkmale herausgearbeitet, die während der Geländearbeit nicht aufgefallen sind und beim *Ground Truthing* nicht erfasst wurden. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass die Zuweisung der rechnerisch ermittelten Klassen zu real existierenden Geländemerkmale im Nachhinein erfolgen muss, um das Bild interpretieren zu können.

Auch bei diesem Verfahren kann erst ein Vergleich mit weiterführenden Informationen vom Untersuchungsgebiet Auskunft über die Güte der Klassifikation geben. Eine erste Bewertung des Ergebnisses der überwachten Klassifikation fällt wenig überzeugend aus. So wurden beispielsweise Teile eines Gerstefeldes als Mineralboden oder Teile einer abgeernteten Fläche als Parkplatz ausgewiesen. Im Vergleich dazu erscheint die Klassenbildung der unüberwachten Klassifikation nachvollziehbarer. Die Landnutzungsformen Wald, Acker, Grünland, Brache sind klar unterscheidbar, ob allerdings die Anzahl der Klassen und ob die Unterschiede innerhalb bestimmter Flächen auf Bodenfeuchte, Bodenverdichtung oder auf Vegetationsschäden zurückzuführen ist, ist erst durch eine eingehende Überprüfung festzustellen.

5 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

5.1 Nachteile der Hyperspektraltechnik

Grundsätzlich gilt, dass die Hyperspektraltechnik im Vergleich zur klassischen multispektralen Datenerhebung mit relativ hohem Aufwand betrieben werden muss, angefangen bei der Sensorkalibrierung, über die verschiedenen Korrekturverfahren und dem speziellen *Ground Truthing*, bis zur abschließenden Interpretation und Klassifikation der Daten.

Im Gegensatz zu multispektralen Datensätzen, werden hyperspektrale Aufnahmen nicht mehr „nur“ als Bilder verstanden und überwiegend qualitativ ausgewertet, sondern können aufgrund ihrer viel- und schmalbandigen Auflösung als physikalische Messung betrachtet werden. Das hat zur Folge, dass eine exakte Kalibrierung des Sensors und der Messdaten die Grundvoraussetzung darstellt, um quantitative Aussagen aus den Fernerkundungsdaten zu treffen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde wegen der unzureichenden Expertise auf dem Gebiet der Sensorkalibrierung sowie wegen fehlender feinoptischer Messvorrichtungen auf eine eigene Kalibrierung des Sensors verzichtet. Die Kalibrierung des Sensorkopfes erfolgte in regelmäßigen Abständen in den Laboren des Herstellers.

Die Kalibrierung der Messdaten (z. B. Atmosphärenkorrektur) kann mit Hilfe von modellbasierten Verfahren, oder, wie im vorliegenden Fall, auf der Basis von parallel zur Befliegung erhobenen Bodenspektren erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte leider kein Vergleich beider Methoden stattfinden, sodass insbesondere in Bezug auf die Qualität der Korrekturergebnisse keine abschließende Aussage gemacht werden kann. Bei der Korrektur mittels Bodenspektren besteht der wesentliche Nachteil darin, dass der Planungs- und Messaufwand erheblich ist, da nahezu gleichzeitig zur Befliegung das gesamte Untersuchungsgebiet stichprobenartig erfasst werden sollte.

Liegen die Daten in korrigierter Form schließlich vor, kann mit der eigentlichen Auswertung begonnen werden. Hier ist die grundsätzliche Entscheidung zu treffen, ob eine überwachte oder eine unüberwachte Klassifizierung angewandt werden soll. Die Vor- und Nachteile beider Verfahren können zusammengefasst wie folgt beschrieben werden: Die unüberwachte Klassifizierung bietet gegenüber der überwachten Methode den Vorteil, dass die Ausgangsdaten nach reinen statistischen Kriterien (z. B. Pixel-Ähnlichkeiten bzw. -Unterschiede) berechnet werden, ohne dass schon im Vorhinein die erwarteten Klassen bekannt sind. In der Regel berechnet die unüberwachte Klassifizierung von (hyperspektralen) Daten eine deutlich höhere Anzahl an *Endmembers* als die überwachte Klassifikation. Doch hier wird auch der Nachteil dieser Methode deutlich, dass nämlich eine Übereinstimmung der rein rechnerisch ermittelten Klassen mit den realen Begebenheiten im Gelände nun im Nachhinein erfolgen muss.

Bei der überwachten Klassifizierung läuft das Verfahren genau anders herum ab, denn hier werden die zu ermittelnden Klassen vorgegeben. Dieses Verfahren hat den großen

Vorteil, dass das Ergebnis auf Anhieb einsichtig ist, da die berechneten *Endmember* einer vorher bekannten bzw. erwarteten Klasse zugewiesen werden können. Der große Nachteil dieses Verfahrens besteht allerdings darin, dass bereits am Anfang der Prozesskette Anzahl und Ausprägung der Klassen festgelegt werden, und womöglich das Potenzial von hyperspektralen Daten, feinste spektrale Unterschiede zu unterscheiden, unterdrückt wird.

5.2 Einsatzgrenzen des krangestützten Vermessungssystems

Neben den Vorteilen der hohen räumlichen und spektralen Detailschärfe gibt es eine Reihe von Nachteilen, die die Einsatzmöglichkeiten eines krangestützten Vermessungssystems stark beschränken. An erster Stelle ist hier die geringe Flächenleistung zu nennen. So lassen sich je nach Höhe des Kranauslegers von 15-30 m pro Standort 750 - 2.000 m² Fläche erfassen. Für den eigentlichen Scanvorgang in höchster Auflösung werden ca. 5-10 Min. und für den Standortwechsel und die Neuausrichtung des Auslegers weitere 20 Min. benötigt. Wenn man dann noch berücksichtigt, dass zumindest bei der Hyperspektralaufnahme nur ± 2 Stunden um den Sonnenhöchststand gemessen wird, um den Schattenanteil im Bestand gering zu halten, beschränkt sich die Anzahl der vermessenen Standorte auf 5-6 pro Tag, was einer Gesamtfläche von nur ca. 5.000 – 12.000 m² entspricht.

Ein weiterer Aspekt schränkt die Nutzung eines solchen terrestrischen Messsystems stark ein, nämlich wenn es nicht möglich ist, das Untersuchungsgebiet betreten zu können/dürfen, z. B. bei schlechter Beschaffenheit der Zuwegung. Dies ist keine unerhebliche Einschränkung, denn in der Regel liegen gerade die für die Biotopkartierung interessantesten Beobachtungsobjekte in Natur- oder Landschaftsschutzgebieten, in denen der Zutritt, zudem mit schwerem Gerät, eingeschränkt ist.

Doch auch wenn der Zutritt zu einem Gebiet kein Problem darstellt, sollte die Lage der Untersuchungsflächen so gewählt werden, dass schnelle Standortwechsel des gesamten Kransystems eine hohe Flächenleistung ermöglichen. Am besten geeignet sind all die Untersuchungsflächen, in denen ein relativ gut ausgebautes Wegenetz vorhanden ist, wie z. B. in Obstbaumplantagen oder Parkanlagen.

All die genannten Einschränkungen machen deutlich, dass die krangestützte Vermessung als ein probates System immer dort eingesetzt werden kann, wo punktuell bzw. lokal eine flächenhafte, hohe Informationsdichte erzielt werden soll, und wo die hohe räumliche Auflösung im Subdezimeter-Bereich das entscheidende Auswahlkriterium darstellt.

5.3 Vor- und Nachteile hoher Detailschärfe

Für Fragestellungen, bei denen die hyperspektrale Information nicht erforderlich ist, aber dafür eine hohe Detailschärfe im Vordergrund steht, bietet sich eine kostengünstigere und technisch „einfachere“ Lösung an: Die Verwendung von krangestützt erfassten hochauflösenden digitalen Farbfotos. Hierzu wurden in verschiedenen selbst durch-

geführten Forschungsprojekten erste Erfahrungen gesammelt. Beispielhaft sei hier die Verwendung von Luftbildern für die Erfassung von Verteilungsmustern, die Ermittlung der Biodiversität sowie dem Monitoring der Ausbreitungsdynamik von Pflanzengesellschaften genannt. Im BMBF-Projekt „BIOLOG“ (KÖHLER & MÜLLER 2003) wurde die natürliche Vegetationsentwicklung auf der ehemaligen Bauschuttdeponie Siedenburg, Bremen, im Rahmen eines 20-jährigen Dauermonitorings untersucht. Die Daten der Vermessung einer Testfläche konnten zusammen mit erfahrenen Feldbiologen bzw. Botanikern hinsichtlich ihrer Eignung für die Erfassung von Vegetation überprüft werden. Eine erste Einschätzung besagt, dass sie vegetationskundlich vor allem deswegen interessant sind, weil „sie auf der Basis der Vegetationserfassungen am Boden (Grundei- chung) mittelskalierte Vegetationserhebungen selbst in schwer zugänglichem Gelände zulassen“ (KÖHLER & MÜLLER 2003). Insbesondere wenn Bodenreferenzpunkte sorgfältig eingemessen werden und eine exakte Positionierung des Systems erfolgt, können wiederholte Messungen erfolgen und Zeitreihenanalysen stattfinden.

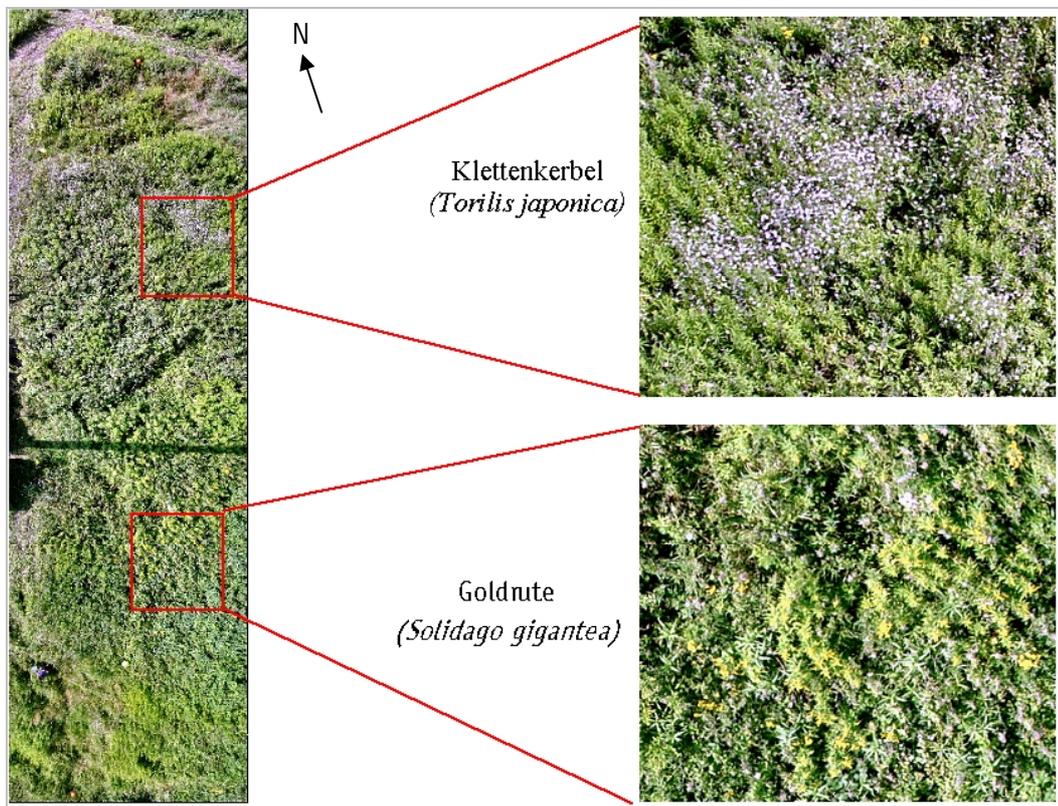


Abbildung 5-1: Digitalphotographie einer Sukzessionsfläche am 15. August 2001. Die Ausschnittsvergrößerung zeigen den weißen Aspekt von Klettenkerbel in Goldruten-Hochstauden (oben rechts); Blühende Goldruten-Kohorte neben Brombeeren, dazwischen Kratzbeere (unten rechts) (KÖHLER & MÜLLER 2003).

An der obigen Abbildung 5-1 wird deutlich, dass bei zunehmender Detailschärfe die Auswertung und Interpretation der Daten immer schwieriger wird. So können die in der Natur fließenden Übergänge von einer Pflanzengesellschaft in die andere zwar visuell wahrgenommen werden, doch die Festlegung einer klaren Grenze zwischen zwei Pflanzengesellschaften ist außerordentlich schwierig. Für die Durchführung von automatischen Klassifikationen werden hier aufwändige Bildverarbeitungsmethoden zum Einsatz

kommen müssen. Nichtsdestotrotz kann ein einfaches Luftbild dennoch von großem Nutzen sein, z. B. wenn es während der Feldarbeit zur Orientierung in unübersichtlichem Terrain dient oder als Ausgangsdatenbasis bei der Erstellung bzw. Auswertung von Geländekartierungen hinzugezogen wird.

5.4 Experimenteller Systemaufbau

Es muss nochmals betont werden, dass die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Messsysteme, also sowohl das krangestützte als auch das flugzeuggestützte System, im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden und daher ein gewisser experimenteller Charakter bei der Bewertung der erzielten Ergebnisse nicht vergessen werden darf. Auch was die eingesetzten Scanner anbelangt, muss darauf hingewiesen werden, dass sich beim Hyperspektralscanner AISA um ein *low-cost*-System (Kaufpreis: < 100.000 US\$) (SPECIM 1997) handelt, verglichen mit anderen Hyperspektralsystemen wie z. B. HYMAP (Kaufpreis: 1,7-2 Millionen US\$) (LAO & WONG 2000) oder DAIS. Diese Systeme werden in der Regel an Forschungsinstitutionen (z. B. DLR) entwickelt, die über eine große personelle sowie apparative Ausstattung verfügen. Aus diesem Grunde wird die radiometrische und geometrische Qualität der hier vorgestellten Daten den Standard der eben genannten Systeme wahrscheinlich nicht erreichen. Ein direkter Vergleich von AISA- und HYMAP-Daten war im Rahmen dieser Arbeit leider nicht möglich und soll in späteren Studien nachgeholt werden.

Doch unter bestimmten Rahmenbedingungen findet gerade dieser *low-cost*-Ansatz große Akzeptanz bei Anwendern, zum Beispiel wegen der Möglichkeit, Befliegungen auch kurzfristig durchführen zu können, oder weil das System aufgrund seiner Kompaktheit und eigenen Energieversorgung auch in kleinen Flugzeugen (z. B. Motorsegler) eingearüstet werden kann.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz von Fernerkundung in der landschaftsökologischen Forschung ist eine weit verbreitete Methode um die natürlichen Prozesse zu verstehen, anthropogene Aktivitäten zu planen und ihre Auswirkungen zu kontrollieren. Die luft- und satellitengestützte Erdbeobachtung ermöglicht durch ihren technischen Fortschritt eine immer bessere Charakterisierung des ökologischen Zustandes und der Beeinflussungen unserer Umwelt durch den Menschen sowie deren räumliche und zeitliche Veränderungen. Die Fernerkundung macht sich den Umstand zunutze, dass die spektralen Signaturen der Untersuchungsobjekte von deren Eigenschaften beeinflusst werden. Je genauer die Messauflösung der Systeme ist, umso besser können feine Unterschiede der Spektralsignaturen erfasst werden. Die derzeit verfügbaren satellitengestützten Fernerkundungssysteme haben den großen Vorteil, dass sie operationell erprobt zuverlässige Daten produzieren und die Datenauswertung mit robusten, wissenschaftlich anerkannten Methoden erfolgt. Der wesentliche Nachteil dieser Systeme ist, dass ihre relativ schlechte räumliche, spektrale und zeitliche Auflösung nicht für alle Anwendungen geeignet ist. Hier können die niedriger fliegenden flugzeuggestützten Systeme zum Einsatz kommen, die mit hochpräzisen Sensoren ausgestattet außerordentlich detaillierte Daten aufnehmen.

Die Rolle von Maßstab und Auflösung ist ein zentrales Thema in den Geowissenschaften. Die erforderliche geometrische Auflösung hängt im besonderen Maß von der Fragestellung ab, sodass sowohl großmaßstäbige als auch kleinmaßstäbige Systeme ihre Vor- und Nachteile haben und sie als sich ergänzende Verfahren betrachtet werden sollte. Im Rahmen der vorgelegten Arbeit wird ein multisensorielles System für die erdnahe Erdbeobachtung vorgestellt, das sowohl krangestützt als auch flugzeuggestützt zum Einsatz kommt, und primär für großmaßstäbige Kartierungen konzipiert wurde.

Die eingesetzte Nutzlast besteht aus dem Hyperspektralscanner AISA, der in der höchsten Auflösung bis zu 286 schmalbandige Kanäle im Wellenlängenbereich 422 bis 900 nm aufzeichnet, und einem 3D-Laserscanner für die gleichzeitige Aufnahme von hochgenauen digitalen Oberflächenmodellen. Optional kann auch eine digitale Kamera mitgeführt werden, die hochaufgelöste Farbbilder liefert. In dieser Arbeit werden zwei typische Missionstypen vorgestellt, die auf einem krang- und einem flugzeuggestützten Messaufbau basieren.

Das krangestützte Vermessungssystem, bestehend aus einem Hyperspektralscanner und einem 3D-Laserscanner, wurde für die Vermessung von kleinen, ca. 20 x 50 m großen Parzellen eingesetzt. Die erreichten räumlichen Auflösungen betragen nach der geometrischen Korrektur 10 cm bei voller spektraler Auflösung von 286 Kanälen für den Hyperspektralscanner bzw. einer räumlichen Auflösung von 5 cm und einer Höhenauflösung von 2,5 cm für den Laserscanner. Nach einer ausführlichen Beschreibung der vorgenommenen Datenaufbereitung, die sowohl radiometrische wie auch geometrische Verfahren beinhaltet, liegt der Schwerpunkt bei der Vorstellung einer krangestützten Messkampagne. Im Rahmen dieser Kampagne wurde das Potenzial der erdnahen, multi-

sensoriellen Erdbeobachtung für Fragestellungen in der Landwirtschaft untersucht. Als Untersuchungsgebiet wurde eine landwirtschaftlich genutzte Testfläche von 50 m x 100 m südöstlich von Wildeshausen gewählt, auf denen unterschiedliche Kompostvarianten und -mengen mit dem Ziel aufgebracht wurden, die Bodeneigenschaften zu verbessern und die Ernteerträge (hier Winterroggen) zu steigern. Anhand dieser Testflächen wurden zwei konkrete Fragestellungen formuliert, nämlich ob die Auswirkungen der unterschiedlichen Kompostaufbringung mit Methoden der erdnahen, multisensoriellen Erdbeobachtung nachzuweisen sind, und falls ja, zu welchem Zeitpunkt eine Ernteprognose gestellt werden kann. Die Auswertung der Höhendaten ergab, dass die einzelnen, unterschiedlich bewirtschafteten Parzellen in ihrer Ausprägung im Höhenbild bereits in der Jugendphase erkennbar sind, und dass bereits ca. zwei Monate vor der Ernte eine gute Übereinstimmung zwischen der Wuchshöhe und den später erzielten Ernteerträgen vorliegt. Bei der Analyse der Hyperspektraldaten konnten auf der Basis des Vitalitätsindex NDVI ebenfalls die einzelnen Parzellen herausgestellt werden. Wie bei den Höhendaten, wurden auch hier bereits ca. zwei Monate vor der Ernte die unterschiedlichen Ernteerträge erkennbar.

Als Ergänzung zum krangestützten, multisensoriellen Vermessungssystem für lokale, kleinräumige Gebiete wurde der Hyperspektralscanner AISA in einem nächsten Entwicklungsschritt flugzeuggestützt eingesetzt. Durch diesen Schritt wird die für landschafts-ökologische Fragestellungen geforderte Flächenleistung deutlich verbessert, wenn auch auf Kosten der spektralen und räumlichen Auflösung (35 Kanäle, 2 m Pixelauflösung). Das System kam in einer Cessna 172 zum Einsatz, und wurde sowohl bezüglich Software als auch Hardware an die Besonderheiten einer flugzeuggestützten Vermessung angepasst. Hierzu gehört auch die Adaption der diversen Rohdatenkorrekturverfahren, insbesondere die radiometrische Korrektur der Daten auf der Basis von Referenzspektren und die geometrische Entzerrung der Rohdaten auf der Basis von hochpräzisen Navigationsdaten. Im Rahmen einer Messkampagne wurde am 15.07.2003 ein 40 km östlich von Bremen liegendes Testgebiet befliegen, das sich durch seine landschaftliche Vielfalt auszeichnet. Ziel der Befliegung war es, radiometrische Kalibrationsverfahren auf der Basis von Referenzspektren (*Empirical-Line*-Kalibrierung) anzuwenden, sowie das Potenzial von unüberwachten gegenüber überwachten hyperspektralen SAM-Klassifikationsverfahren zu vergleichen. Dabei ergab sich, dass die atmosphärische Korrektur mittels der *Empirical-Line*-Methode zu guten Ergebnissen führte, wobei ein Vergleich mit modellbasierten Korrekturmethode im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgte. Als Klassifikationsmethode kam die SAM-Methode zum Einsatz. Bei der unüberwachten Klassifizierung fließen keine Geländeinformationen in die Berechnung ein, sondern die Klassen werden nur aufgrund von feinsten spektralen Unterschieden zwischen den einzelnen Bildpixeln berechnet. Bei der unüberwachten Klassifikation wurden fast doppelt so viele Klassen gebildet wie bei der überwachten Klassifikation, was ein viel differenzierteres Bild ergibt. Der Nachteil der Methode besteht darin, dass die Zuweisung der rechnerisch ermittelten Klassen zu real existierenden Geländemerkmale im Nachhinein erfolgen muss, um das Bild interpretieren zu können.

Neben den Vorteilen der hohen räumlichen und spektralen Detailschärfe gibt eine Reihe von Nachteilen, die die Einsatzmöglichkeiten eines krangestützten Vermessungssystems

stark beschränken. An erster Stelle ist hier die geringe Flächenleistung zu nennen und die hohe Abhängigkeit von der Möglichkeit, das Untersuchungsgebiet betreten zu können/dürfen, sowie die Notwendigkeit einer guten Beschaffenheit der Zuwegung. All die genannten Einschränkungen machen deutlich, dass die krangestützte Vermessung als ein probates System immer dort eingesetzt werden kann, wo punktuell bzw. lokal eine flächenhafte, hohe Informationsdichte erzielt werden soll, und wo die hohe räumliche Auflösung im Subdezimeter-Bereich das entscheidende Auswahlkriterium darstellt. Auch die außerordentlich hohe räumliche Auflösung erschwert die Auswertung und Interpretation der Daten. So können die in der Natur fließenden Übergänge von einer Pflanzengesellschaft in die andere vom menschlichen Betrachter zwar visuell wahrgenommen werden, doch die automatische Festlegung einer klaren Grenze zwischen zwei Pflanzengesellschaften auf der Basis von Bildauswertungsverfahren ist außerordentlich schwierig. Für die Durchführung von automatischen Klassifikationen werden hier aufwändige Bildverarbeitungsmethoden zum Einsatz kommen müssen. Dennoch bildet das hier vorgestellte System aufgrund seiner flexiblen Systemarchitektur und kompakten Bauform eine Alternative zu den diversen *high-end*-Systemen, insbesondere weil durch die Möglichkeit, das System in verschiedenen Flugsystemen einzusetzen, auch kurzfristig Befliegungen durchgeführt werden können.

7 LITERATUR

ADAM, M.L., PHILPOT, W.D., NORVELL, W.A. (1999): Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation. - *Int. J. Remote Sensing*, 20, 3663-3675.

ADAMS, M.L., NORVELL, W.A., PHILPOT, W.D., PEVERLY, J.H. (2000): Spectral detection of micronutrient deficiency in 'Bragg' soybean. - *Agronomy Journal*, 92, 261-268.

AIROBOTICS (1999): Integrierte Nutzung von GIS und erdnaheer Erdbeobachtung in der Landwirtschaft (INGEER). - Dokumentation eines gemeinsamen Forschungsvorhabens der Abteilung Physiogeographie der Universität Bremen und der Fa. airobotics GmbH, Bremen, unveröffentlicht.

AIROBOTICS (2003): Technical details of AISA-DAQ. - Technische Dokumentation, unveröffentlicht.

ALBERTZ, J. (1991): Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbilder: Eine Einführung in die Fernerkundung. - Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

ASD (Analytical Spectral Devices, Inc.)(1999): Technical Guide, 3rd edition. - Boulder, CO, USA

BACH, H. (1995): Die Bestimmung hydrologischer und landwirtschaftlicher Oberflächenparameter aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. - Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe B, Band B21, Institut für Geographie der Universität München.

BANNARI, A., MORIN, D., BONN, F., HUETE, A. R. (1995): A Review of Vegetation Indices. - *Remote Sensing Reviews*, Vol. 13, 95-120.

BARUTH, B., BORG, E., VAJEN, H.-H. (1996): Entwicklung von Methoden zur Analyse und Beschreibung räumlich geometrischer Strukturen in Fernerkundungsdatensätzen. - *DLR-Nachrichten*, 83, 11-16.

BATUT, A. (1890): La photographie aérienne par cerf-volant. (Nachdruck). - In: AÜTHA, D., NEGRE, S., DE BEAUFFORT, G., FOSSET, R. (1988): Labrugière – berceau der l'aérophotographie par cerf-volant/birthplace of kite aerophotography. Arthur Batut 1846-1918.

BÄUMKER, M., BRECHTKEN, R., HEIMES, F.J., RICHTER, T. (1999): Direkte Georeferenzierung mit dem Luftaufnahmesystem LEO. - In: *Proceedings 10. Internationale Geodätische Woche*, Obergurgl, 21.2.-27.2.1999.

BERK, A., BERNSTEN, L.S. and ROBERTSON, D.C. (1989): MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN7. - Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, GL-TR-89-0122, pp. 38.

BIGRAS, C. (1997): Kite aerial photography of the Axel Heiberg Island Fossil Forest. - In: ASPRS (Hrsg.): *Proceedings of the First North American Symposium on Small Format Aerial Photography*, Oct. 14-17 1997, Cloquet, Minnesota, USA, 147-153.

- BLACKBURN, G.A. (1998): Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. - *Int. J. Remote Sensing*, 19, 657–675.
- BLACKMER, T.M., SCHEPERS, J.S., VARVEL, G.E. (1994): Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. - *Agronomy Journal*, 86, 934-938.
- BOARDMANN, J., KRUSE, F.A., GREEN, R.O. (1995): Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. - *Summaries of the Sixth JPL Airborne Earth Science Workshop*, Pasadena, CA.
- BOARDMAN, J. (1999): *Hyperspectral Data Analysis: An Adventure in High Dimensional Convex Geometry*. - <http://nit.colorado.edu/remsens/freeman/index.html> (kopiert 2001).
- BOISSARD, P., POINTEL, J.-G., HUET, P. (1993): Reflectance, green leaf area index and ear hydric status of wheat from anthesis until maturity. - *Int. J. Remote Sensing*, 14, 2713-2729.
- BÜRKERT, A., MAHLER, F., GERARD, B. (1997): Mit dem Fesselballon auf Spurensuche. Luftaufnahmen für die Landwirtschaft. - *Forschung – Mitteilungen der DFG 1997 (2-3)*, 11-14.
- BUSCHMANN, C. (1993): Fernerkundung von Pflanzen. Ausbreitung, Gesundheitszustand und Produktivität. - *Naturwissenschaften* 80, 439-453.
- BUSEMEYER, K.-L. (1987): Zur Konzeption eines ferngelenkten, gefesselten Heißluftkammerträgersystems. - In: ISPRS/DBM (Hrsg.): *Luftaufnahmen aus geringer Flughöhe (= Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbaumuseum, 41)*, 49-56.
- CLEVERS, J. G. P. W. (1994): Imaging spectrometry in agriculture – plant vitality and yield indicators. - In HILL, J., MEGIER, J. (Hrsg.): *Imaging Spectrometry – a Tool for Environmental Observations*. ECSC, EEC, EAEC, Brüssel, Luxembourg, 193-219.
- CLEVERS, J. G. P. W. (1997): A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on remote sensing data. - *Remote Sensing of Environment*, 61, 221-228.
- CURRAN, P. J. (1985): *Principles of Remote Sensing*. - Longman Scientific & Technical, Hong Kong.
- DU, Q., CHANG, C.-I. (2001): Linear constrained distance-based discriminant analysis for hyperspectral image classification. - *Pattern Recognition*, 34, 361-373.
- DWYER, J.L., KRUSE, F.A., LEFKOFF, A.B. (1995): Effect of empirical versus model-based reflectance calibration on automated analysis of imaging spectrometer data: a case study from the Drum mountains, Utah. - *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, 1247-1254.
- ENVI (2001): *The Environment for Visualizing Images, Version 3.4*, Research Systems Inc., Boulder, Colorado, USA.
- ERASMI, S. (2002): *Analyse spektroradiometrischer in situ Messungen als Datenquelle für teilflächenspezifische Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen*. - Dissertation, Universität Göttingen.

- ERDAS Inc. (1997): ERDAS-Field-Guide. – Fourth Edition, Atlanta.
- EROL, H., AKDENIZ, F. (1996): A multispectral classification algorithm for classifying parcels in an agricultural region. - Int. J. Remote Sensing, 17, 3657-3371.
- FROST & SULLIVAN (2002): World Unmanned Aerial Vehicle Market. - #A282-16.
- GRANT, L. (1987): Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. – Remote Sensing of Environment, 39, 119-140.
- GREEN, A., BERMAN, M., SWITZER, P., CRAIG M. (1988): A transformation for ordering multi-spectral data in terms of image quality with implications for noise removal. - IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 26, 65-74.
- GRYZBECK, U. (1987): Drachen als Kameraträger. - In: ISPRS/DBM (Hrsg.): Luftaufnahmen aus geringer Flughöhe (=Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbaumuseum, 41), 57-62.
- HARTMANN, R. (2003): Studien zur standortgerechten Kompostanwendung auf drei pedologisch unterschiedlichen, landwirtschaftlich genutzten Flächen der Wildeshäuser Geest, Niedersachsen. - Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung, Heft 39, Bremen.
- HECKES, J. (1987): Luftaufnahmen aus geringer Flughöhe mit verschiedenen Kameraträgern. - In: ISPRS/DBM (Hrsg.): Luftaufnahmen aus geringer Flughöhe (=Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbaumuseum, 41), 119-126.
- HEINZ, D., CHANG, C.-I. (2000): Fully constrained least squares linear mixture analysis for material quantification in hyperspectral imagery. - IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 39, 529-545.
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. - Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- JACKSON, R.D. (1983): Spectral indices in n-space. - Remote Sensing of Environment, 13, 409-421.
- JÄHNE, B. (1997): Digitale Bildverarbeitung, 4. Auflage. - Springer-Verlag, Berlin.
- JÜRSCHIK, P. (1998): Grundlagen für das Erfassen der Heterogenität der Ertragsfähigkeit mit Methoden der Fernerkundung. - Forschungsberichte des Instituts für Agrartechnik Bornim 1/98, Potsdam-Bornim.
- KAPPAS, M. (1994): Fernerkundung nah gebracht. Leitfaden für Geowissenschaftler. - Dümmler-Verlag, Bonn.
- KASILE, J. D. (1994): Mini-platform/mini-format aerial photography. - In: Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 11-15 September 1994, Vol. 1, 363-371.
- KESHAVA, N., MUSTARD, J.F. (2002): Spectral unmixing. - IEEE Signal Process. Mag., 19, 44-57.

- KRUSE, F. A., KIERYN-YOUNG, K. S., and BOARDMAN, J. W. (1990): Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63 channel imaging spectrometer. - *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 1, 83-92.
- KRUSE, F. A., LEFKOFF, A. B., BOARDMAN, J.B., HEIDEBRECHT, K. B., SHAPIRO, A. T., BARLOON, P. J., GOETZ, A. F. H. (1993): The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. - *Remote Sensing of Environment*, 44, 145-163.
- KÜGELGEN, M. (1987): Ein ferngelenktes, unbemanntes Kleinflugzeug für wissenschaftlich-technische Nutzlasten. - In: ISPRS/DBM (Hrsg.): *Luftaufnahmen aus geringer Flughöhe (=Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbaumuseum, 41)*, 41-48.
- KÜHBAUCH, W., MÜLLER, U., SCHELLBERG, J., DOCKTER, K. (1991): Bedarf an Faktendaten für die Satelliten-Fernerkundung in der Landwirtschaft. - In MAINKA, C., MANGSTL, A. (Hrsg.): *Agrarinformatik. Beiträge zum Workshop Faktendatenbank im Agrarbereich, Bd. 23*. Eugen Ulmer, 96-104.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G., SCHWERDTFEGER, G. (1988): *Bodenkunde. 4. erweiterte und neubearbeitete Auflage*, Stuttgart.
- LAM, N. S.-N., QUATTROCHI, D. A. (1992): On the issues of scale, resolution and fractal analysis in the mapping sciences. - *Professional Geographer*, 44 (1), 83-98.
- LAO, N.Y., WONG, F.C. (2000): *Hyperspectral imagery market forecast: 2000-2005. – Systems Planning and Engineering, The Aerospace Corporation, El Segundo, California, USA, Report No. TOR-2001(8511)-1*
- LANDGREBE, D. (1999): Some fundamentals and methods for hyperspectral image data analysis. – *SPIE*, 3603.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. (1994): *Remote Sensing and Image Interpretation*. - John Wiley & Sons, New York.
- LUHMANN, T. (2000): *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. - Heidelberg.
- MALTHUS, T. J., MADEIRA, A.C. (1993): High-resolution spectroradiometry - spectral reflectance of field bean-leaves infected by *Botrytis-fabae*. - *Remote Sensing of Environment*, 45, 107-116.
- MARKS, A. R. (1989): Aerial photography from a tethered helium filled balloon. - *Photogrammetric Record*, 13 (74), 257-261.
- MARZLOFF, I. (1999): Großmaßstäbige Fernerkundung mit einem unbemannten Heißluftzeppelin für GIS-gestütztes Monitoring von Vegetationsentwicklung und Geomorphodynamik in Aragon (Spanien). - *Freiburger Geographische Hefte*, Heft 57.
- McCREIGHT, R. W. (1994): Airborne environmental analysis using an ultralight aircraft system. - In: *Proceedings of the First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 11-15 September 1994, Vol. 1*, 384-392.

MORAN, S.M., MAAS, S.J., PINTER, P.J. (1995): Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. - Remote Sensing Reviews 12, 335-353.

OFFERMANN, D. (1987): Der Einsatz von Ultraleichtflugzeugen in tropischen Regenwäldern. - In: ISPRS/DBM (Hrsg.): Luftaufnahmen aus geringer Flughöhe (=Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbaumuseum, 41), 63-70.

REDMONDINO, F. (o. D.): Investigation and calibration of Digital Camera Sony DSC-F505 Cybershot. - Skript in Photogrammetrie, (o. O.).

RICHARDS, K. S. (1981): General problems in morphometry. - In: GOUDIE, A. (Hrsg.): Geomorphological techniques. London.

RICHTER, R. (2000): Atmospheric/Topographic Correction for Wide FOV Airborne Imagery: Model ATCOR4. - DLR Internal Report, DLR-IB 552-05/00, pp. 62.

RIEGL (2000): Laser Mirror Scanner LMS-Z210 -Technical Documentation and User's Instructions. - Edition 00/05, Rev. 00-05-01, SW V3.4.

ROTHFUß, H. (1994): Verarbeitung und Einsatz Abbildender Spektrometerdaten (GER) mit unterstützenden Bodenmessungen zur Erkundung einer landwirtschaftlich genutzten Altlastfläche. - Düsseldorf (Fortschr. -Ber. VDI Reihe 15 Nr. 132, VDI-Verlag).

SCHLÄPFER, D. (2002): Parametric Geocoding, PARGE User Guide, Version 2.0. - ReSe Applications Schläpfer & Remote Sensing Laboratories University of Zurich, PDF/CDROM edition, Wil SG, pp. 166.

SCHWARZER, H. (1997): Spektral hochauflösende und hyperspektrale Fernerkundungsverfahren. - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 5/97, 291-295.

SONY (1999): DSC-F505, Digital Camera Data Sheet, Specifications and Information. - Sony.

SKUBSKI, T. (2000): Einsatz und Erweiterung eines kommerziellen Bildverarbeitungssystems zur Analyse von Hyperspektraldaten. - Diplomarbeit, Vechta.

SPACEIMAGING (2004): <http://www.spaceimaging.com/products/default.htm> (kopiert 2004)

SPECIM (1997): AISA Airborne Imaging Spectrometer – User's Manual.

SPECIM (1997b): Raw Data Format Description, Ver. 1.7

SPECIM (2000): Radiometric correction of AISA data in CaliGeo Ver. 2.0.

SPECIM (2000a): Specim CaliGeo, AISA Data Processing Tool User Manual Version.

STONER, E. R., BAUMGARDNER, M. F. (1981): Characteristic variations in reflectance of soil. - Soil Science Society of America Journal, 45, 1161-1165.

STROBL, P. (1999): Entwicklung von Verfahren zur Datenaufbereitung und Kalibrierung eines abbildenden Spektrometers am Beispiel des DAIS 7915. - Dissertation, Potsdam.

SUHR, B. (2001): Datenaufbereitung von hyperspektralen Fernerkundungsdaten am Beispiel des Airborne Imaging Spectrometer for Applications (AISA). - Diplomarbeit Vechta.

THENKABAIL, P. S., SMITH, R. B., DEPAUW, E. (2000): Hyperspectral Vegetation Indices and their relationships with agricultural crop characteristics. - *Remote Sensing of Environment*, 71, 158-182.

TUCKER, C.J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. - *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.

USGS (2004): U.S. Geological Service. - <http://eo1.usgs.gov/> (kopiert 2004)

USICO (2003): Unmanned Aerial Vehicle Safety Issues for Civil Applications. - Final Report of the EC-GROWTH Project GRD1-2001-40123.

VANE, G., GOETZ, A. F. H. (1993): Terrestrial Imaging Spectroscopy: Current status, future trends. - *Remote Sensing of Environment*, 44, 117-126.

WALKER, J. W., DE VORE, S. L. (1995): Low altitude Large Scale Reconnaissance: A method of obtaining high resolution vertical photographs for small areas, Denver.

WANZKE, H. (1984): The employment of a hot-air ship for the stereophotogrammetric documentation of antique ruins. - *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 25, 746-756.

WERNER, C., LEHNERT, S., SCHÖNFELD, R. (1999): Auswertung von IRS-1C-Satellitendaten für die Beschreibung der Landschaft und ihrer Veränderungen. - *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 3/99, 171-184.

WIEGAND, C.L., MASS, S.J., AASE, J.K., HATFIELD, J.L., PINTER, J., Jr., JACKSON, R.D., KANEMASU, E.T., LAPITAN, R.L. (1992): Multisite analysis of spectral-biophysical data for wheat.- *Remote Sensing of Environment*, 42, 1-21.

Erklärung

Erläuterung:

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt wurde, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht worden sind.

Bremen, 17.01.2005