

Analyse hyperspektraler Flugzeugscannerdaten zur ökologischen Charakterisierung städtischer Biotope

vorgelegt von
Diplom-Geoökologin
Uta Heiden
aus Cottbus

Von der Fakultät VII - Architektur Umwelt Gesellschaft
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
- Dr. rer. nat. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende: Prof. Dr. Birgit Kleinschmidt
Berichter: Prof. Dr. Hartmut Kenneweg
Berichter: Prof. Dr. Hermann Kaufmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 11.12.2003

Berlin 2004
D 83

Zusammenfassung

Die Berücksichtigung ökologischer Belange bei stadtplanerischen Bauvorhaben und Planungen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Da die Erfassung der dazu notwendigen aktuellen Datengrundlagen mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist, hat die Entwicklung neuer automatischer Erfassungsmethoden einen hohen Stellenwert. In dieser Arbeit wurde ein Konzept zur Nutzung hyperspektraler Flugzeugscannerdaten für die quantitative Charakterisierung städtischer Biotop entwickelt. Ziel war es, auf der Basis einer flächendeckenden und automatischen Oberflächenkartierung den Zustand der städtischen Biotop in einem Beispielgebiet von Dresden quantitativ zu beschreiben.

Voraussetzung für die flächendeckende Erfassung städtischer Oberflächen auf der Basis von hyperspektralen Flugzeugscannerdaten war die Untersuchung ihrer materialspezifischen spektralen Reflexionseigenschaften. Sie wurden sowohl in Feld- und Laborspektrometermessungen als auch in den Bildspektren der hyperspektralen HyMap-Daten untersucht. Im Ergebnisse wurden eine Vielzahl von Oberflächenmaterialien anhand charakteristischer spektraler Merkmale differenziert. Die robusten spektralen Merkmale wurden auf der Basis numerischer Maße beschrieben, die eine automatische Identifizierung der Oberflächenmaterialien mit Hilfe von HyMap-Daten ermöglichten. Schwierigkeiten verblieben bei der Trennung einiger Dach- und Freiflächen, welche auf spektrale Ähnlichkeiten zurückzuführen waren.

Für die flächendeckende Identifizierung der Oberflächenmaterialien wurde ein kombiniertes Klassifizierungs- und Entmischungsverfahren eingesetzt. Es beinhaltete im ersten Schritt die Klassifizierung der spektral reinen Pixel (*Seedlings*). Die *Seedlings* stellten in der Umgebung unbekannter Mischpixel potentielle Endmember für ihre anschließende Entmischung dar. Die spektralen Ähnlichkeiten zwischen einigen Dach- und Freiflächen erforderten ihre getrennte Identifizierung im Rahmen der *Seedlings*-Klassifizierung mit Hilfe von Gebäudemasken. Die thematische Genauigkeit der fernerkundlichen Ergebnisse wurde mit einem objektorientierten Ansatz überprüft. Danach wurden 57% der städtischen Objekte, die eine Fläche von 78% - 81% abdeckten, korrekt identifiziert.

Die fernerkundliche Oberflächenkartierung stellte die Grundlage für die Zustandsbeschreibung städtischer Biotop dar. Dazu wurden die fernerkundlichen Ergebnisse mit Hilfe GIS-basierter Methoden in die bestehende Datenbank der Stadtbiotopkartierung Dresdens integriert. Für jedes Biotop standen somit Informationen zur materiellen Ausstattung zur Verfügung. Diese Informationen ermöglichten die Ableitung quantitativer Parameter wie z.B. dem Bebauungsgrad und dem Versiegelungsgrad. Ihre Aussagekraft für stadtökologische Fragestellungen wurde durch statistische und räumliche Analysen überprüft. Die Ergebnisse zeigen die Vielfalt der städtischen Biotop eines Typs, die mit den bisher in der Planungspraxis verwendeten Methoden nicht ausreichend beschrieben werden konnten.

Mit dem dargestellten Ansatz wurde ein wesentlicher Beitrag zur automatischen Ableitung stadtökologisch relevanter Informationen aus hyperspektralen Daten geleistet. Die Qualität der automatischen Oberflächenkartierung ist in diesem Zusammenhang entscheidend. Verbesserungen bei der Identifizierung kleiner Objekte sind mit dem Einsatz räumlich höher aufgelöster hyperspektraler Daten zu erwarten. Mit der Verwendung weiterer spektraler Kanäle im thermalen Infrarotbereich und der Integration von 3D-Stadtmodellen kann die automatische Oberflächenkartierung auf einem sehr hohen Genauigkeitsniveau durchgeführt werden.

Abstract

In recent years, consideration of ecological concerns in urban planning gains in importance. The acquisition of an up-to-date database as a requirement for planning processes is a very costly and time-intensive task using manual remote sensing methods. Therefore, the development of new automated acquisition methods is of high priority. In this study a new concept for quantitative characterization of urban biotopes using airborne hyperspectral scanner data was developed. The objective was the quantitative description of the current state of urban biotopes based on area-wide automated surface mapping.

The analysis of material-specific reflectance characteristics of urban surfaces is a requirement for an area-wide surface inventory. These reflectance characteristics were investigated analyzing field and laboratory spectra as well as image spectra of hyperspectral HyMap data. The results show the potential of differentiating a multitude of urban surfaces solely based on their spectral characteristics. Robust spectral features were identified and described numerically allowing an automated identification of urban surfaces using HyMap data. Some problems remain in the differentiation between roof materials and open spaces that consist of the same material.

For the area-wide identification of surface materials a combined classification and unmixing approach was developed. The first step involved the classification of spectrally pure pixels (seedlings). These seedlings represent potential endmembers in a spatially defined neighborhood of unknown mixed pixels for the subsequent unmixing procedure. Spectral similarities of some roof materials and open spaces required separate identification of seedlings using a mask for buildings. The accuracy assessment was performed using an object-oriented approach. It showed that 57% of the urban objects - covering 78% - 81% of the total area - were correctly identified.

The assessment of the state of urban biotopes is based on the surface mapping results. For this purpose, these results were integrated into the existing database of the urban biotope mapping of Dresden using GIS-based methods. Thus, information of material inventory of each urban biotope was available. This information allows the derivation of quantitative parameters, such as degree of overbuilt area and surface sealing. The relevance of the parameters for urban planning decisions was proven using statistical and spatial analyses. The results reveal that the properties of urban biotope types show a high variability that is not addressed by manual urban mapping methods.

With this new mapping approach ecologically relevant information for urban biotopes could be automatically derived from hyperspectral data. In this context a high quality level of the surface mapping results is crucial. The identification of small objects is expected to be improved by using hyperspectral data with a higher spatial resolution. Further, the addition of thermal channels and the integration of 3D surface models would allow surface mapping on an extremely high accuracy level.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Abstract	3
1 Einleitung und Ziele	14
2 Fernerkundung und GIS in der ökologischen Stadtplanung	16
2.1 Fernerkundliche Grundlagen	16
2.1.1 Elektromagnetisches Spektrum	16
2.1.2 Aufnahmesysteme	18
2.2 Geographische Informationssysteme (GIS)	20
2.3 Biotopkartierung in Städten	22
2.3.1 Definition städtischer Biotope	22
2.3.2 CIR-Luftbildkartierung von Biotoptypen	23
2.4 Automatisierte Auswertemethoden von Fernerkundungsdaten	25
2.5 Hyperspektrale Fernerkundung zur Charakterisierung von Stadtbiotopen	27
3 Untersuchungsgebiet und Datenbasis	30
3.1 Untersuchungsgebiet in Dresden	30
3.2 Amtliche Daten	31
3.2.1 Stadtbiotopkartierung Dresden	32
3.2.2 Weitere Daten	34
3.3 Hyperspektrale HyMap-Daten	34
3.3.1 Aufnahmeprinzip und Eigenschaften	35
3.3.2 Atmosphärische Korrektur	36
3.3.3 Geometrische Korrektur	39
4 Spektrale Charakteristika städtischer Oberflächen	42
4.1 Konzept der Erfassung spektraler Eigenschaften	42
4.2 Messmethodik	44
4.3 Spektrale Charakteristika in Feld- und Laborspektren	46
4.3.1 Versiegelte Oberflächen	46
4.3.2 Unversiegelte Oberflächen	49

4.3.3	Spektrale Modifikationen	52
4.4	Spektrale Charakteristika in den HyMap-Daten	54
4.5	Quantifizierung spektraler Merkmale	58
5	Identifizierung städtischer Oberflächen	60
5.1	Algorithmus	60
5.1.1	Erstellung der Gebäudemaske	61
5.1.2	Identifizierung der <i>Seedlings</i>	63
5.1.3	Iteratives Entmischen	63
5.2	Thematische und spektrale Bestimmung von Klassen	64
5.3	Ergebnisse	66
5.3.1	Gebäudemasken	66
5.3.2	Oberflächenmaterialien	68
6	Thematische Genauigkeitsanalyse	71
6.1	Genauigkeitsanalysen von Klassifizierungs- und Entmischungsergebnissen	71
6.2	Objektorientierte Genauigkeitsanalyse im GIS	73
6.2.1	Aufbau des GIS	73
6.2.2	Trefferdefinition	75
6.2.3	Genauigkeitsmaße	76
6.3	Manuelle Klassifizierung ausgewählter Stadtgebiete	77
6.4	Genauigkeit der fernerkundlich erfassten Oberflächenmaterialien	79
6.4.1	Gesamtflächenstatistik	79
6.4.2	Trefferstatistik	80
7	Charakterisierung städtischer Biotope	86
7.1	Methodik	86
7.1.1	Datenintegration	86
7.1.2	Ableitung quantitativer Parameter	87
7.1.3	GIS-basierte Auswertung	89
7.2	Darstellung der erweiterten Datenbasis	90
7.3	Quantitative Parameter	91
7.3.1	Der Versiegelungsgrad im Vergleich	92
7.3.2	Räumliche Analyse	93
7.3.3	Statistische Analyse	94
7.4	Anwendungsbeispiele	98
7.4.1	Charakterisierung des Dresdner Industriegebietes	98
7.4.2	Abschätzung stark belasteter Biotope	100

8 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	104
8.1 Eignung der HyMap-Daten und Methoden	104
8.2 Genauigkeit der Oberflächenidentifizierung	107
8.3 Einsatz in der ökologischen Stadtplanung	108
A Anhang	110
B Karten	119
Literatur	135
Dank	136
Eidesstattliche Erklärung	137
Lebenslauf	138

Abbildungsverzeichnis

2.1	Charakteristik der solaren Einstrahlung unter Einfluss atmosphärischer Effekte im reflektiven Wellenlängenbereich	17
2.2	Einflussfaktoren auf die vom Sensor aufgenommene Strahlung (<i>at-sensor-radiance</i>)	18
2.3	Filmempfindlichkeiten und Kanäle ausgewählter fernerkundlicher Aufnahmesysteme	19
2.4	Spektrale Reflexionssignaturen eines hyperspektralen Sensors (HyMap) im Vergleich mit einem multispektralen Sensor (Landsat-TM 5)	20
2.5	Struktur von Vektordaten im relationalen Datenmodell; nach ESRI (1994b) . . .	21
2.6	Struktur von Rasterdaten im relationalen Datenmodell; nach ESRI (1994a) . . .	21
2.7	Verknüpfung von Informationen aus Raster- und Vektordatensätzen	22
2.8	Unterschiedliche Ausstattung bebauter und unbebauter Biotope	24
2.9	Potential hyperspektraler Daten für die Ableitung von quantitativen Informationen zur Zustandsbeschreibung städtischer Biotope	27
2.10	Stadtökologisch orientierte Einteilung der fernerkundlich erfassbaren Oberflächenmaterialien nach ihren Versiegelungseigenschaften	28
3.1	Das Untersuchungsgebiet in Dresden	31
3.2	Haupteinheiten der Biotoptypen Dresdens	32
3.3	Charakterisierung der Biotoptypen mit Strukturmerkmalen	32
3.4	Regressionsgeraden des <i>Empirical-Line</i> -Verfahrens	37
3.5	<i>Empirical Line</i> basierte Atmosphärenkorrektur - Kontrollspektren	38
3.6	Signal/Rausch-Verhältnis verschiedener Oberflächen in den HyMap-Daten	39
3.7	Einfluss des <i>Resampling</i> -Verfahrens auf die Geometrie von Objekten	41
4.1	Geometrische Konfiguration der Goniometermessungen	45
4.2	Spektrale Reflexionssignaturen ausgewählter Dach- und Freiflächenmaterialien (Feldspektrometer)	47
4.3	Spektrale Reflexionssignaturen urbaner Vegetation (Feldspektrometer)	50
4.4	Spektrale Reflexionssignaturen unversiegelter Freiflächen (Feldspektrometer) . . .	51
4.5	Einfluss des Alters und der Beschichtung auf das spektrale Reflexionsverhalten (Feldspektrometer)	52
4.6	Einfluss des Neigungswinkels des Objektes auf das spektrale Reflexionsverhalten (Bsp. Dachziegel)	53
4.7	Definition eines Bildspektrums und Einflussfaktoren auf das spektrale Signal . .	55

4.8	Hoher Mischpixelanteil in den hyperspektralen HyMap-Daten	56
4.9	Spektrale Reflexionssignaturen städtischer Oberflächenmaterialien aus den HyMap-Daten des Testgebietes von Dresden	57
4.10	Numerische Merkmalsextraktion durch Ratiobildung (Bsp. Betondachstein) . . .	58
4.11	Numerische Merkmalsextraktion durch Flächeninhaltsberechnung (Bsp. Zink) . .	59
5.1	Kombinierter Klassifizierungs- und Entmischungsalgorithmus zur automatischen Identifizierung städtischer Oberflächenmaterialien	61
5.2	Erstellung von Gebäudemasken	62
5.3	Pixelorientierte Endmember-Auswahl nach (Segl & Roessner, 1999)	64
5.4	Gebäudemasken im Vergleich	67
5.5	Ergebnisse des Identifizierungsalgorithmus für ein Beispielgebiet von Dresden . .	70
6.1	Schematische Darstellung der Aufarbeitung des Referenzdatensatzes	74
6.2	Schematische Darstellung der Trefferdefinition	76
6.3	Manuelle Klassifizierung des Referenzgebietes 1	78
6.4	Gesamtflächenstatistik der Oberflächenmaterialien aller Referenzgebiete	80
6.5	Einfluss der Qualität der Gebäudemasken auf die Trennung von spektral ähnlichen Dach- und Freiflächen	82
6.6	Trennung von spektral ähnlichen Dach- und Freiflächen unter Berücksichtigung der Form	83
6.7	Zusammenhang zwischen Treffergenauigkeit und Objektgröße	84
7.1	Verknüpfung der Oberflächenmaterialien mit den Stadtbiotopen	87
7.2	Zusammenhang zwischen den Versiegelungsgraden auf der Basis der manuellen Klassifizierung und der HyMap-Daten	93
7.3	Verteilung des Versiegelungsgrades, des Bbauungsgrades und des Gesamtvegetationsgrades innerhalb ausgewählter Biotoptypen	96
7.4	Verteilung des Überschirmungsgrades und des Vegetationsdeckungsgrades innerhalb ausgewählter Biotoptypen	97
7.5	Quantitative Parameter zur Zustandsbeschreibung des Dresdner Industriegebietes	99
7.6	Stark versiegelte und vegetationsarme Biotope	101
7.7	Ausgewählte Biotope der Stadtbiotopkartierung Dresden; dargestellt im Ortho-luftbild (a), (c) und in den HyMap-Daten (b)	102
A.1	Manuelle Klassifizierung von fünf flächendeckend erfaßten Referenzgebieten für die objektorientierte Genauigkeitsanalyse; Teil I	114
A.2	Manuelle Klassifizierung von 5 flächendeckend erfaßten Referenzgebieten für die objektorientierte Genauigkeitsanalyse; Teil II	115

A.3	Trefferstatistik - Vergleich der Referenzdaten mit dem SP-Ergebnis (Entmischung unter Verwendung der spektralen Gebäudemasken)	117
A.4	Trefferstatistik - Vergleich der Referenzdaten mit dem EX-Ergebnis (Entmischung unter Verwendung der externen Gebäudemasken)	118
B.1	Topographische Karte des Untersuchungsgebietes	120
B.2	Stadtbiotopkartierung Dresden	121
B.3	Hyperspektrale HyMap-Daten	122
B.4	Entmischungsergebnisse (dominierender Endmember)	123
B.5	Versiegelungsgrade im Vergleich	124
B.6	Gewichteter Versiegelungsgrad	125
B.7	Bebauungsgrad	126
B.8	Vegetationsdeckungsgrad	127
B.9	Überschirmungsgrad	128
B.10	Gesamtvegetationsgrad	129

Tabellenverzeichnis

2.1	Einteilung des reflektiven Wellenlängenbereiches	17
2.2	Stadtökologische Gliederung nach Nutzungstypen (Sukopp <i>et al.</i> , 1998)	23
3.1	Datengrundlage für das Untersuchungsgebiet in Dresden	30
3.2	Attribute der Stadtbiotopkartierung Dresdens	33
3.3	Unterschiedliche Biototypenschlüssel Dresdens, der AG „Methodik“ und Potsdams - demonstriert am Beispiel der Biototypen der Wohnbebauung	33
3.4	Aufnahmedaten für den HyMap-Überflug von Dresden (19.05.1999)	35
3.5	Technische Konfigurationen des HyMap-Sensors (Cocks <i>et al.</i> , 1998)	36
3.6	Spektrale Konfiguration des HyMap-Datensatzes von Dresden (19.05.1999)	36
3.7	Spektrale Kalibrationsmessungen	37
4.1	Versiegelte Oberflächen und ihre chemische Zusammensetzung nach Hiese (1999) und Schröter <i>et al.</i> (1985)	43
4.2	Messkonfiguration für die Goniometer- und Feldmessungen	46
4.3	Numerische Merkmalsextraktion auf der Basis hyperspektraler HyMap-Daten	59
5.1	Thematische und spektrale Bestimmung der Klassen in den HyMap-Daten	65
5.2	Prozentuale Flächenanteile der klassifizierten und entmischten Oberflächenmaterialien	68
6.1	Tabellenstruktur des aufgearbeiteten Referenz- und Entmischungsdatensatzes	75
6.2	Charakterisierung der Referenzgebiete	77
6.3	Ergebnisse der Gesamtflächenstatistik für alle Referenzgebiete auf Ebene 3 der Oberflächentypen in (%)	80
6.4	Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für die Oberflächentypen (Ebene 3)	81
6.5	Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für die Oberflächenmaterialien (Ebene 4)	81
7.1	Modifizierte Bodenkennwerte zur Gewichtung des Versiegelungsgrades auf der Grundlage der Abflussbeiwerte der ATV-DVWK-A-138 (2002)	88
7.2	Erweiterte Datenbank der Stadtbiotopkartierung Dresdens	90
7.3	Versiegelungsgrade (VG) im Vergleich	92
7.4	Mittelwert μ und Standardabweichung σ der quantitativen Parameter für ausgewählte Biototypen	95

7.5	Quantitative Parameter für zwei Beispielbiototypen jeweils für die Strukturmerkmale (SM) c und d	98
7.6	Auswahl stark versiegelter und vegetationsarmer Biotope	102
A.1	Biototypenschlüssel der Stadtbiotopkartierung Dresden	111
A.2	Ergebnisse der Gesamtflächenstatistik für alle Referenzgebiete	116

Abkürzungsverzeichnis

AG	Arbeitsgemeinschaft
AML	<i>Arc-Macro-Language</i>
ARES	<i>Airborne Reflective Emissive Spectrometer</i>
ASD	<i>Analytical Spectral Devices</i>
ATCOR	<i>Atmospheric and Topographic Correction</i>
ATV	Fachverband Abwasser- und abfalltechnische Vereinigung
BBG	Bebauungsgrad
BFZ	Bodenfunktionszahl
BRDF	<i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>
CIR	Color-Infrarot-Luftbilder
DGM	Digitales Geländemodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DN	<i>Digital Number</i>
DVWK	Fachverband Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DWD	Deutscher Wetterdienst
EM	Endmember
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc.
EX	Verwendung der externen Gebäudemasse auf der Basis amtlicher Gebäudedaten
FOV	<i>Field of view</i>
GFZ	GeoForschungsZentrum (Potsdam)
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GVG	Gesamtvegetationsgrad
HRV	<i>High Resolution Visible</i>
HyMap	<i>(Hyperspectral Scanner)</i>
ID	Identifikationsnummer
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
IKONOS	<i>(High-Resolution Spaceborne Sensor)</i>
IÖR	Institut für Ökologische Raumentwicklung (Dresden)
MSS	<i>Multispectral Scanner</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NIR	Nahes Infrarot
NWK	Neigungswinkel
OM	Oberflächenmaterial
PAN	Panchromatisch
PARGE	<i>Parametric Geocoding</i>
PE	Polyethylen
PIB	Polyisobutylen
PSF	<i>Point Spread Function</i>
PVC	Polyvinylchlorid
RMS	<i>Root Mean Square Error</i>

RSL	<i>Remote Sensing Laboratories</i> (Universität Zürich)
SM	Strukturmerkmal
SNR	<i>Signal/Noise Ratio</i>
SP	Verwendung der spektralen Gebäudemasken auf der Basis der HyMap-Daten
SPOT	<i>Systeme Probatoire d'Observation de la Terre</i>
SW	Schwarz-Weiß
SWIR I	Kurzwelliges Infrarot I
SWIR II	Kurzwelliges Infrarot II
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TMS	<i>Thematic Mapper Simulator</i>
ÜG	Überschirmungsgrad
UG	Untersuchungsgebiet
USGS	<i>US Geological Survey</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
VDG	Vegetationsdeckungsgrad
VG _g	Gewichteter Versiegelungsgrad
VG _{ug}	Ungewichteter Versiegelungsgrad
VIS	Sichtbarer Bereich der elektromagnetischen Strahlung

Einleitung und Ziele

Die intensive Flächennutzung in Städten durch Verkehr, Wohnen und Gewerbe sowie die damit verbundenen hohen Stoff- und Energieumsätze führen zu ökologischen Belastungen mit spürbaren Auswirkungen für den Menschen. Das zentrale Anliegen städtischer Kommunalverwaltungen ist daher die umweltverträgliche Gestaltung der Stadt zur nachhaltigen Verbesserung der Lebensqualität. Die wichtigste Datengrundlage zur Verwirklichung dieses Anliegens ist die Erfassung und Bewertung des aktuellen Zustandes urbaner Lebensräume in Form von Stadtbiotopkartierungen.

Zur flächendeckenden Erfassung der komplexen Lebensräume werden räumlich hoch aufgelöste Color-Infrarot-Luftbilder eingesetzt und stereoskopisch ausgewertet. Unter Verwendung dieser analogen Aufnahmemethode werden detaillierte Beschreibungen zum biologisch-ökologischen Zustand der Biotope abgeleitet. Sie ist daher für Erstkartierungen unerlässlich. Für eine regelmäßige Erfassung quantitativer Parameter, z.B. zur Versiegelung und Bebauung, ist die manuelle CIR-Luftbildkartierung aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwandes nicht geeignet. Nach [Pohl \(1991\)](#) stellen jedoch gerade diese Parameter, in ihrer räumlichen und zeitlichen Veränderung betrachtet, eine geeignete Bemessungsgrundlage für die Durchsetzung der Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege dar.

In diesem Zusammenhang wird seit einigen Jahren der Einsatz automatischer Methoden mit Hilfe von multispektralen Scannerdaten erforscht. Im Mittelpunkt steht die Erfassung der städtischen Oberflächen, auf deren Basis quantitative Parameter abgeleitet werden können. Die Ergebnisse sind jedoch aufgrund der ungenügenden räumlichen und spektralen Auflösung der Daten für die Beschreibung der sehr kleinen und vielgestaltigen städtischen Biotope nicht geeignet. Flugzeuggetragene hyperspektrale Sensoren eröffnen neue Möglichkeiten für den Einsatz in der ökologischen Stadtplanung. Aufgrund ihres hohen spektralen sowie räumlichen Informationsgehaltes ermöglichen sie die Erfassung der städtischen Objekte auf der Basis ihrer materialspezifischen Reflexionseigenschaften. Die Entwicklung automatisierter und auf den Informationsgehalt der Hyperspektraldaten angepasster Auswertemethoden stellt die Voraussetzung für eine effektive und regelmäßige Erfassung der städtischen Oberflächen dar.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Konzeptes zur quantitativen Charakterisierung städtischer Biotope mit Hilfe hyperspektraler Flugzeugscannerdaten. Dabei gilt es, das hohe Informationspotential der Daten für eine automatisierte Erfassung der städtischen Oberflächen einzusetzen, die die Grundlage für die Ableitung quantitativer Informationen bilden. Diese Informationen umfassen die materielle Ausstattung der Biotope sowie quantitative Parameter zur Bewertung der Versiegelung, Bebauung und Vegetation.

Die Entwicklungen werden am Beispiel eines Untersuchungsgebietes in Dresden demonstriert. Ausgangspunkt ist die aktuelle Stadtbiotopkartierung der Stadt Dresden, die auf der Basis einer

CIR-Luftbildbefliegung von Mai 1999 erzeugt wurde. Zum gleichen Zeitpunkt fand die Befliegung mit dem hyperspektralen HyMap-Sensor statt. Aufgrund der nahezu identischen Aufnahmezeit beider Datensätze stellen sie eine ideale Grundlage für die in dieser Arbeit durchzuführenden Analysen dar.

Die Erfassung städtischer Oberflächen mit Hyperspektraldaten erfordert ein umfassendes Wissen zu ihren spektralen Reflexionseigenschaften. Zu diesem Zweck ist ein Konzept für die spektrale Bestandsaufnahme zu entwickeln. Die spektralen Messungen im Feld und im Labor liefern dabei Erkenntnisse zu den materialbedingten Reflexionseigenschaften. Darüber hinaus ist die Wiedergabe dieser spektralen Charakteristika in den Hyperspektraldaten zu berücksichtigen.

Aufgrund der Vielzahl kleiner städtischer Oberflächen unterschiedlicher Eigenschaften ist ein hoher Mischpixelanteil zu erwarten. Die automatische Identifizierung der Oberflächenmaterialien erfordert daher ein Verfahren, das an den hohen spektralen sowie räumlichen Informationsgehalt der HyMap-Daten angepasst ist. Dabei soll ein kombiniertes Klassifizierungs- und Entmischungsverfahren eingesetzt werden, das zur Oberflächenerfassung auf der Grundlage hyperspektraler DAIS-7915-Daten entwickelt wurde. Die Bewertung der Genauigkeit der fernerkundlichen Ergebnisse erfordert die Ableitung aussagekräftiger Bewertungskriterien, die sowohl wichtige Erkenntnisse zur Verbesserung des Identifizierungsverfahrens als auch praxisorientierte Aussagen für den Anwender liefern.

Die fernerkundlich erhobenen Oberflächenmaterialien bilden die Grundlage für die Ableitung quantitativer Informationen zur Charakterisierung der städtischen Biotope. Eine Voraussetzung dafür ist die Integration der gerasterten fernerkundlichen Ergebnisse in die Stadtbiotopkartierung. Sowohl die Verknüpfung der Oberflächenmaterialien mit den Biotopen als auch die Ableitung der Parameter bedarf der Entwicklung GIS-basierter Methoden, die eine schnelle Verfügbarkeit der quantitativen Informationen ermöglichen. Die Beurteilung ihrer Aussagekraft und Relevanz ist für den Einsatz in der Stadtplanung von hoher Bedeutung. Daher sind neben der stichprobenartigen Überprüfung der Richtigkeit der Informationen auch statistische und räumliche Analysen der quantitativen Parameter notwendig. Beispiele zur Charakterisierung der städtischen Biotope mit Hilfe der fernerkundlich erhobenen quantitativen Parameter geben einen Einblick in die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der neuen Daten.

Fernerkundung und GIS in der ökologischen Stadtplanung

Fernerkundliche und GIS-basierte Methoden sind mittlerweile etablierte Werkzeuge in der ökologischen Stadtplanung. Inhalt dieser Arbeit ist die Entwicklung von Methoden, die es ermöglichen, aus hyperspektralen Daten Informationen für Stadtbiotopkartierungen abzuleiten. Dieses Kapitel widmet sich den Grundlagen von Fernerkundung und GIS sowie der Biotopkartierung in Städten. Ausgehend von dem bisherigen Stand der fernerkundlichen Methoden in der Praxis und der Forschung wird abschließend der Einsatz von Hyperspektraldaten zur Charakterisierung städtischer Biotope konzeptionell erläutert.

2.1 Fernerkundliche Grundlagen

Unter Fernerkundung versteht man die Gewinnung von Informationen über Art und Eigenschaften entfernter Objekte. Neben der Photogrammetrie, welche sich mit der Lage, Größe und Form von Objekten aus Luftbildern beschäftigt, wird dieser Begriff vorwiegend im Zusammenhang mit spektralen Parametern angewandt. Die Grundlagen der passiven Fernerkundung sind, wenn nicht anders angegeben, aus [Schowengerdt \(1997\)](#), [Mather \(1999\)](#) und [Lillesand & Kiefer \(1994\)](#) entnommen.

2.1.1 Elektromagnetisches Spektrum

Die physikalische Größe, die von Fernerkundungssystemen gemessen wird, ist die elektromagnetische Strahlung. Sie wird als ein sich periodisch änderndes elektromagnetisches Feld definiert, welches sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Ist die dazu nötige Strahlungsquelle natürlicher Herkunft (z.B. Sonne, Erde), spricht man von passiven Fernerkundungssystemen. Aktive Fernerkundungssysteme arbeiten mit eigenen Strahlungsquellen (z.B. Radar).

Die Erdoberfläche steht unter dem Einfluss der elektromagnetischen Strahlung $E(\lambda)$ der Sonne. Wenn elektromagnetische Strahlung $E(\lambda)$ auf ein Oberflächenmaterial trifft, wird diese in Teilen reflektiert ($E_r(\lambda)$), absorbiert ($E_a(\lambda)$) und bei nicht opaken Materialien (z.B. Wasser) transmittiert ($E_t(\lambda)$). Die Gesamtheit aller Teilstrahlungen nennt man den Strahlungsfluss $E_e(\lambda)$. Er ist eine Funktion der Wellenlänge und wird in $[W/(m^2\mu m)]$ angegeben.

$$E_e(\lambda) = E_r(\lambda) + E_a(\lambda) + E_t(\lambda) \quad (2.1)$$

Nach dem Kirchhoff'schen Gesetz gilt für jeden opaken Körper, dass sich bei jeder Wellenlänge das vom Körper ausgesandte Signal aus reflektierter und emittierter Strahlung zusammensetzt.

Der Anteil der emittierten Strahlung ist jedoch für die ca. 300K warme Erde im Bereich von $0.4\mu\text{m}$ bis $2.5\mu\text{m}$ vernachlässigbar gering. Dadurch grenzt sich der reflektive Wellenlängenbereich ($0.4\mu\text{m} - 3.0\mu\text{m}$) vom thermalen Wellenlängenbereich ($3.0\mu\text{m} - 14.0\mu\text{m}$) ab. In der Fernerkundung hat sich eine weitere Unterteilung des reflektiven Wellenlängenbereiches durchgesetzt (Tab. 2.1), deren Terminologie in dieser Arbeit verwendet wird.

Tabelle 2.1: Einteilung des reflektiven Wellenlängenbereiches

Reflektiver Spektralbereich	Wellenlänge [μm]
Sichtbarer Bereich (VIS)	
- Blau	0.4 - 0.5
- Grün	0.5 - 0.6
- Rot	0.6 - 0.7
nahes Infrarot (NIR)	0.7 - 1.3
kurzwelliges Infrarot I (SWIR I)	1.3 - 2.0
kurzwelliges Infrarot II (SWIR II)	2.0 - 2.5

Die von einem Körper pro Flächeneinheit und Raumwinkel ausgesandte Strahlungsleistung nennt man die spektrale Strahldichte L (Radianz) mit der Einheit [$\text{W}/(\text{m}^2\text{sr}\mu\text{m})$] oder [$\text{mW}/(\text{cm}^2\text{sr}\mu\text{m})$]. Die solare Radianz (Sonneneinstrahlung) wird durch die Bestandteile der Atmosphäre (Wasser-, Gasmoleküle sowie Aerosole) in bestimmten Wellenlängenbereichen gestreut, absorbiert bzw. transmittiert (Abb. 2.1). Die von der Erdoberfläche ausgesandte und von Fernerkundungssensoren aufgezeichnete Radianz nennt man *at-sensor-radiance*. Sie ist neben der solaren Charakteristik und den atmosphärischen Einflüssen von den Eigenschaften der bestrahlten Oberfläche (Rauigkeit, Textur, Orientierung zur Sonne), als auch vom atomaren bzw. molekularen Aufbau des jeweiligen Oberflächenmaterials bestimmt (Abb. 2.2).

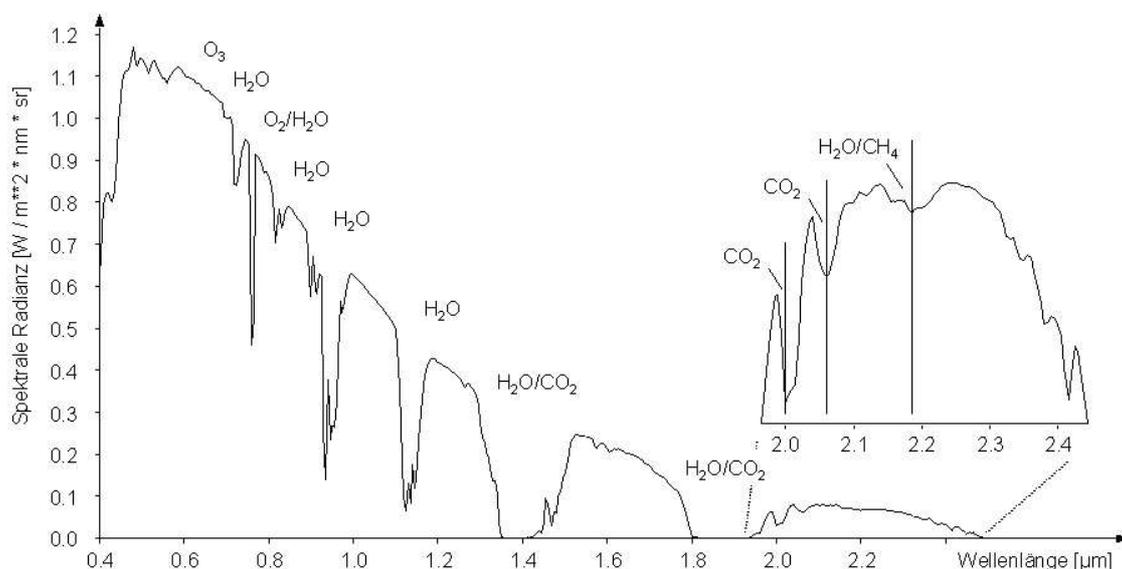


Abbildung 2.1: Charakteristik der solaren Einstrahlung unter Einfluss atmosphärischer Effekte im reflektiven Wellenlängenbereich

Für eine standardisierte fernerkundliche Auswertung der Oberflächenmaterialien (z.B. Vergleich mit spektralen Datenbanken) müssen die in Radianzen vorliegenden Werte in Reflektionswerte

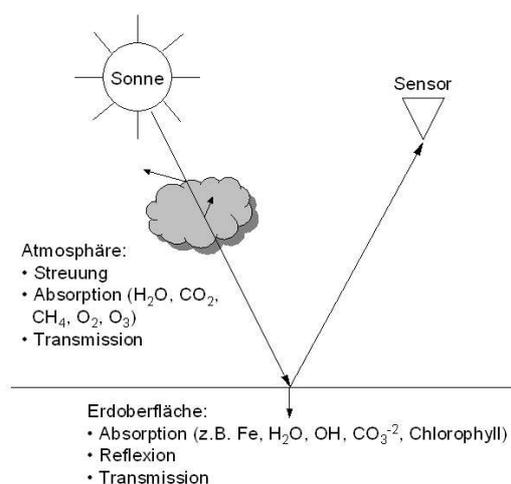


Abbildung 2.2: Einflussfaktoren auf die vom Sensor aufgenommene Strahlung (*at-sensor-radiance*)

umgewandelt werden. Die Transformation erfolgt durch Simulation des Einflusses der solaren Charakteristik und der atmosphärischen Einflüsse im Zuge von atmosphärischen Korrekturverfahren. Die Erfassung dieser Variablen ist die Voraussetzung für die Transformation der Radianzen in Reflektionswerte. Die Reflexion ist dabei das Verhältnis von ausfallender zu einfallender Strahlung.

Das Reflexionssignal ist nun nur noch von den Eigenschaften des Oberflächenmaterials beeinflusst. Das Material bildet aufgrund seines atomaren bzw. molekularen Aufbaus spezifische Reflexionseigenschaften aus. Diese entstehen durch die Wechselwirkung der Photonen (elektromagnetische Strahlung) mit z.B. einem Kristallgitter und führen je nach Material in bestimmten Wellenlängen zu einer Minderung der abgestrahlten Energie. Bei den Wechselwirkungen handelt es sich bei kürzeren Wellenlängen um die Änderung im Energiezustand von Elektronen und bei längeren Wellenlängen um die Anregung bestimmter Schwingungszustände von Molekülen. Im Spektrum werden diese Reflexionsminderungen im Idealfall als lokale Minima (Absorptionsbanden) sichtbar. Gerade im sichtbaren Bereich und im Bereich des nahen Infrarots werden die Absorptionsbanden von stärkeren Energieminderungen (z.B. UV-Bereich) überlagert. Ausführlichere Beschreibungen zu den spektralen Reflexionssignaturen von Materialien und ihren Ursachen sind in [Clark \(1999\)](#), [Pieters & Englert \(1993\)](#) und [Clark & Roush \(1984\)](#) gegeben.

Um die spektralen Reflexionserscheinungen von Materialien zu untersuchen und zu archivieren, wurden Spektralbibliotheken (Datenbanken) aufgebaut. Sie enthalten eine Vielzahl spektraler Reflexionssignaturen (Spektren), die mit Feld- bzw. Laborspektrometern gemessen wurden. Gleichzeitig sind über die Spektralbibliothek Informationen zu den chemischen Bestandteilen der gemessenen Materialien erhältlich. Der USGS (*US Geological Survey*) verwaltet eine der umfangreichsten spektralen Bibliotheken ([USGS, 2003](#)).

2.1.2 Aufnahmesysteme

Die Radianz eines Materials kann mit photographischen Systemen und mit spektralen Scannern aufgenommen werden. Je nach Filmmaterial bzw. spektralen Kanälen decken sie unterschiedliche Bereiche des elektromagnetischen Spektrums ab (Abb. 2.3). Die Auswahl eines Systems richtet sich nach der Aufgabenstellung. Beispielsweise werden Objekte über ihre Form mit Daten hoher

räumlicher Auflösung erfasst. Die Differenzierung der Objekte über ihre Eigenschaften ist nur mit Daten hoher spektraler Auflösung durchführbar.

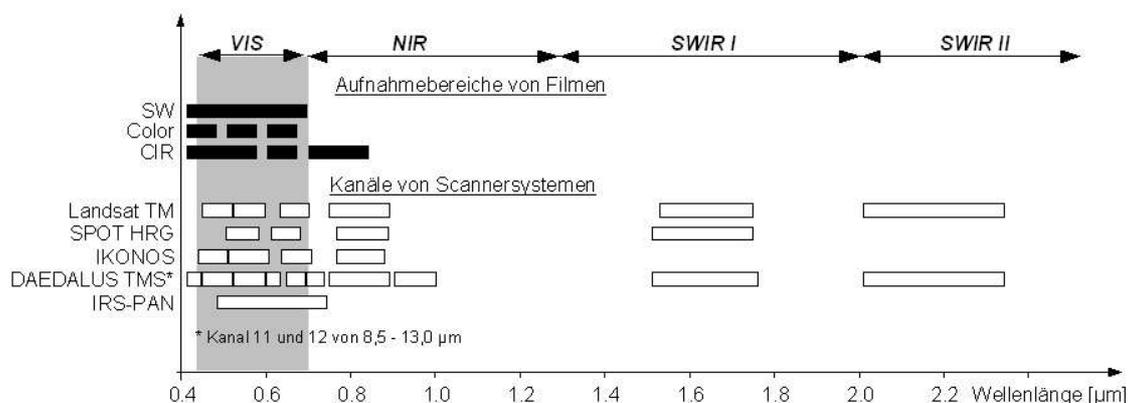


Abbildung 2.3: Filmempfindlichkeiten und Kanäle ausgewählter fernerkundlicher Aufnahmesysteme

Luftbilder gehören zu den Klassikern fernerkundlicher Daten. Sie können mit flugzeug- und satellitengestützten Systemen aufgenommen werden. Operationell werden am häufigsten Luftbilder flugzeuggestützter Systeme eingesetzt. Entsprechend der geringen Befliegungshöhe sind sie von einer hohen räumlichen Auflösung gekennzeichnet. Neben Flughöhe, Flugzeit, Filter- und Kamertechnik bestimmt vor allem die Eigenschaft des eingesetzten Filmmaterials die Einsatzmöglichkeiten (Bastian & Schreiber, 1999). Von den Vermessungsämtern werden vor allem Schwarz-Weiß (SW) und Farbaufnahmen zur Aktualisierung topographischer Karten und anderer objektorientierter Kartierungen (z.B. Gebäude) verwendet. Für ökologisch orientierte Untersuchungen, wie z.B. Biotopkartierungen, werden Color-Infrarot-Luftbilder (CIR) eingesetzt. Sie decken die Bereiche der elektromagnetischen Strahlung ab, in denen die Vegetation die größten Unterschiede in der Reflexion zeigt.

Scannersysteme zeichnen die Radianz in einzelnen Bildpunkten (Pixeln) digital mit Hilfe von in bestimmten Wellenlängenbereichen sensiblen Detektormaterialien auf. Dabei unterscheidet man zwischen panchromatischen, multispektralen und hyperspektralen Aufnahmesystemen. Panchromatische Sensoren zeichnen die Radianz in einem breiten Kanal mit einer meist sehr hohen räumlichen Auflösung auf (z.B. IKONOS (PAN) mit 1m räumlicher Auflösung). Je schmaler die Kanäle, in denen Strahlung aufgenommen wird, desto weniger Energie erreicht das Detektormaterial. Für eine qualitativ gute Aufzeichnung der Radianz ist jedoch eine hohe Intensität an Strahlung notwendig, die durch eine Minderung der räumlichen Auflösung erreicht werden kann.

Schmalbandige multispektrale Systeme sind im Vergleich zu panchromatischen Systemen durch geringere räumliche Auflösungen gekennzeichnet. Ihr Vorteil liegt im höheren spektralen Informationsgehalt. Zu den bekanntesten multispektralen satellitengestützten Systemen gehören z.B. die LANDSAT-Systeme (TM, MSS und ETM+), SPOT-HRG, IRS-1C und IKONOS. Das satellitengestützte QuickBird-System gehört zu den räumlich am besten aufgelösten multispektralen Sensoren (2,9m).

Höhere räumliche und gleichzeitig spektrale Auflösungen lassen sich mit flugzeuggestützten Systemen aufgrund der geringeren Entfernung der Sensoren zur Erdoberfläche erreichen. Dazu zählt z.B. der DAEDALUS-TMS-Scanner. Bei einer Flughöhe von 3000m ist eine räumliche Auflösung von ca. 6 x 6m möglich. Ein die räumliche Auflösung begrenzender Faktor ist die Aufnahmegeschwindigkeit des Sensors, die mit der Geschwindigkeit des Flugzeuges abgestimmt werden

muss. Die Abtastbreite ist dafür wesentlich geringer als bei satellitengetragenen Systemen.

Die neuesten Entwicklungen in der Sensortechnik ermöglichen den Bau hyperspektraler Sensoren, die in dieser Arbeit die Grundlage für eine stadtoökologische Auswertung bilden. Hyperspektrale Sensoren werden auch als abbildende Spektrometer bezeichnet. Sie zeichnen die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung in 64 bis mehr als 200 Kanälen für jeden Bildpunkt auf. In der Gesamtheit der Bildpunkte entsteht für jeden Kanal ein Bild. Die spektrale Auflösung beträgt 10-20nm. Aufgrund der fast lückenlosen Abdeckung des reflektiven Wellenlängenbereichs in den atmosphärischen Fenstern entsteht ein nahezu kontinuierliches Spektrum.

Die meisten hyperspektralen Daten werden von flugzeuggetragenen Systemen aufgenommen (AVIRIS, DAIS, HYMAP). Die variable Aufnahmehöhe ermöglicht zusätzlich zur hohen spektralen Auflösung auch eine hohe räumliche Auflösung. Die Kombination aus hoher spektraler und räumlicher Auflösung ermöglicht die Identifizierung der kleinflächigen städtischen Objekte anhand ihrer Oberflächenmaterialien. Seit jüngster Zeit gibt es auch satellitengetragene Sensoren, wie z.B. HYPERION, der über 220 Kanäle verfügt (Storment, 2003). Diese Daten sind jedoch aufgrund ihrer räumlichen Auflösung von 30m nicht für Analysen urbaner Gebiete geeignet.

In Abbildung 2.4 wird der Informationsgehalt eines Hyperspektralsystems gegenüber einem Multispektralsystem an einem Beispiel demonstriert. Die Unterscheidung von Flächen unterschiedlicher Versiegelung ist für eine stadtoökologisch motivierte fernerkundliche Auswertung von hoher Bedeutung. Abbildung 2.4a zeigt die spektralen Charakteristika eines Dachmaterials aus Kunststoff (Polyethylen), das durch mehrere charakteristische Absorptionsbanden gekennzeichnet ist. Diese sind in den vom multispektralen Sensor Landsat-TM5 aufgezeichneten Reflexionssignaturen nicht mehr vorhanden (Abb. 2.4b). In Anbetracht der Vielzahl städtischer Materialien ist eine sichere Identifizierung auf der Basis ihrer Reflexionseigenschaften nicht mehr durchführbar.

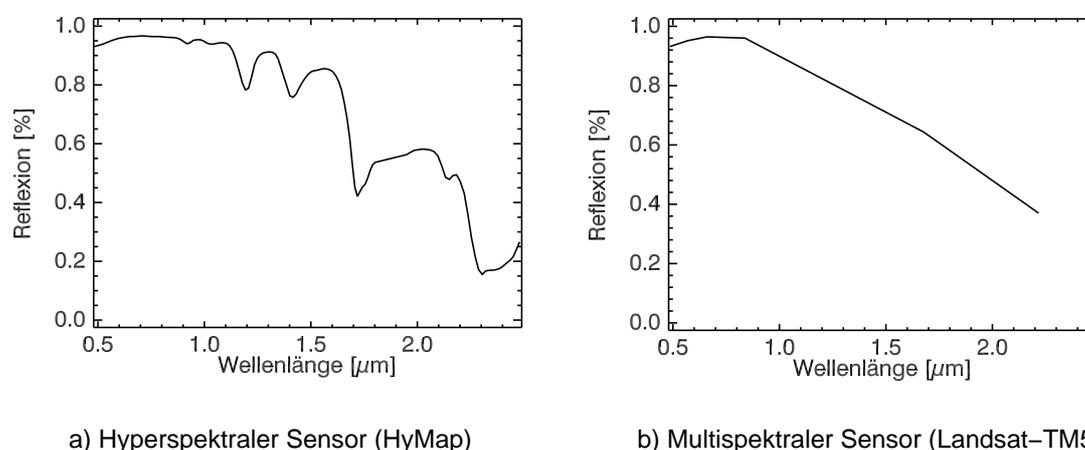


Abbildung 2.4: Spektrale Reflexionssignaturen eines hyperspektralen Sensors (HyMap) im Vergleich mit einem multispektralen Sensor (Landsat-TM 5); am Beispiel von Kunststoff (Dachmaterial)

2.2 Geographische Informationssysteme (GIS)

Ein Geographisches Informationssystem (kurz: Geo-Informationssystem) ist ein rechnergestütztes System, welches aus Hardware, Software, Daten und Anwendungsmodulen besteht. Mit einem GIS können raumbezogene Daten digital erfasst, analysiert sowie präsentiert werden (Bill & Fritsch, 1991). In der vorliegenden Arbeit wird die GIS-Software ARC/INFO (Version 8.0.2)

eingesetzt. Dieses hybride GIS basiert auf dem relationalen Datenmodell, das sowohl die Verarbeitung von Raster- und Vektordaten, als auch ihre Verknüpfung ermöglicht. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Grundlagen und GIS-Funktionalitäten, die in der Arbeit Anwendung fanden.

Sowohl Raster- als auch Vektordaten setzen sich aus einer geometrischen und thematischen Komponente zusammen. Die geometrischen Elemente von Vektordaten sind Punkte, Linien und Polygone. Diese einzelnen oder zusammengesetzten Einheiten werden als Objekte bezeichnet, deren Geometrie einschließlich ihrer Lage im Koordinatensystem in einer Datenbank tabellarisch beschrieben wird. Die Objekte sind in dieser Datenbank über einen Schlüssel (ID) eindeutig identifizierbar. Gleichzeitig können den Objekten über die ID thematische Daten in Form von Attributen zugeordnet werden (Abb. 2.5).

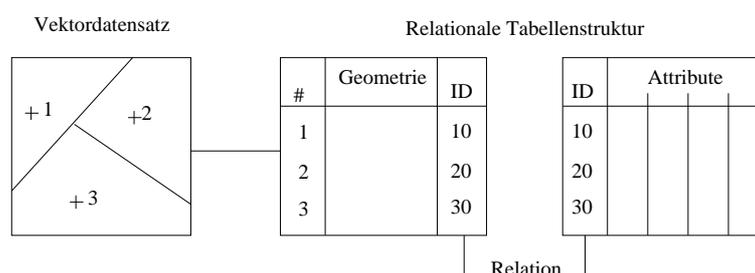


Abbildung 2.5: Struktur von Vektordaten im relationalen Datenmodell; nach [ESRI \(1994b\)](#)

Diese Datenstruktur wird unter anderem für die digitale Erfassung von analogen Kartierungen (z.B. Biotopkartierung) genutzt. Eine der häufigsten Methoden der Datenerfassung ist die manuelle Digitalisierung. Dabei werden von einem Bearbeiter die Objekte in einer analog vorliegenden Karte entsprechend ihrer geometrischen und thematischen Bedeutung erkannt und direkt im GIS kodiert. Die Digitalisierung kann auch auf der Basis von anderen Medien, wie z.B. Luftbildern, durchgeführt werden, solange vom Bearbeiter Objekte unterscheidbar sind.

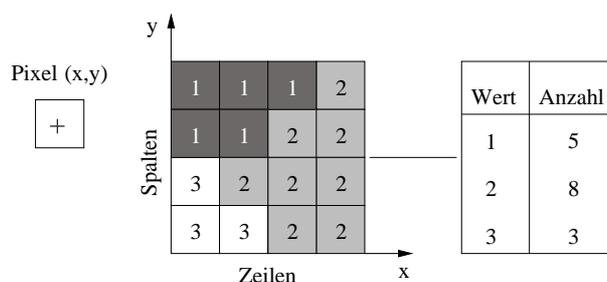


Abbildung 2.6: Struktur von Rasterdaten im relationalen Datenmodell; nach [ESRI \(1994a\)](#)

Im vorliegenden GIS ist das geometrische Grundelement der Rasterdaten das Pixel (*picture element*), welches in einer Matrix in Zeilen und Spalten angeordnet ist (Abb. 2.6). Es wird entsprechend seines Mittelpunktes im Koordinatensystem eingeordnet. Die thematische Information ist durch die Pixelwerte repräsentiert. Das Histogramm der Matrix ist in der Datenbank in Form einer Tabelle gespeichert (Abb. 2.6). In dieser Form werden beispielsweise klassifizierte Daten gespeichert. Der Pixelwert entspricht dabei dem entsprechenden Klassencode.

Das GIS beinhaltet eine Reihe von Funktionalitäten, wie z.B. die Verknüpfung der Vektor- und Rasterdaten über die Tabellenstruktur. In Abbildung 2.7 ist ein Beispiel demonstriert, indem die Vektor- und Rasterdaten die gleichen Flächeneinheiten darstellen. In den Vektordaten werden

die Flächen über die ID und im Rasterdatensatz über den Pixelwert repräsentiert. Bei einheitlichem geometrischen Bezug in einem Koordinatensystem sind beide Datensätze verknüpfbar. Die Datensätze können jeweils über weitere thematische Informationen verfügen. Beispielsweise können die Pixelwerte des Rasterdatensatzes Klassen zugeordnet sein, die das Produkt einer automatisierten Analyse von Spektraldaten sind. Diese Information steht über die Verknüpfung („Relation“) auch im Rahmen der Vektordaten zur Verfügung.

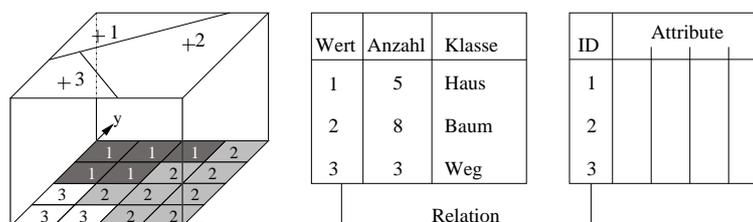


Abbildung 2.7: Verknüpfung von Informationen aus Raster- und Vektordatensätzen

Weitere wichtige Werkzeuge des GIS sind die datenbankorientierten Funktionen zur Verknüpfung von räumlichen (Geometrie) und thematischen Informationen und Funktionen zur Selektion von Informationen nach bestimmten Kriterien. Die Durchführung von mathematischen Operationen ist innerhalb und zwischen Attributtabelle sowie auf der Basis der Rasterdaten möglich. Diese Funktionen unterstützen die nach sinnvollen Kriterien bestimmte Präsentation von Ergebnissen in Form von Karten. Nähere Ausführungen dazu sind in [ESRI \(1994a\)](#) und [ESRI \(1994b\)](#) enthalten.

2.3 Biotopkartierung in Städten

Die wichtigste Aufgabe der ökologischen Stadtplanung ist entsprechend der Forderung aus Paragraph 1 des Bundesnaturschutzgesetzes der Schutz, die Pflege und die Entwicklung von Natur und Landschaft im Siedlungsbereich. Notwendige Voraussetzung dafür ist die Erfassung des aktuellen Zustandes der städtischen Landschaft in Form der Stadtbiotopkartierungen. Sie bilden die Grundlage für weiterführende Fachplanungen, wie z.B. der Landschaftsplanung und der Bauleitplanung ([Grünflächenamt Dresden, 1998](#)).

In Abschnitt 2.3.1 werden das Wesen und die Besonderheiten städtischer Biotope erklärt. Ihre flächendeckende Kartierung wird mit der Methode der CIR-Luftbildkartierung realisiert. Die Grundlagen sowie die Möglichkeiten und Grenzen dieser Methode werden in Abschnitt 2.3.2 dargestellt.

2.3.1 Definition städtischer Biotope

Die meisten Organismen sind an spezielle Lebensräume gebunden, die alle für ihre Existenz notwendigen Bedingungen erfüllen. Der abgrenzbare charakteristische Lebensraum für eine spezifische Gemeinschaft von Pflanzen und Tieren wird als **Biotop** bezeichnet. Eine Gruppe gleichartiger oder ähnlicher Biotope nennt man **Biotoptyp**.

In der Stadt hat die menschliche Nutzung und die daraus resultierende Strukturierung (Baustruktur, Stadtzonen, Vernetzung von Vegetation und versiegelten Flächen) einen entscheidenden Einfluß auf die Ausbildung der Biotope ([Sukopp et al., 1998](#)). In der ökologischen Stadtplanung werden daher mehrere Nutzungstypen unterschieden, die besonders für Pflanzen- und

Tiergesellschaften charakteristische Lebensräume darstellen (Tab. 2.2). In der Praxis sind sie oft gleichbedeutend mit Biotoptypen.

Tabelle 2.2: Stadtökologische Gliederung nach Nutzungstypen (Sukopp *et al.*, 1998)

Hauptnutzungstypen	Subtypen
Bebaute Gebiete (exkl. Industrie- und Gewerbeflächen)	Dicht bebaute Zentrumsgebiete Geschlossene Blockrandbebauung Wohngebiete mit großflächigem Abstandsgrün Villenviertel Siedlungen mit Ziergärten Öffentliche Baukomplexe
Industrie- und Gewerbeflächen	Gewerbeflächen Industrieflächen
Verkehrsflächen	Große Straßen Eisenbahngelände Hafengelände und Wasserstraßen Flughäfen
Innerstädtische Brachflächen	
Entsorgungsflächen	Mülldeponien Rieselfelder Abraumhalden von Bergwerken
Grünanlagen	Parkanlagen Kleingärten Friedhöfe

Grundsätzlich erfolgt eine Einteilung in bebaute und unbebaute Biotoptypen. Bebaute Biotope sind nicht selten als **Biotopkomplexe** zu verstehen. Die Biotopkomplexe stellen eine mehr oder weniger regelmäßig wiederkehrende Vergesellschaftung von Einzelbiotopen dar. Bebaute Biotope im weiteren Sinne enthalten somit nicht nur einen Lebensraum, sondern mehrere. Im Gegensatz dazu werden unbebaute Biotope nach bestimmten ökologischen Funktionen eingeteilt. Dazu zählen das Vorhandensein seltener Pflanzen- und Tierarten, Rückzugsgebietsfunktion, hoher Selbstregulierungsgrad und hohe strukturelle Diversität. Die unterschiedliche Ausstattung der bebauten gegenüber den nicht bebauten Biotopen ist in Abbildung 2.8 verdeutlicht.

Abbildung 2.8a zeigt ein bebautes Biotop, welches neben Gebäuden und anderen versiegelten Flächen auch Vegetation, wie z.B. Rasenflächen, beinhaltet. Die unbebauten Biotope in Abbildung 2.8b sind entsprechend ihrer Baumarten und -gattungen sowie der Altersklassen und der Bestandsstruktur differenziert. Die Biotope im Bildbeispiel bestehen aus nur einem Oberflächentyp, dem Wald.

2.3.2 CIR-Luftbildkartierung von Biotoptypen

Die Kartierung von Stadtbioptypen wird derzeit auf der Grundlage von Color-Infrarot-Luftbildern (CIR) und Geländebegehungen durchgeführt. Die Luftbilder werden mit einer 60%igen Überlappung aufgenommen. Dies ermöglicht die stereoskopische Auswertung, die wichtige Detailinformationen zur Struktur der Biotope liefert. Die Auswertung wird von mehreren Bearbeitern manuell durchgeführt, deren Können und Erfahrung maßgeblich die Qualität der Kartierung bestimmen. Das Ergebnis ist eine sehr detaillierte bioökologische Aufnahme der städtischen Biotope. Im Folgenden werden die Möglichkeiten und Grenzen der zur Erfassung verwendeten Kartierung beleuchtet.

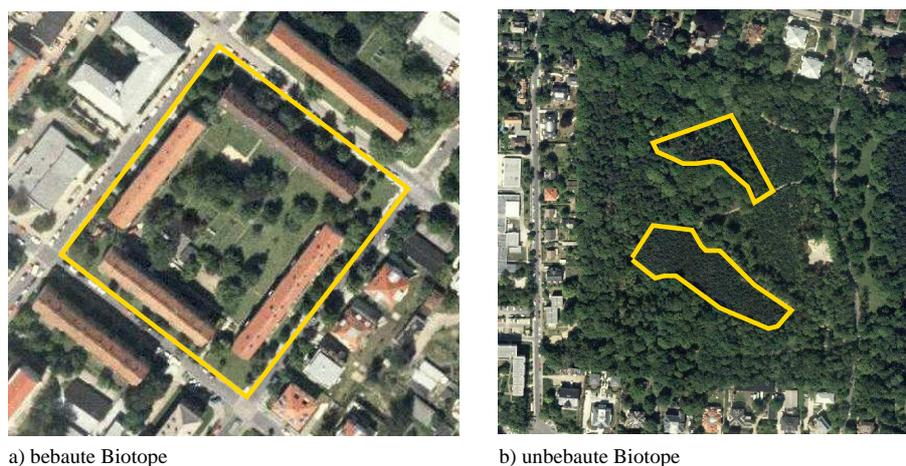


Abbildung 2.8: Unterschiedliche Ausstattung bebauter und unbebauter Biotop

Die Nutzung von CIR-Luftbildern für Vegetationskartierungen besitzt viele Vorteile (Bierhals, 1988). Sie erwies sich besonders im Hinblick auf die nach der politischen Wende in den 90ern notwendigen Biotopkartierungen in den neuen Bundesländern als geeignet (Kenneweg, 1996). Grund dafür ist die gegenüber der Feldkartierung 3-4 mal schnellere Verfügbarkeit der Ergebnisse (Grünflächenamt Dresden, 1998). Der Einsatz der CIR-Luftbilder ist darin begründet, da Vegetation im Wellenlängenbereich des nahen Infrarots (NIR) ein höheres Reflexionsvermögen besitzt, als in dem für das menschliche Auge sichtbaren Bereich (VIS). Der CIR-Film wird im VIS und NIR-Bereich belichtet, woraus eine stärkere Farb- und Helligkeitsdifferenzierung resultiert, die das Erkennen und Abgrenzen unterschiedlicher vegetationsbestandener Biotop erleichtert. Zusätzlich wird die kurzwellige, kontrastschwächere Strahlung im blauen Wellenlängenbereich weggefiltert (Arbeitskreis CIR-Bildflug, 1995).

Die Kartierung der Biotoptypen erfolgt über die Differenzierung nach Nutzungstypen (siehe Tab. 2.2) und deren Eigenheit und Charakter, die durch deren strukturelle Ausstattung bestimmt sind. Bei Betrachtung der Strukturparameter zeigt sich, dass die bebauten und unbebauten Biotop mit einem unterschiedlichen Detailliertheitsgrad erfasst werden (siehe auch Abb. 2.8). Die Beschreibung der strukturellen Ausstattung der bebauten städtischen Biotop erfolgt nach:

- der Vernetzung von bebauten und versiegelten Freiflächen mit Vegetationsflächen
- der Ausstattung der unbebauten Flächen (grobe Einteilung der Vegetation nach Bewuchs, z.B. Rasen, Wiesen und Gehölze)
- der Vernetzung der einzelnen Vegetationsklassen untereinander.

Die Struktur der unbebauten Biotop wird im biologischen Sinne wesentlich detaillierter erfasst. Sie unterscheiden sich je nach Biotoptyp. Es folgt eine Aufzählung einiger wichtiger Strukturparameter:

- Strukturbildene Gattung oder Art (z.B. Wälder)
- Entwicklungszustand und Morphologie (vor allem bei Gewässern und deren Uferzonen)
- Nutzungsintensität (Grünflächen)

- Dichte der Bodenbedeckung.

Für die Qualität der Kartierung sind neben dem Bildmaterial und der Leistungsfähigkeit der Auswertegeräte das Können und die Erfahrung des Interpretieren von ausschlaggebender Bedeutung. Die Biotoptypen werden anhand einer Vielzahl von Merkmalen visuell im Luftbild vom Interpretieren abgegrenzt und charakterisiert. Zu den Merkmalen zählen z.B. die absolute Lage, Größe, Form und Schattenwurf von Objekten und deren Gefügemuster sowie Farbtönung und -sättigung, Helligkeit und Textur. Ausführliche Erklärungen zu diesen Merkmalen sind in [Arbeitskreis CIR-Bildflug \(1995\)](#) und [Bastian & Schreiber \(1999\)](#) gegeben.

Zur möglichst objektiven und nachvollziehbaren Ansprache der Biotoptypen aus den CIR-Luftbildern wird im Vorfeld der Kartierung ein Interpretationsschlüssel erarbeitet, der eine Reihe von Referenzflächen enthält. Dabei werden der aktuelle Biotoptypenzustand per Foto und seine Darstellung im CIR-Luftbild nebeneinander gezeigt. Die Erstellung dieses Interpretationsschlüssels erfordert umfangreiche Geländearbeiten kurz nach der CIR-Luftbildbefliegung. Er ist nicht universell anwendbar, sondern regional und zeitlich begrenzt.

Zur optimalen Nutzung und weiterführenden Auswertung der Kartierung wird diese in einem GIS integriert und verwaltet. Dies ermöglicht den Aufbau einer umfangreichen Datenbasis für die ökologische Bewertung der Biotoptypen, wozu beispielsweise eine weitere Vegetationskartierung besonders wertvoller Biotope gehört.

Die CIR-Luftbild-gestützte Methode der Biotoperfassung ist besonders für Erstkartierungen unumstritten notwendig, um den hohen Informationsgehalt zu erreichen. Für eine effektive Aktualisierung ist sie dagegen nicht geeignet. Nach Aussagen des Grünflächenamtes liegt der zeitliche Hauptaufwand der Kartierung in der manuellen Interpretation der CIR-Luftbilder, welcher nicht mit der Veränderung einiger Bereiche in der Stadt mithalten kann. Zudem wird immer wieder betont, dass die Datenbasis für die auf der Grundlage der Biotopkartierung erfolgende ökologische Bewertung zu gering ist ([Bastian & Schreiber, 1999](#)). Im Besonderen fehlen quantitative Werte zur weiteren Zustandsbeschreibung der städtischen Biotope, da ihre Charakterisierung anhand der Strukturmerkmale auf Beschreibungen basiert. In einigen Städten werden aus diesem Grunde mehrstufige Versiegelungs- bzw. Bebauungsgrade angegeben. Sie sind jedoch kein Standard, da sie zum einen aus den CIR-Luftbildern visuell geschätzt werden und zum anderen die Ableitung gesicherter Werte nicht garantiert werden kann.

2.4 Automatisierte Auswertemethoden von Fernerkundungsdaten

Automatisierte Auswertemethoden gewannen vor allem aufgrund des visuell nicht mehr überschaubaren vieldimensionalen Informationsgehaltes multispektraler Fernerkundungsdaten und der digitalen Verfügbarkeit der Daten an Bedeutung. Seither stehen sämtliche Fernerkundungsdaten, darunter auch Luftbilder und panchromatische Bilddaten, im Mittelpunkt der Entwicklung automatischer Algorithmen. Die Anwendungsbereiche sind ebenso vielfältig wie die Methoden. Im Folgenden wird daher ein Überblick über die bisherigen computergestützten Auswertemethoden gegeben, die zur Lösung stadtoökologischer Fragestellungen entwickelt wurden.

Luftbilder und panchromatische Satellitendaten wurden aufgrund ihrer hohen räumlichen Auflösung vor allem für die Extraktion künstlicher Objekte wie z.B. Straßen und Häuser eingesetzt. Eine große Rolle spielten Verfahren zur modellbasierten strukturellen Luftbildauswer-

tung (Bähr *et al.*, 1995). Dabei wurden Objekte aus der Karte und dem Luftbild mit generischen Modellen beschrieben. Zusätzlich wurden Karteninformationen wie die Farbe und Textur für die Entwicklung kombinierter Verfahren zur Luftbilddauswertung eingesetzt (Dubuisson-Jolly & Gupta, 2000). Andere Segmentierungsverfahren nutzten Modelle, die mit unterschiedlichen Auflösungsstufen Kanten und Ecken von Objekten extrahieren (Couloigner & Ranchin, 2000; Grün *et al.*, 1997). Diese Verfahren erfassen die einzelnen Kompartimente der städtischen Umwelt allerdings nur räumlich. Die Zuordnung von thematischen Informationen, wie z.B. die Erfassung nach Vegetationsklassen, ist damit meist nicht möglich.

Für die ökologisch orientierte Bewertung des städtischen Raumes wird eine flächendeckende thematische Inventarisierung der städtischen Elemente angestrebt. Dazu wurden vor allem multispektrale Satellitenbilder eingesetzt. Die städtischen Oberflächen können aufgrund unterschiedlicher spektraler Reflexion erfasst werden. Zur Auswertung wurden standardisierte Bildverarbeitungsmethoden wie z.B. das NDVI-Verfahren (*Normalized Difference Vegetation Index*) und die *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung verwendet (Halounova, 1994; Jensen *et al.*, 1994; Lo, 1997). Zur Verbesserung der pixel-basierten Methoden wurden zusätzlich Form- und Farbmerkmale in den Auswertemethoden berücksichtigt (Stuckens *et al.*, 2000).

Eine große Rolle spielten auch Methoden zur Bildverbesserung durch die Fusion der räumlich gering aufgelösten Multispektraldaten mit hochaufgelösten panchromatischen Daten. Sehr wenige Studien beschäftigten sich in der Vergangenheit mit dem spezifischen spektralen Reflexionsverhalten urbaner Oberflächen in den Satellitenbilddaten (Ormsby, 1992). Diese Methoden wurden für die Überwachung von Urbanisierungsprozessen und großflächige Betrachtungen der Versiegelungstätigkeit eingesetzt. Eine detaillierte Inventarisierung der für urbane Räume typischen kleinräumigen Strukturen und ihrer Charakteristika war jedoch aufgrund der ungenügenden räumlichen und spektralen Auflösung der Satellitendaten eingeschränkt.

Mit der Weiterentwicklung der Sensortechnik entstanden multispektrale Aufnahmesysteme mit einer verbesserten räumlichen Auflösung. Dazu zählen flugzeuggetragene Systeme wie DAEDALUS-ATM und TMS und satellitengetragene Systeme wie IKONOS. Die Entwicklung von neuen Auswertemethoden unter Verwendung dieser Daten zeigten ihre grundsätzliche Eignung für städtische Fragestellungen (Wharton, 1987; Sties, 1997; Ringle & Sties, 1997; Mueller & Segl, 2001). Dennoch reichte die spektrale Auflösung nicht aus, um ökologisch relevante Einheiten zu differenzieren. Meinel *et al.* (2001) nutzten daher stärker das hohe räumliche Informationspotential, indem der Klassifizierung eine Segmentierung der räumlich abgrenzbaren Einheiten vorgeschaltet wurde. Trotzdem diese objektorientierte Methode zu erheblich besseren Ergebnissen führte, verblieben die Schwierigkeiten der korrekten Klassifizierung der Raumeinheiten aufgrund der geringen spektralen Information.

Neue Möglichkeiten zur automatischen Erfassung städtischer Oberflächen eröffnen hyperspektrale Aufnahmesysteme wie AVIRIS, DAIS, HYMAP und CASI, die sowohl durch eine hohe räumliche als auch eine hohe spektrale Auflösung gekennzeichnet sind. Dies erforderte die Entwicklung an den hohen Informationsgehalt der Daten angepasster Auswertemethoden. Vor dem Hintergrund der Vielzahl kleinflächig auftretender städtischer Objekte sind hyperspektrale Daten vor allem durch einen hohen Anteil von Pixeln gekennzeichnet, die spektrale Mischungen verschiedener Oberflächenmaterialien darstellen. Daher wurden vor allem Auswertemethoden zur vollständigen spektralen Entmischung, wie z.B. das *Linear Spectral Unmixing*-Verfahren (Bhaskaran & Datt, 2000) oder partielle Entmischungsverfahren, wie der *Mixture Tuned Matched Filtering*-Algorithmus eingesetzt (Ben-Dor *et al.*, 1998). Probleme bestanden bei diesen Verfahren in der hohen Anzahl der Endmember (Oberflächen) und der Bestimmung der richtigen Endmemberkombinationen. Ihre sichere Bestimmung ist jedoch entscheidend für die Qualität

der Ergebnisse. Daher wurde am GFZ Potsdam ein Verfahren zur Reduktion der Endmember auf die wahrscheinlichsten pro Pixel entwickelt (Segl & Roessner, 1999) und für die Auswertung von DAIS-7915-Daten der Stadt Dresden eingesetzt (Roessner *et al.*, 2001). Die hohe räumliche und spektrale Auflösung der DAIS-7915-Daten ermöglichte die Verbesserung der Ergebnisse durch die Kombination von spektralen Merkmalen mit Formmerkmalen (Segl *et al.*, 2003b). Dabei wurden sowohl die vom Sensor aufgezeichneten Informationen im reflektiven Wellenlängenbereich als auch thermale Kanäle eingesetzt.

2.5 Hyperspektrale Fernerkundung zur Charakterisierung von Stadtbiotopen

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Arbeiten zeigen die Eignung der Hyperspektraldaten für eine automatische Auswertung. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für ihren Einsatz in der ökologischen Stadtplanung. Durch die hohe räumliche Auflösung werden die kleinflächigen Objekte in der Stadt aufgelöst. Damit ist es möglich, diese Objekte anhand der spezifischen Reflexionseigenschaften ihrer Oberflächenmaterialien mit automatischen Verfahren zu identifizieren (Abb. 2.9).

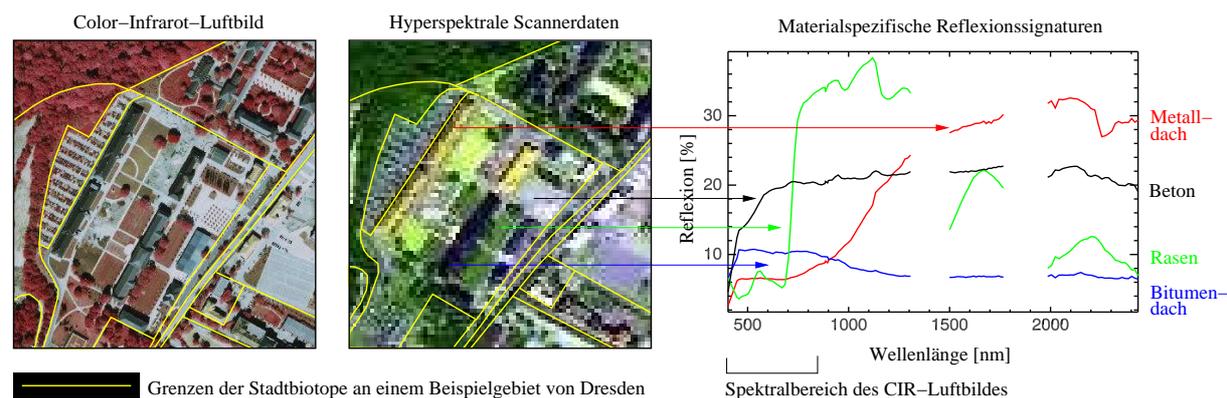


Abbildung 2.9: Potential hyperspektraler Daten für die Ableitung von quantitativen Informationen zur Zustandsbeschreibung städtischer Biotope

Die Oberflächenmaterialien bilden eine breitere Datenbasis zur Beschreibung der strukturellen Ausstattung städtischer Biotope. Neben den verbalen Beschreibungen im Rahmen der Strukturmerkmale sind mit den Oberflächenmaterialien quantitative Informationen zu ihrer materiellen Ausstattung verfügbar.

Zur weiteren Charakterisierung der städtischen Biotope ist es notwendig, die fernerkundlich erfassbaren Oberflächenmaterialien stadtoökologisch relevanten Kategorien zuzuordnen. Dazu bietet sich eine Einteilung nach dem Versiegelungsgrad an. Diese entspricht Kategorien, die bisher im Rahmen von manuellen stadtoökologischen Bestandsaufnahmen auf der Basis von Feldbegehungen und Luftbildern aufgenommen wurden (Krause, 1989; Sandtner, 1998). Die Einteilung stellt das Bindeglied zwischen der Fernerkundung und der stadtoökologischen Analyse dar (Abb. 2.10). Die Kategorien in Ebene I-III werden als Oberflächentypen bezeichnet. Die Ebene IV enthält die Oberflächenmaterialien.

In der Ebene I wird zwischen versiegelten und unversiegelten Oberflächen unterschieden. Damit gelingt eine erste grobe Trennung zwischen anthropogenen und vorwiegend naturnahen

Oberflächen. Die versiegelten Flächen werden in bebaute Flächen und versiegelte Freiflächen eingeteilt (Ebene II). Die bebauten Flächen können in den hyperspektralen Bilddaten über die Dachmaterialien erfasst werden, während die versiegelten Freiflächen nochmals in vollversiegelte und teilversiegelte Flächen unterteilt werden (Ebene III). Die unversiegelten Oberflächen werden zum einen nach vegetationsbedeckten und vegetationsüberschirmten Freiflächen und zum anderen nach offenen Freiflächen differenziert (Ebene II). Erstere werden von der hochstämmigen Vegetation (Bäume und Sträucher) und der niedrigen Vegetation (Bodendecker, wie z.B. Rasen) repräsentiert. In der Kategorie offene Freiflächen sind sowohl offene Bodenflächen (z.B. Kiesflächen, humoser Boden) als auch Wasserflächen erfasst (Ebene III). Jede Gruppe der Ebene III wird von einer Vielzahl von Oberflächenmaterialien repräsentiert, die in der Ebene IV enthalten sind. In Abbildung 2.10 sind einige Beispiele aufgeführt.

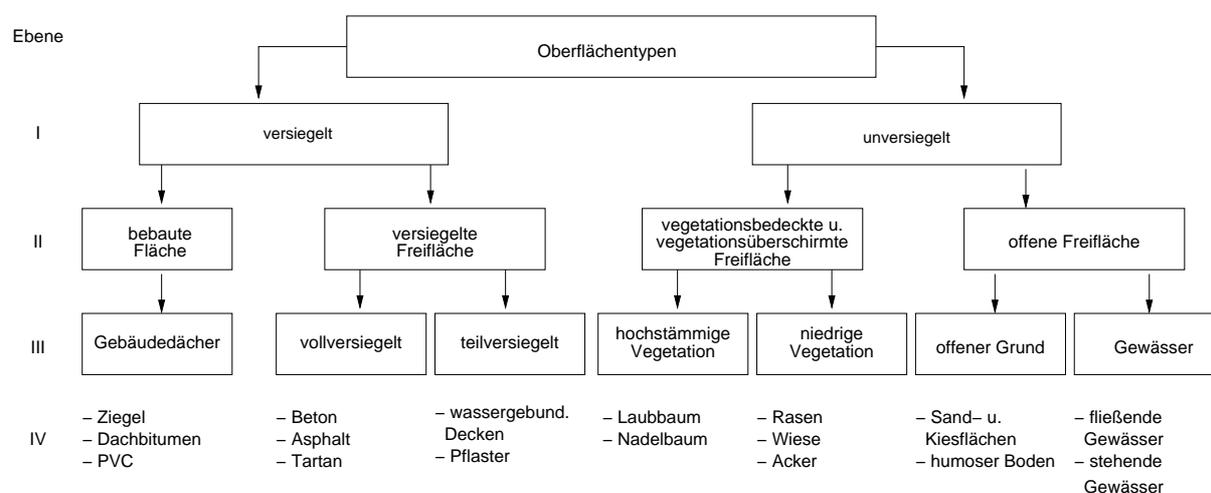


Abbildung 2.10: Stadtökologisch orientierte Einteilung der fernerkundlich erfassbaren Oberflächenmaterialien nach ihren Versiegelungseigenschaften; Ebene I-III repräsentieren Oberflächentypen, Ebene IV enthält die Oberflächenmaterialien (Beispiele)

Auf der Basis dieser stadtoökologisch orientierten Einteilung können zusätzlich zur materiellen Ausstattung weitere quantitative Parameter abgeleitet werden. Diese sind Merkmale zur Zustandsbeschreibung von Stadtbiotopen, die nach Pohl (1991) gerade in ihrer räumlichen und zeitlichen Veränderung betrachtet, geeignete Bemessungsgrundlagen für die Durchsetzung der Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege darstellen. Die von Krause (1989) vorgeschlagenen Flächendichtemaße dienen der Charakterisierung städtischer Baublöcke. Grundlage dieser Maße sind die städtischen Oberflächenmaterialien.

Zu den Parametern zählen der Versiegelungsgrad, die Dichte der Bebauung und der Anteil von strukturbildender Vegetation. Für die städtischen Biotope stellen diese Parameter die Grundlage zur quantitativen Beschreibung der Vernetzung von bebauten, versiegelten Freiflächen und Vegetationsflächen dar. Parameter, die zur Charakterisierung der Stadtbiotope besonders geeignet und im Rahmen der fernerkundlichen Oberflächenerfassung ableitbar sind, werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Bedeutung vorgestellt.

Der am häufigsten erhobene Parameter im Zusammenhang stadtoökologischer Zustandserfassungen ist die Bodenversiegelung. Nach Heber & Lehmann (1993) umfasst die Bodenversiegelung das vollständige oder teilweise Abdichten offener Böden durch bauliche Anlagen, Verkehrsflächen und Freiflächengestaltung. Sie wird mit dem **Versiegelungsgrad** angegeben, welcher den prozentualen Anteil der teil- und vollversiegelten Flächen einschließlich der bebauten Flächen angibt.

Die Bodenversiegelung hat vielfältige Einflüsse auf städtische Räume. Zum einen wird durch flächige Versiegelung die natürliche Speicherung des Niederschlagswassers im Boden und dessen Verdunstung über die Vegetation eingeschränkt. Dies führt zu einer sehr starken Belastung für städtische Abwassersysteme. Zum anderen sind damit die Ausbildung von Vegetation und damit verbundene natürliche Bodenprozesse wie Streuabbau, Bioturbation, Durchwurzelbarkeit und Durchlüftung stark dezimiert. Die Lebensbedingungen von Artengemeinschaften sind damit je nach Grad der Versiegelung stark beeinträchtigt beziehungsweise völlig gestört. In der stadtoökologischen Planung werden durch Belagsänderungen Entsiegelungen angestrebt.

Die im Versiegelungsgrad berücksichtigten teil- und vollversiegelten Flächen umfassen jedoch eine Vielzahl von Oberflächenmaterialien, die unterschiedliche Einflüsse auf das Klima, den Wasserhaushalt und die Bodenfunktion haben (Meinel & Netzband, 1997; Breuste *et al.*, 1996). Um den Grad der Beeinträchtigung auf die Bodenfunktion auszudrücken, stellte Pohl (1991) die Bodenfunktionszahl (BFZ) auf, welche einem gewichteten Versiegelungsgrad entspricht. Danach werden den verschiedenen voll-, teil- und unversiegelten Oberflächen entsprechend ihrer Versickerungsleistungen und Abflussintensitäten Gewichtungsfaktoren (Bodenkennwerte) zugeordnet. Der **gewichtete Versiegelungsgrad** ist ein sehr flexibel gestaltbarer Parameter in der Planungspraxis. So kann durch die Veränderung von Belagsarten eine höhere Bodenfunktion erreicht werden, ohne die Nutzbarkeit der betrachteten Fläche einzuschränken (z.B. Einsatz von Rasengittersteinen anstelle von Vollbeton bei Parkplätzen). Damit ist die BFZ ein wirkungsvolles Maß für die Überprüfung der Relevanz von Belagsänderungen zur Entsiegelung.

Die von Krause (1989) dargestellte **Bebauungszahl**¹ drückt das Verhältnis von bebauter und unbebauter Fläche aus. Die Art und Verteilung der Bebauung hat einen wesentlichen Einfluss auf den Strahlungshaushalt, die Temperatur und die lokalen Windverhältnisse in der Stadt. Desweiteren drücken sich in der Bebauung stadtstrukturelle Eigenheiten aus (Heber & Lehmann, 1993). So weist z.B. die Blockrandbebauung im Gegensatz zu Villengebieten (Biototypen der Wohnbebauung) eine sehr hohe Bebauungsdichte auf. Für die Planung hat dieser Parameter große Relevanz. In dicht bebauten Gebieten kann eine Vergrößerung des Lebensraumes für die Pflanzen- und Tierwelt durch Bepflanzungen der Dächer und Berankungen der Fassaden erreicht werden. Damit wird sowohl das Klima als auch das ästhetische Bild dieser Stadtteile verbessert (Sukopp *et al.*, 1998).

Die Vegetation ist ein wesentlicher, jedoch oft stark dezimierter Bestandteil der Stadt. Den größten Einfluss auf die Art und Verteilung der Vegetation hat die Flächennutzung. Zur Charakterisierung der städtischen Vegetation schlägt Krause (1989) die **Überschirmungsflächenzahl**, die **Vegetationsflächendeckungszahl** und die **Gesamtvegetationsflächenzahl** vor². Die Überschirmungsflächenzahl beschreibt das Verhältnis aus vegetationsüberschirmter Freifläche zu einer Bezugsfläche (z.B. Biotop). Zur überschirmenden Vegetation gehören Bäume und Sträucher (hochstämmige Vegetation). Die Vegetationsflächendeckungszahl bestimmt das Verhältnis aus vegetationsbedeckter Freifläche zu einer Bezugsfläche. Zu den vegetationsbedeckten Freiflächen gehört die niedrige bodenbedeckende Vegetation unterschiedlicher Deckungsgrade, wie z.B. Rasen und Wiesen. Eine Zusammenfassung finden diese Parameter in der Gesamtvegetationsflächenzahl. Dabei wird das Verhältnis von vegetationsüberschirmter und vegetationsbedeckter Freifläche zur Bezugsfläche ausgedrückt. Durch die zusammenfassende Betrachtung der Vegetationsparameter lassen sich wirkungsvolle Aussagen zur Vernetzung strukturbildener Vegetation innerhalb eines Biotops ableiten.

¹in dieser Arbeit als Bebauungsgrad bezeichnet

²in dieser Arbeit als Gesamtvegetationsgrad, Überschirmungsgrad und Vegetationsdeckungsgrad bezeichnet

Untersuchungsgebiet und Datenbasis

In diesem Kapitel werden alle für den Auswerteprozess verwendeten Daten vorgestellt und ihre Eigenschaften erläutert. Die gesamte digitale Datenbasis ist in Tabelle 3.1 zusammengestellt. In Abschnitt 3.1 wird das Untersuchungsgebiet in Dresden unter Berücksichtigung stadtstruktureller Besonderheiten vorgestellt. Die amtlichen Daten werden bezüglich ihrer Eigenschaften und Eignung für die gestellte Aufgabe in Abschnitt 3.2 bewertet. In Abschnitt 3.3 werden die hyperspektralen Flugzeugscannerdaten charakterisiert und alle Schritte zur Vorbereitung der Daten erläutert.

Tabelle 3.1: Datengrundlage für das Untersuchungsgebiet in Dresden

Datenart	Eigenschaften	Verwendung
Hyperspektrale HyMap-Daten (Raster)	6m Bodenauflösung, 128 spektrale Kanäle im reflektiven Bereich	Automatisierte Erfassung der städtischen Oberflächenmaterialien
Stadtbiotopkartierung (Vektor)	Maßstab 1:5000	Räumliche und thematische Grundlage zur fernerkundlichen Charakterisierung
Topographische Karte (analog, Raster)	Maßstab 1:25000, Kartenblätter 4848, 4948, 5048	Geometrische Korrektur der hyperspektralen Flugzeugscannerdaten
Orthophotos (Raster)	Maßstab 1:10000	Erstellung der Verifizierungsdaten zum Vergleich der fernerkundlichen Ergebnisse
Gebäudedaten (Vektor)	Maßstab 1:500	Erstellung von Gebäudemasken für die fernerkundliche Auswertung der hyperspektralen Flugzeugscannerdaten
Digitales Geländemodell (Raster)	Höhenauflösung 0.5m, Bodenaufklärung 25m	Geometrische Korrektur (parametrischer Ansatz)
Wetterdaten (Tabellen)	u.a. Sichtweite, Wasserdampfgehalt der Luft usw.	Atmosphärische Korrektur (parametrischer Ansatz)

3.1 Untersuchungsgebiet in Dresden

Dresden ist die Landeshauptstadt Sachsens und liegt im südöstlichen Teil des Freistaates. Die ca. 500.000 Einwohner verteilen sich auf einer Fläche von 330 km². Dresden liegt bei 51° 02' nördlicher Breite und 13° 44' östlicher Länge. Die prägenden naturräumlichen Haupteinheiten sind die Elbtalwanne, die nordöstlich davon gelegene Lausitzer Granitplatte und das Mulde-Lößhügelland im Südwesten. Die Elbe mit ihren ausgeprägten Uferzonen ist das markanteste landschaftliche Element der Stadt.

Das Untersuchungsgebiet (UG) umfasst ein Teilgebiet von Dresden. In Abbildung 3.1 ist das ca.

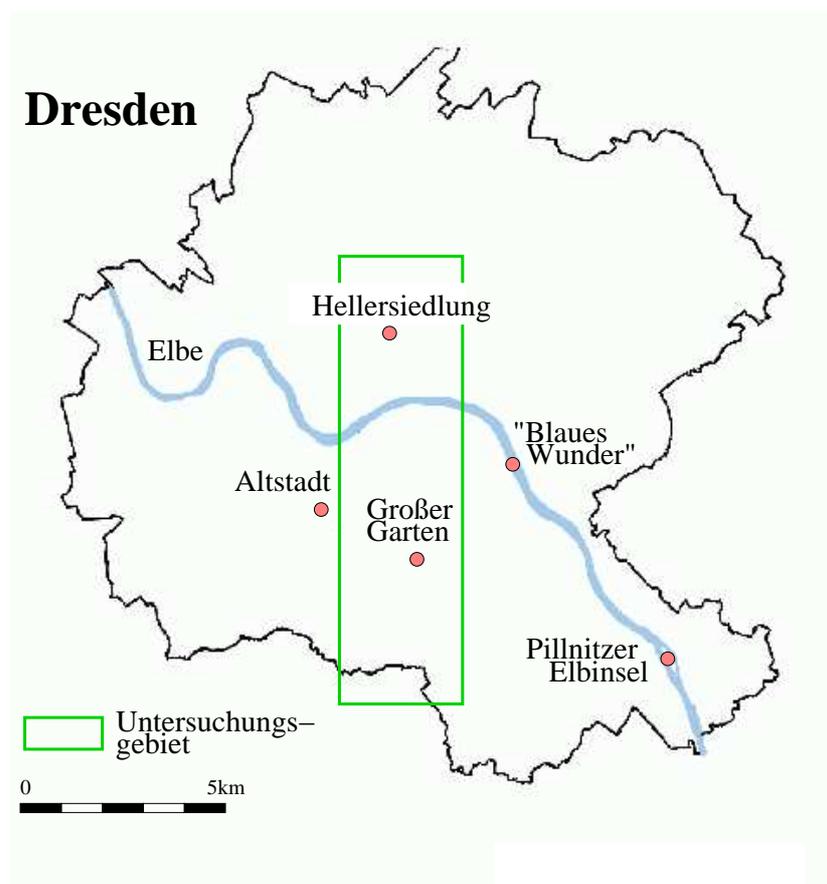


Abbildung 3.1: Das Untersuchungsgebiet in Dresden

10km lange und 3km breite Gebiet dargestellt. Es erstreckt sich von der Hellersiedlung und dem Dresdner Industriegebiet im Norden über die Elbe und den Landschaftspark „Großer Garten“ bis in den Süden nach Zschernitz und Strehlen. Das Untersuchungsgebiet deckt ein breites Spektrum an unterschiedlichen Stadtstrukturen ab und ist daher besonders für die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen geeignet. Die Stadtstrukturtypen umfassen u.a. zahlreiche Wohnbauungstypen unterschiedlicher baulicher Epochen, Kleingartenanlagen, Gewerbegebiete und Industriegebiete. In Karte B.1 ist das Untersuchungsgebiet Dresden mit seinen Stadtteilen in der Topographischen Karte dargestellt.

3.2 Amtliche Daten

Für das Untersuchungsgebiet stehen mehrere amtliche Raster- und Vektordaten in digitaler Form zur Verfügung. Dazu zählen die Stadtbiotopkartierung (Abschnitt 3.2.1) und weitere Daten, wie z.B. Orthophotos und digitale Gebäudedaten (Abschnitt 3.2.2). Für einen einheitlichen Landeskoordinatenbezug aller Daten wurden das Koordinatensystem und die Bezugsfläche der Stadtbiotopkartierung Dresden gewählt. Diese bezieht sich auf das Gauss-Krüger-Koordinatensystem. Die Bezugsfläche ist das Bessel-Ellipsoid.

3.2.1 Stadtbiotopkartierung Dresden

Die digitale Stadtbiotopkartierung von Dresden bildet die thematische und räumliche Grundlage für die Auswertung der fernerkundlichen Ergebnisse. Sie wurde vom Grünflächenamt Dresden aufgenommen und bearbeitet. Die in ihr enthaltenen Biotope werden als räumliche Bezugseinheiten zur Analyse der materiellen Ausstattung und zur Ableitung stadtoökologisch relevanter Parameter verwendet. Die Stadtbiotopkartierung Dresden ist in Karte B.2 für den Ausschnitt des Untersuchungsgebietes dargestellt.

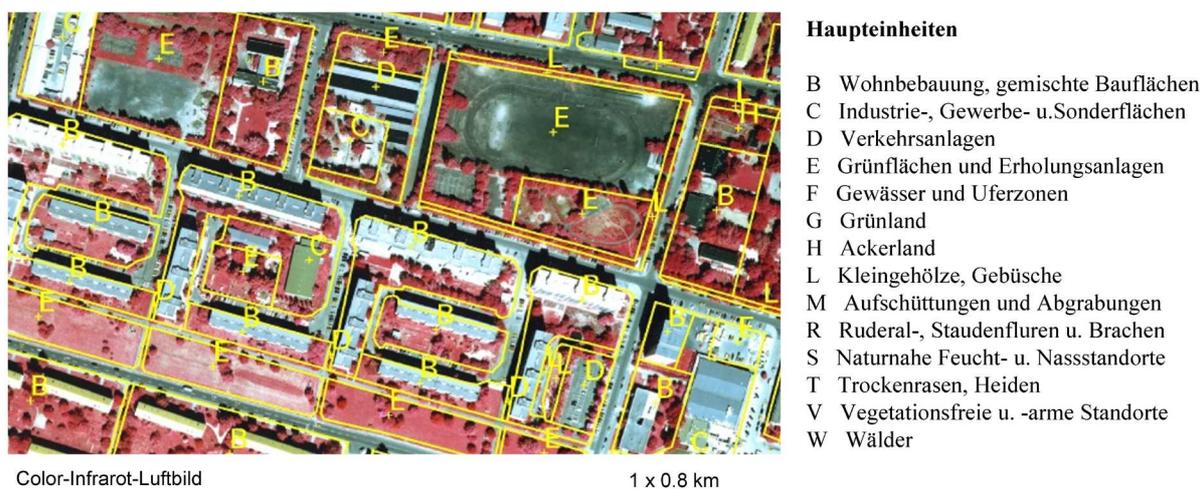


Abbildung 3.2: Haupteinheiten der Biotoptypen Dresdens

Die analoge Aufnahme der Stadtbiotopkartierung erfolgte durch visuelle stereoskopische Interpretation von Color-Infrarot-Luftbildern (CIR-Luftbilder) und umfangreiche Feldarbeiten. Die CIR-Luftbilder wurden am 18.05.1999 mit einer Reihenmesskamera im Maßstab 1:5000 aufgenommen. Der Bearbeitungsmaßstab betrug ebenfalls 1:5000. Die Ansprache der Kartiereinheiten (Biotope) wurde mit Hilfe eines Biotoptypenschlüssels durchgeführt (Tabelle A.1), welcher speziell für die Stadt Dresden entwickelt wurde. Darin werden 14 Haupteinheiten unterschieden, die eine grundsätzliche Einteilung in bebaute und nicht bebaute Biotoptypen widerspiegeln. Die Haupteinheiten sind für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes in Abbildung 3.2 dargestellt.

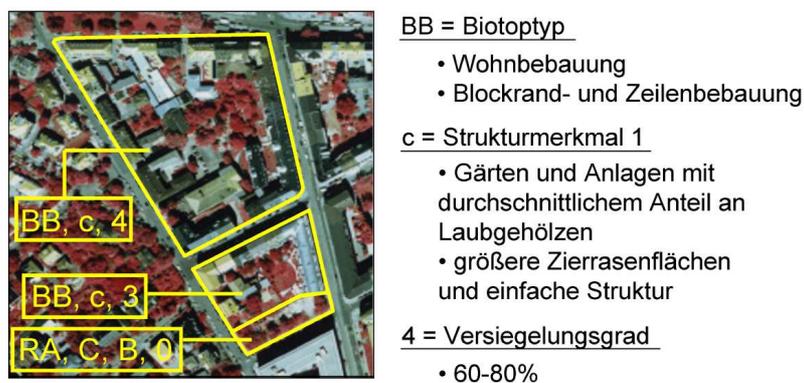


Abbildung 3.3: Charakterisierung der Biotoptypen mit Strukturmerkmalen

Die Haupttypen enthalten insgesamt 99 Biotoptypen. Dabei können Biotope eines Typs hinsichtlich ihrer Oberflächentypen (z.B. Vegetation, bebaute Flächen) sehr unterschiedlich ausgestattet sein. Deshalb ist jeder Biotoptyp zusätzlich durch maximal zwei Strukturmerkmale und einen Versiegelungsgrad charakterisiert. Der Versiegelungsgrad wurde auf einer fünfstufigen Skala visuell auf der Grundlage der CIR-Luftbilder geschätzt. Während die bebauten Biotoptypen vorwiegend nutzungsorientiert definiert sind, werden die unbebauten Biotoptypen nach ihrer biologischen Ausstattung charakterisiert. In Abbildung 3.3 ist ein Beispiel für den Biotoptyp der Blockrand- und Zeilenbebauung (BB) und seine weitere Charakterisierung mit Strukturmerkmalen und dem Versiegelungsgrad gegeben.

Die analog kartierten Biotope wurden durch Digitalisierung und Attributierung in einem GIS erfasst und organisiert. Damit können die zahlreichen räumlichen und thematischen Informationen verwaltet und im Zusammenhang mit anderen Daten analysiert werden. In Tabelle 3.2 sind die in der Datenbank der Stadtbiotopkartierung gespeicherten thematischen Informationen (Attribute) aufgelistet.

Tabelle 3.2: Attribute der Stadtbiotopkartierung Dresdens

Attribut	Erläuterung
Flächengröße	in [m ²]
Flächenumfang	in [m]
interne ID	wird vom System vergeben
nutzerdefinierte ID	kann vom Nutzer vergeben werden
Biotoptyp	Code nach Stadtbioptypenschlüssel Dresden
Strukturmerkmal 1	Code nach Stadtbioptypenschlüssel Dresden
Strukturmerkmal 2	Code nach Stadtbioptypenschlüssel Dresden
Versiegelungsgrad	Wert 1 - 5 (0 - 100%)

Im Gegensatz zu Kartierschlüsseln anderer Städte und dem der AG „Methodik“¹ ist der Kartierschlüssel Dresdens durch eine starke Zusammenfassung der Biotoptypen der Wohnbebauung gekennzeichnet. In Tabelle 3.3 sind die Wohnbebauungstypen von Dresden, der AG „Methodik“ und Potsdam vergleichend dargestellt.

Tabelle 3.3: Unterschiedliche Biotoptypenschlüssel Dresdens, der AG „Methodik“ und Potsdams - demonstriert am Beispiel der Biotoptypen der Wohnbebauung

Auszüge aus den Biotoptypenschlüsseln von		
Dresden	AG „Methodik“	Potsdam
	Blockbebauung	Blockbebauung
Blockrand- und Zeilenbebauung	Blockrandbebauung	Blockrandbebauung
Großform- und Hochhausbebauung	Großformbebauung/ Hochhäuser	Großform- und Punkthausbebauung
	Zeilenbebauung	Zeilenbebauung
Einzel- und Reihenhausbebauung	Einzel- und Reihenhausbebauung (ohne Parkvillen)	Einfamilien- und Reihenhausbebauung
	Alte Villen mit parkartigen Gärten	Villenbebauung mit parkartigen Gärten

¹Arbeitsgruppe „Methodik der Biotopkartierung im besiedelten Bereich“

3.2.2 Weitere Daten

Neben den HyMap-Daten und der Stadtbiotopkartierung wurden weitere Daten in den Auswerteprozess einbezogen. Dazu zählen topographische Kartenwerke, Orthophotos, Gebäudedaten, ein digitales Geländemodell (DGM) und Wetterdaten. Das Untersuchungsgebiet wird von drei topographischen Karten des Maßstabes 1:25000 abgedeckt (TK 4848, 4948, 5048). Sie werden für die geometrische Korrektur der Flugzeugscannerdaten verwendet. Die topographischen Karten liefern detaillierte Informationen über die Flächennutzung im Untersuchungsgebiet. Genauere Objektinformationen oder Informationen zum Material sind in der topographischen Karte nicht aufgelöst.

Für den nördlichen und mittleren Teil des Untersuchungsgebietes wurden vom Grünflächenamt Dresden Orthophotos in digitaler Form im Maßstab 1:10.000 zur Verfügung gestellt. Sie decken vor allem die dicht bebauten Innenstadtbereiche ab, die für die stadtoökologische Bewertung von besonderem Interesse sind. Die Orthophotos entstammen einer Befliegung vom Mai 1999. Ihre räumliche Auflösung beträgt 0.5m. Sie ermöglichen neben der visuellen Orientierung im Untersuchungsgebiet die sichere Erkennung von Objekten, wie z.B. Gebäuden. Aufgrund dessen werden die Orthophotos zur Verifizierung der fernerkundlichen Ergebnisse eingesetzt.

Das Grünflächenamt Dresden stellte weiterhin digitale Gebäudedaten für das gesamte Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Sie werden vom Vermessungsamt verwaltet und laufend aktualisiert. Die Gebäudedaten entstammen der digitalen Liegenschaftskarte der Stadt. Diese wird im Bearbeitungsmaßstab von 1:500 geführt und basiert auf örtlichen Vermessungen. Die Lageungenauigkeiten liegen im cm-Bereich. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen von Januar 2000. Sie dienen der Erstellung einer Gebäudemasken für die fernerkundliche Auswertung der hyperspektralen HyMap Daten.

Vom Institut für Ökologische Raumentwicklung (IÖR) Dresden wurde ein digitales Geländemodell (DGM) des UG von Dresden zur Verfügung gestellt. Die räumliche Auflösung der Daten beträgt 25m, die Höhenauflösung ca. 0.5m. Die im DGM erfassten Geländehöhen wurden für die parametrische Geometrie-Korrektur der hyperspektralen Flugzeugscannerdaten eingesetzt. Aufgrund der heterogenen Höhenstruktur der Stadt, verursacht z.B. durch Gebäude, ist ein Höhenmodell der Stadtoberfläche für geometrische Korrekturen besser geeignet. Es stand jedoch für das UG nicht zur Verfügung.

Die Wetterdaten im Zeitfenster von 5 Tagen vor dem Befliegungstag der HyMap-Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt. Aus den Daten wurden die Atmosphärenneigenschaften am Befliegungstag für die Korrektur der atmosphärischen Einflüsse entnommen. Zudem konnte durch Sichtung vorheriger Tage sichergestellt werden, dass das UG im trockenen Zustand überflogen wurde. Damit konnten Veränderungen des spektralen Signals der städtischen Oberflächen durch Regen ausgeschlossen werden.

3.3 Hyperspektrale HyMap-Daten

Die hyperspektralen HyMap-Daten stellen die fernerkundliche Datengrundlage dar, die zur Erfassung der Oberflächenmaterialien im Untersuchungsgebiet der Stadt Dresden eingesetzt wurden. Der Datensatz wurde am 19.05.1999 ab 10:46 (UTC) bei wolkenlosem und trockenem Wetter vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) aufgenommen (Tab. 3.4). Bei einer durchschnittlichen Flughöhe von 2540m wurde eine Bodenauflösung von ca. 6 x 6m erreicht. Der aufgenommene Flugstreifen ist in Karte B.3 abgebildet.

Tabelle 3.4: Aufnahmedaten für den HyMap-Überflug von Dresden (19.05.1999)

Aufnahmedatum	19.05.1999
Aufnahmezeit	10:46 - 10:50 (UTC)
Latitude	51.05
Longitude	13.77
Flughöhe	2539m
Flugrichtung	179.7 °
Sonnenzenitwinkel	31.3 °
Sonnenazimuth	174.1 ° (5.9 ° Abweichung vom Süden)
Bodenauflösung	ca. 6m
Breite des Flugstreifens	512 Pixel; ca. 3km
Länge des Flugstreifens (Untersuchungsgebiet)	1695 Pixel; ca. 10km

Das Aufnahmeprinzip und die Eigenschaften des HyMap-Sensors sind in Abschnitt 3.3.1 dargestellt. Eine Analyse der Daten auf der Basis der spektralen Reflexionseigenschaften der städtischen Oberflächenmaterialien erfordert die Umrechnung der als Radianzen vorliegenden Daten in Reflexionswerte. Dazu wurde eine atmosphärische Korrektur durchgeführt, die in Abschnitt 3.3.2 beschrieben wird. Desweiteren wurde der Datensatz geometrisch korrigiert (Abschnitt 3.3.3). Dies ermöglicht den Bezug zu allen im Landeskoordinatensystem befindlichen amtlichen Daten. Die Korrektur der landschaftstopographischen Einflüsse auf das Reflexionsverhalten konnte aufgrund der geringen Reliefenergie vernachlässigt werden.

3.3.1 Aufnahmeprinzip und Eigenschaften

Der HyMap (*Hyperspectral Mapper*) ist ein flugzeuggetragenes, abbildendes Spektrometer mit 128 spektralen Kanälen im Wellenlängenbereich von $0.44\mu\text{m}$ - $2.5\mu\text{m}$. Ursprünglich zur Lagerstättenerkundung entwickelt, zeichnet es sich durch ein hohes Signal/Rausch-Verhältnis besonders im Bereich von $2.0\mu\text{m}$ - $2.5\mu\text{m}$ aus. Daher wird der HyMap-Sensor in vielen Forschungsbereichen eingesetzt, z.B. zur Vegetations- und Bodenkartierung sowie zur Beobachtung von Küstenbereichen (Kruse *et al.*, 2000).

Der Sensor arbeitet nach einem opto-mechanischen Scanprinzip, wobei über einen rotierenden Spiegel die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung zeilenweise in 512 Bodenelementen aufgezeichnet wird. Die vom Spiegel aufgefangene Strahlung wird von vier getrennten Detektoren in verschiedenen Wellenlängenbereichen abgetastet. Zur Reduktion der Bildverzerrungen, welche durch Bewegungen des Flugzeuges verursacht werden, wird der Sensor auf einer hydraulisch stabilisierten Plattform montiert. Dadurch werden langsame Schwingungen abgefangen. Zur späteren Korrektur der Bildverzerrungen wird die Position des Sensors mit GPS (*Global Positioning System*) und dessen Ausrichtung (Querneigung, Längsneigung, Kantung) mit einem dreiachsigen Schwingungssensor aufgezeichnet (Cocks *et al.*, 1998). Die Parameter der Position und Ausrichtung des Sensors werden als die 6 Parameter der äußeren Orientierung bezeichnet (Kraus & Schneider, 1988). Nähere Ausführungen zur Korrektur der Bildverzerrung sind in Abschnitt 3.3.3 beschrieben. Die technischen Charakteristiken des HyMap-Sensors sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst. In Tabelle 3.6 ist die spektrale Konfiguration für den vorliegenden Datensatz zusammengestellt.

Der HyMap-Sensor zeichnet die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung auf, die in DN-Werte (*digital number*) umgewandelt werden. Nach der Aufzeichnung wurden die Daten von

Tabelle 3.5: Technische Konfigurationen des HyMap-Sensors (Cocks *et al.*, 1998)

Scannertyp	opto-mechanisch (Whiskbroom-Scanner)
Scan Prinzip	Conical
Schwadwinkel (FOV)	61.3 ° (512 Pixel)
<i>Inst. Field of View</i> (IFOV)	
- along track	2.5 mrad
- across track	2.0 mrad
Kanalanzahl	128
Radiometrische Auflösung	16bit

Tabelle 3.6: Spektrale Konfiguration des HyMap-Datensatzes von Dresden (19.05.1999)

Spektrometer	Wellenlängenbereich [nm]	Anzahl der Kanäle	durchschnittl. Kanalbreite [nm]	Detektormaterial
VIS	400-890	32	15	Si
NIR	890-1350	32	16	InSb
SWIR I	1400-1800	32	16	InSb
SWIR II	1900-2500	32	20	InSb

der Firma Integrated Spectronics Pty bezüglich des Dunkelstroms und elektronischer Offsets korrigiert und zur Umrechnung in Radianzen kalibriert. Die dazu notwendigen Kalibrationskoeffizienten wurden aus Messungen im Labor und während des Überfluges (*in-flight*) gewonnen.

3.3.2 Atmosphärische Korrektur

Das am Sensor aufgezeichnete Signal eines Bodenelementes ist durch die Ausprägung der atmosphärischen Schicht zwischen Boden und Sensor verändert. Dieser Einfluss beruht auf der wellenlängenabhängigen Streuung und Absorption der gemessenen Strahlung am Wasserdampf und Gasmolekülen sowie an Aerosolen. Die Minimierung dieses Einflusses erfolgt im Rahmen der atmosphärischen Korrektur. Damit verbunden ist die Umwandlung der in Radianzen vorliegenden Daten [$\mu\text{W}/\text{cm}^2\text{sr nm}$] in Reflexionswerte. Für die Korrektur wurden ein parametrisches und ein nicht-parametrisches Verfahren eingesetzt. Hinsichtlich der Qualität der Ergebnisse erfolgte eine Bewertung beider Verfahren.

Für die atmosphärische Korrektur mit dem parametrischen Ansatz wurde das Programm ATCOR 4 eingesetzt. Dabei wird der atmosphärische Einfluss durch ein physikalisches Strahlungstransfermodell abgeschätzt und vom Sensorsignal abgezogen. Dieses Verfahren setzt eine genaue Kenntnis des Aufbaus und der Beschaffenheit der Atmosphäre am Befliegungstag voraus. Diese Informationen wurden vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt. Für die atmosphärische Korrektur mit dem nichtparametrischen *Empirical Line*-Verfahren wurde der Anteil des atmosphärischen Einflusses für jeden Kanal linear abgeschätzt. Die dazu notwendigen *gain*- und *offset*-Werte wurden mittels Vergleich von Bildspektren mit Kalibrationsspektren aus Feldspektrometermessungen ermittelt.

Für die Kalibrationsspektren wurden vier Flächen im Untersuchungsgebiet ausgewählt, welche mit einem Feldspektrometer (ASD Field Spec Pro FR) im Wellenlängenbereich von 350-2500nm spektral vermessen wurden (Tab. 3.7). Die Flächen sind spektral homogen und treten in den HyMap-Daten in einer Größe von mindestens 3x3 Pixel auf. Sie decken den gesamten spektralen

Wertebereich der HyMap-Daten ab. Darüber hinaus wurden mehrere Flächen zur Kontrolle der atmosphärischen Korrektur (Kontrollspektren) aufgenommen.

Aufgrund des Einflusses des Wetters, des Sonnenstandes und der Atmosphäre werden Kalibrationsflächen üblicherweise zeitgleich zum Überflug gemessen. Damit wird gewährleistet, dass das Feldspektrometer und der Flugzeugsensor die gleichen Oberflächeneigenschaften aufnehmen. Während des Überfluges konnten jedoch keine Kalibrationsflächen aufgenommen werden. Zur Kalibrierung wurden Spektren verwendet, die zu einem späteren Zeitpunkt unter vergleichbaren Bedingungen gemessen wurden.

Tabelle 3.7: Spektrale Kalibrationsmessungen

Kalibrationsfläche	Material
Sportplatz	dunkler Splitt
Spielplatz (Bolzplatz)	mittelbrauner offener Boden
Sportstadion Uni Dresden	roter Ziegelsplitt
öffentlicher Marktplatz am Elbufer	helles Granitpflaster

Für die parametrische Atmosphärenkorrektur mit ATCOR konnten aufgrund starker Abweichungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse festgestellt werden. Eine Verbesserung konnte auch nicht durch eine im Rahmen des Programms mögliche Optimierung auf maximal zwei Oberflächenspektren erreicht werden.

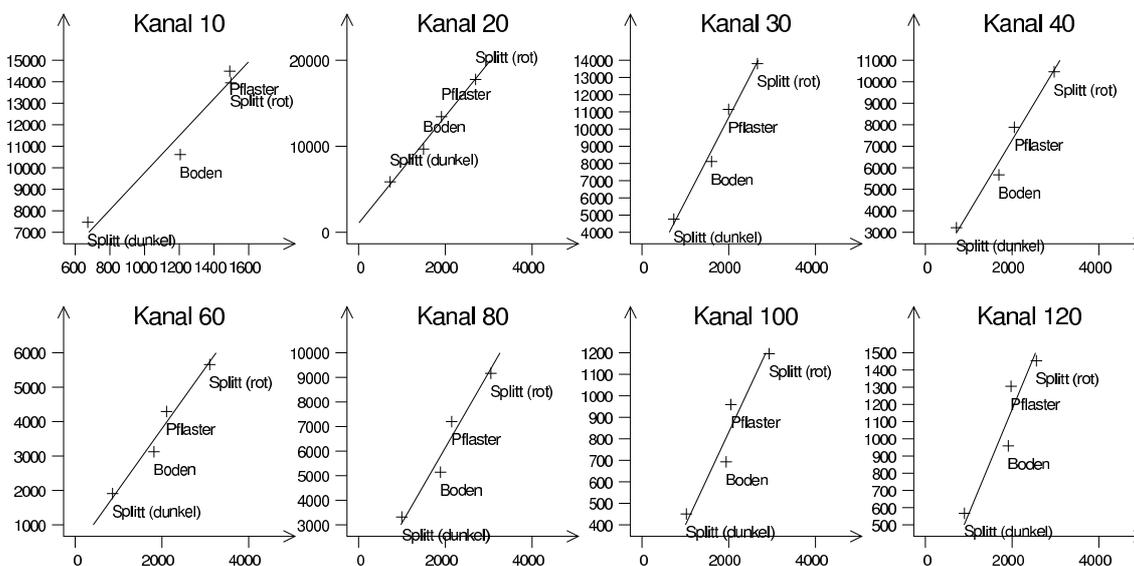


Abbildung 3.4: Regressionsgeraden des *Empirical-Line*-Verfahrens

Mit dem *Empirical Line*-Verfahren konnten deutlich bessere Ergebnisse erreicht werden. Die Qualität wurde im ersten Schritt mittels visueller Kontrolle der Ausprägung der Regressionsgeraden jedes Kanals überprüft. Im zweiten Schritt wurde anhand des Vergleichs der Feldspektrometermessungen von Kontrollflächen mit den korrigierten Bildspektren das Vorhandensein der Absorptionsbanden überprüft. In Abbildung 3.4 sind die Regressionsgeraden für eine Auswahl von 8 Kanälen dargestellt. Die X-Achse stellt dabei die Reflexionswerte und die Y-Achse die Radianzwerte dar. Idealerweise liegen die Werte der Kalibrationsflächen auf einer Geraden. Die Abweichungen in der Realität sind sehr gering. Dies bedeutet, dass die Kalibrationsflächen

für die *Empirical Line*-Korrektur geeignet sind. Der Vergleich mit Kontrollflächen ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Die dünne Linie repräsentiert die mit dem Feldspektrometer gemessenen Kontrollflächen, die dicke Linie stellt die korrigierten Bildspektren dar. Alle nicht durch die Atmosphäre verursachten Absorptionsbanden sind in ihrer Form und der Absorptionstiefe in guter Ausprägung vorhanden. Damit sind die Reflexionsspektren für eine qualitative Differenzierung der Oberflächenmaterialien geeignet.

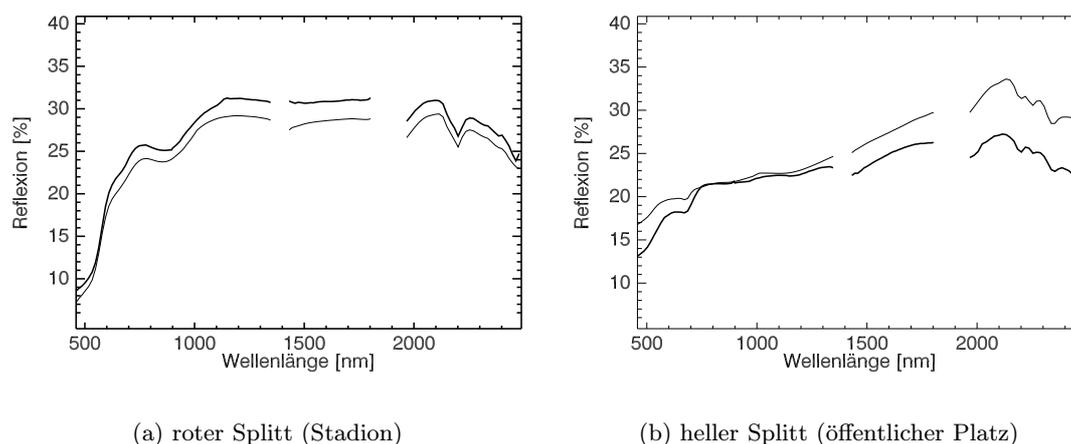


Abbildung 3.5: *Empirical Line* basierte Atmosphärenkorrektur - Kontrollspektren; fette Linie - HyMap-Spektrum, dünne Linie - Feldspektrometermessung

Nach den radiometrischen Korrekturen (systembedingte Kalibrierung und Atmosphärenkorrektur) bleibt idealerweise nur noch das gewünschte Bodensignal übrig. Dennoch verbleibt ein Rauschen, das nicht durch radiometrische Korrekturen eliminiert werden kann. Die Stärke dieses unerwünschten Signals bestimmt die Qualität der Daten. Sie wird mit dem Signal/Rausch-Verhältnis (*Signal/Noise Ratio* - SNR) ausgedrückt. Das SNR beschreibt das Verhältnis aus dem tatsächlichen Bodensignal und dem systembedingten Rauschen.

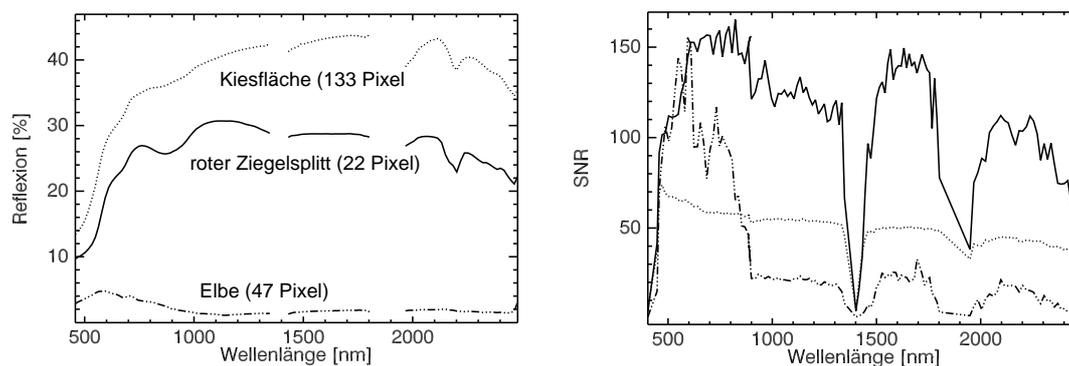
Das SNR kann durch Messungen an den Hardware-Komponenten des Sensors ermittelt werden. Dieser SNR-Wert steht für diese Arbeit nicht zur Verfügung. Eine weitere Möglichkeit, die den Strahlungstransfer in der Atmosphäre mit einbezieht, besteht in der Berechnung aus den Bilddaten. Der Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass homogene Oberflächen keine Variationen im Signal aufweisen. Die dennoch gemessenen Abweichungen sind auf den Rauschanteil des Signals zurückzuführen. Aufgrund des additiven Charakters des Rauschens ist das SNR vom Albedo der Oberfläche abhängig. Bei dunklen Oberflächen wirkt sich das Rauschen im Verhältnis zum niedrigen Signal stärker aus als bei hellen Flächen.

Zur Berechnung des SNR wird der Mittelwert eines homogenen Bildausschnittes mit dessen Standardabweichung ins Verhältnis gesetzt (Gleichung 3.1).

$$SNR = \frac{\text{Mittelwert des Signals}}{\text{absolute Standardabweichung des Signals}} \quad (3.1)$$

Als homogene Bildausschnitte wurden eine helle Kiesfläche, ein Sportplatz, der mit neuem roten Ziegelsplitt gedeckt ist, und die Elbe ausgewählt. In Abbildung 3.6 sind deren SNR-Werte für alle Kanäle abgebildet.

Das SNR der Splittfläche ist mit Werten zwischen 100 und 150 über den gesamten Spektralbereich sehr hoch. Die wesentlich hellere Kiesfläche zeigt jedoch geringere SNR-Werte. Aufgrund



(a) Spektrale Reflexion homogener Oberflächen unterschiedlicher Albedo in den Bild-daten (HyMap)

(b) Signal/Rausch-Verhältnis der Oberflächen aus (a)

Abbildung 3.6: Signal/Rausch-Verhältnis verschiedener Oberflächen in den HyMap-Daten

des additiven Charakters des Rauschens müssten die SNR-Werte der Kiesfläche höher liegen als die der Splittflächen. Daher sind die geringeren SNR-Werte auf die natürliche spektrale Inhomogenität der Testfläche zurückzuführen, nicht auf das Rauschen. Wasser hat im sichtbaren Bereich sehr hohe SNR-Werte, die erwartungsgemäß im kurzwelligen Infrarot absinken. Starke Abfälle im SNR gibt es an den Grenzbereichen der einzelnen Spektrometer des HyMap bei 400-450nm (Kanal 1 und 2), 1400nm (Kanal 65-66) und bei 1950nm (Kanal 97). Diese stellen Absorptionsbereiche atmosphärischen Wasserdampfs dar und werden von den weiteren Analysen ausgeschlossen. Es verbleiben 123 von 128 Kanälen, deren SNR-Werte für gut befunden wurden. Daher konnte von weiteren Schritten zur Bildoptimierung abgesehen werden.

3.3.3 Geometrische Korrektur

Die hyperspektralen HyMap-Daten sind von starken Verzerrungen gekennzeichnet, die auf die instabile Flugbahn des sensortragenden Systems zurückzuführen sind. Die Korrektur der Verzerrungen wurde mit einem parametrischen Ansatz durchgeführt. Dabei wird die Abbildungsgeometrie jeder Bildzeile auf der Basis der Kollinearitätsgleichung rekonstruiert (Kraus & Schneider, 1988). Die Parameter der Gleichung sind die 6 Parameter der äußeren Orientierung, die während des Fluges aufgenommen wurden. Ebenso geht das DGM in die Rekonstruktion ein. Im Ergebnis wurden die HyMap-Daten vom Bildkoordinatensystem ins Landeskoordinatensystem überführt.

Die geometrische Korrektur wurde mit dem Programm PARGE (*PARametric GEocoding*) durchgeführt, welches von den *Remote Sensing Laboratories* (RSL) an der Universität Zürich entwickelt wurde. Das im Programm implementierte Resampling-Verfahren wurde mit der *Nearest-Neighbour*-Methode realisiert. Nach einer ersten Korrektur verblieben geringe Verzerrungen, die durch die Einführung von zusätzlichen Passpunkten ins Transformationsmodell minimiert werden konnten.

Die Qualität der mit PARGE korrigierten Daten wurden mit der gescannten Topographischen Karte (1:25000) als Referenzsystem und einer Menge an Passpunkten überprüft. Dazu wurde der Lagefehler L_i jedes Passpunktes nach Gleichung 3.2 bestimmt. Es handelt sich dabei um die

Abweichung des geschätzten Wertes aus den Bilddaten vom Referenzwert aus der Karte.

$$L_i = \sqrt{\delta x_i^2 + \delta y_i^2} \quad (3.2)$$

Dabei sind δx_i und δy_i jeweils die Abweichungen in X- und Y-Richtung des Passpunktes i . Anhand von 31 Passpunkten wurde der mittlere Lagefehler L_{mean} für die geometrisch korrigierten HyMap-Daten errechnet. Er ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel aller Lagefehler L_i . Zur Berechnung des mittleren Lagefehlers L_{mean} wurde die Gleichung 3.3 verwendet.

$$L_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\delta x_i^2 + \delta y_i^2}}{n} \quad (3.3)$$

Der mittlere Lagefehler L_{mean} entspricht dem RMS-Fehler (*Root Mean Square Error*), welcher ein gebräuchliches Maß zur empirischen Schätzung der geometrischen Genauigkeit mittels einer beliebigen Passpunktmenge ist. In der Annahme, dass die Werte normalverteilt sind, wird die Standardabweichung L_{stdev} nach der Gleichung 3.4 wie folgt berechnet:

$$L_{stdev} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{mean} - L_i)^2}{n}} \quad (3.4)$$

Der mittlere Lagefehler L_{mean} über das gesamte Untersuchungsgebiet beträgt 7.7m bei einer Standardabweichung von 6.4m. Dies ergibt eine durchschnittliche Abweichung von mehr als einem Pixel. Es gibt jedoch deutliche Unterschiede zwischen dem Norden und dem Süden des Untersuchungsgebietes. L_{mean} beträgt nördlich der Elbe 12.6m, während er südlich der Elbe nur bei 4.2m liegt. Diese Ergebnisse, welche sich im Bereich von 1-2 Pixel bewegen, können als gut eingeschätzt werden. Jedoch treten aufgrund der instabilen Bahn des Flugzeuges lokal starke Abweichungen auf. Innerhalb der Passpunktmenge betrug die maximale Abweichung in X-Richtung δx_{imax} 22m und in Y-Richtung δy_{imax} 16m. Diese lokalen Abweichungen von bis zu 4 Pixeln führen in Einzelfällen zu signifikanten Fehlern bei der Verschneidung der fernerkundlichen Ergebnisse mit den Vektordaten der Stadtbiotopkartierung, die in sehr guter Qualität auf die Topographische Karte (1:25000) entzerrt wurden. Betroffen sind vor allem kleine und sehr schmale Biotope, für die im Rahmen der stadtökologischen Auswertung keine gesicherten Aussagen gemacht werden können. Sie werden deshalb von der Auswertung ausgeschlossen. Näheres zum Auswahlverfahren wird in Abschnitt 7.1.3 beschrieben.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses hat das *Resampling*-Verfahren. Mit dem Verfahren wird der unbekannte Grauwert eines Pixels im Referenzsystem mit Hilfe des Originalbildes bestimmt. Da sich die Systeme des Originalbildes und der Referenz nicht decken, wird zur Bestimmung ein *Resampling*-Verfahren eingesetzt. Hierzu gibt es drei Ansätze - *Nearest Neighbour*, *Bilinear Interpolation* und *Cubic Convolution*. Sie basieren jeweils auf Berechnungen in einer Filtermatrix von 1, 2x2 und 4x4 Pixelumgebung. In PARGE wurde das *Nearest Neighbour Resampling*-Verfahren implementiert. Für Bilddaten urbaner Gebiete ist dieser Ansatz jedoch nicht geeignet. Abbildung 3.7a zeigt einen Ausschnitt aus einem originalen HyMap-Datensatz. Abbildung 3.7b zeigt den mit dem *Nearest Neighbour*-Ansatz transformierten Ausschnitt, bei dem deutlich die „Zerstückelung“ der Form der Objekte zu sehen ist. Es treten die für diese Methode typische Treppeneffekte auf, die eine Auswertung der Daten nach Formmerkmalen erschweren. Bei der Auswertung urbaner Daten bieten sich jedoch Methoden an, welche neben spektralen Informationen auch Formmerkmale einbeziehen (siehe Kapitel 5).

Im GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) - Sektion Fernerkundung - wurde ein *Resampling*-Verfahren für Flugzeugscannerdaten entwickelt, welches die Grauwerte in einer maximalen 4x4

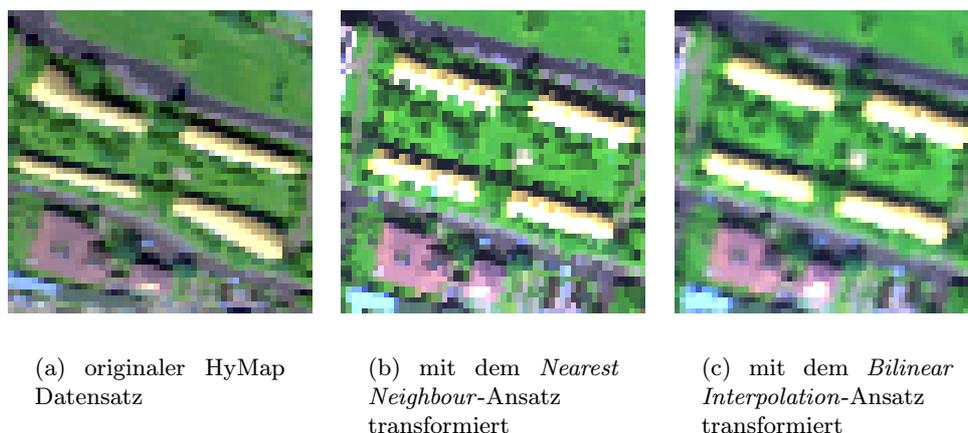


Abbildung 3.7: Einfluss des *Resampling*-Verfahrens auf die Geometrie von Objekten

Pixelumgebung ähnlich der bilinearen Methode interpoliert. Abbildung 3.7c zeigt die mit dieser Methode verbesserten Ergebnisse. Die damit einhergehende mögliche Veränderung der spektralen Information gleicht Mischpixeln, welche spektrale Informationen mehrerer Oberflächen enthalten. Durch den Einsatz eines *Linear-Spectral-Unmixing*-Verfahrens zur Auswertung der Daten können die jeweiligen Anteile bestimmt werden. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Dissertationsthemas stand dieses Verfahren jedoch noch nicht zur Verfügung. Die weiteren Analysen finden daher auf dem mit PARGE korrigierten Datensatz statt.

Von einer weiteren Korrektur der restlichen, meist lokalen Bildverzerrungen (siehe oben) durch ein nicht-parametrisches Korrekturverfahren wurde abgesehen. Das damit verbundene erneute *Resampling* der Daten würde die Geometrie der Objekte zusätzlich verschlechtern.

Spektrale Charakteristika städtischer Oberflächen

Voraussetzung für die Erfassung städtischer Oberflächen mit Hyperspektraldaten ist die Kenntnis der Reflexionseigenschaften ihrer Materialien. Für diese Untersuchungen werden Spektralbibliotheken eingesetzt. In diesen ist eine Vielzahl von Reflexionssignaturen von Oberflächenmaterialien in Verbindung mit ihrer stofflichen Zusammensetzung archiviert. Die Spektralbibliotheken dienen der Erfassung der Materialvielfalt eines hyperspektralen Datensatzes.

In der Vergangenheit wurden vor allem geologische Spektralbibliotheken aufgebaut. Sie erfassen die Erkenntnisse aus den zahlreichen geochemischen Untersuchungen, die sich mit den Ursachen und der Ausprägung spektraler Reflexionseigenschaften von geologischen Materialien (Hunt & Salisbury, 1970; Hunt, 1977; Cloutis, 1996) beschäftigten. Demgegenüber gibt es nur wenige ähnliche Untersuchungen zu städtischen Materialien (Hook, 1998). Eine umfassende Spektralbibliothek städtischer Oberflächenmaterialien für den mitteleuropäischen Raum gibt es bisher nicht. Zur Erfassung der spektralen Vielfalt der Materialien in den HyMap-Daten von Dresden wurde daher eine eigene spektrale Bibliothek aufgebaut. Sie besteht aus Feld- und Labormessungen von Oberflächenmaterialien Potsdams und Dresdens.

In Abschnitt 4.1 wird das Konzept zur Erfassung der spektralen Reflexionssignaturen in Dresden erläutert. Die Reflexionseigenschaften in den Feld- und Laborspektren wurden anhand von Absorptionsbanden herausgearbeitet (Abschnitt 4.3). Obwohl hyperspektrale Sensoren wie der HyMap diese Eigenschaften abbilden können, gibt es eine Reihe von Einflussfaktoren auf das spektrale Signal, die charakteristisch für hyperspektrale Bilddaten sind. Sie werden in Abschnitt 4.4 diskutiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden auf der Grundlage der HyMap-Spektren robuste spektrale Merkmale ausgewählt und mit Hilfe von numerischen Maßen beschrieben (Abschnitt 4.5). Dies ist eine erste Voraussetzung für die automatische Identifizierung städtischer Oberflächenmaterialien mit Hilfe ihrer spektralen Reflexionseigenschaften.

4.1 Konzept der Erfassung spektraler Eigenschaften

Zur Untersuchung der materialspezifischen Reflexionseigenschaften wurden Merkmale wie die Position, Tiefe und Breite von Absorptionsbanden (Reflexionsminima) und Reflexionsmaxima und die Albedo beschrieben. Die Beschreibung erfolgte dabei zuerst visuell. Ziel war es, besonders robuste Merkmale mit numerischen Maßen, wie z.B. Ratios, auszudrücken. Diese Maße wurden zur automatischen Erkennung der Oberflächenmaterialien eingesetzt.

Die Erfassung der spektralen Merkmale wurde in zwei Stufen durchgeführt. Im ersten Schritt wurden die Oberflächenmaterialien im Feld und im Labor mit einem Feldspektrometer gemessen

und aufbereitet (siehe Abschnitt 4.2). Im Ergebnis waren im Reflexionsdiagramm die spektralen Eigenschaften für ein Material anhand von Absorptionsbanden ablesbar. Im zweiten Schritt wurden diese Spektren mit den Bildspektren der HyMap-Daten verglichen. Dabei wurden Besonderheiten herausgearbeitet, die sich aufgrund der Entfernung des gemessenen Objektes zum Sensor ergaben (z.B. Mischpixel, Schatten).

Die spektralen Messungen mit dem Feldspektrometer schlossen sowohl Messungen im Feld als auch im Labor ein. Die versiegelten Freiflächen, Vegetationsflächen und offenen Freiflächen wurden auf der Basis von Beispielflächen in Dresden und Potsdam erfasst. Die Vegetationsflächen wurden zum phänologischen Zeitpunkt des Überfluges vermessen. Die bebauten Flächen sind durch ihre Gebäudedächer repräsentiert. Die Vermessung der Dachflächen vor Ort war aufgrund von Zugangsbeschränkungen nur bedingt möglich. Aus diesem Grund wurde eine große Auswahl verschiedener Dachmaterialien gesammelt und einzeln vermessen (Tab. 4.1). Die Messung erfolgte mit Sonnenlicht und in Nadir-Position. Dies entspricht nicht immer der ursprünglichen Erscheinungsform von Dächern in der Stadt. Ziegeldächer können beispielsweise eine Neigung von $35\text{-}50^\circ$ aufweisen, was zu unterschiedlicher Beleuchtung der Ziegel führt. Um diesen Einfluss auf die spektralen Reflexionseigenschaften der Dachmaterialien zu untersuchen, wurden zusätzlich Messungen mit einem Goniometer im Labor durchgeführt.

Zur Messung der materialspezifischen Reflexionssignaturen in den Bilddaten wurden für die Oberflächenmaterialien in Feldbegehungen Beispielflächen bestimmt. Die Bilddaten lagen infolge der atmosphärischen Korrektur in Reflexionswerten vor. Die Messung erfolgte durch visuelle Bestimmung von Einzelpixeln der Beispielflächen in den Bilddaten, deren spektralen Werte gemittelt wurden. Dabei war sichergestellt, dass nur Pixel des zu messenden Materials erfasst wurden, um Mischsignaturen auszuschließen. Der Vergleich der Bilddaten mit den Ortholuftbildern erleichterte die Auswahl der Pixel.

Tabelle 4.1 enthält alle spektral vermessenen versiegelten Oberflächen. Ihre spektralen Reflexionseigenschaften sind von der stofflichen Zusammensetzung ihres Materials abhängig, die bezüglich ihrer Farbe und stofflichen Zusammensetzung charakterisiert wurde. Die Angaben wurden aus der Literatur entnommen, da es sich um handelsübliche Baustoffe handelt. Desweiteren wurden die Oberflächenmaterialien mineralischen, metallischen und synthetischen Materialgruppen zugeordnet, die Ähnlichkeiten in der spektralen Signatur aufweisen. Tabelle 4.1 bildet die Grundlage für die in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen spektralen Charakteristika der versiegelten Oberflächen.

Tabelle 4.1: Versiegelte Oberflächen und ihre chemische Zusammensetzung nach Hiese (1999) und Schröter *et al.* (1985)

Materialgruppe	Material	Farbe	stoffliche Zusammensetzung
Dachmaterialien			
mineralisch	Dachziegel	rot	Grundstoff: Tonminerale (Kaolinit, Montmorillonit), Quarz, Eisenverbindungen und Kalk; Farbe (eingebraunt): Tonschlämme aus färbenden Metalloxiden (z.B. Manganoxide, Eisenoxide)
	Betondachstein	grau rot	Grundstoff: Zement (Zementklinker, Wasser und Zusatzstoffe); Zementklinker: Tri- und Dicalciumsilicat ($3(2) \text{CaO} \times \text{SiO}_2$), Dicalciumaluminat ($3 \text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$), Calciumaluminatferrit $4 \text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ Farbe (aufgestrichen): Eisenoxide - Fe_2O_3 , und Farben auf Kunststoffbasis
<i>Fortsetzung auf der nächsten Seite</i>			

Fortsetzung der vorherigen Seite			
Materialgruppe	Material	Farbe	Beschreibung / Beschichtung
	Faserzement	hellgrau	Mischung aus Kunststoff- und Zellstoffasern, Bindemitteln (z.B. Zement) und Wasser; für Dach- und Wellplatten
	Kies	hell (verschieden)	kleine runde Steine (Durchmesser ca. 3cm), meist magmatischen Ursprungs
	Schiefer	dunkelgrau	aus tonigem Sedimentgestein; besteht aus Glimmer und Chloritmineralen (Schichtsilikate)
metallisch	Aluminium	metallisch glänzend rot/weiß	Al beschichtet mit Farbe auf synthetischer Basis
	Zink	matt metallisch glänzend	Zn; bildet mit der Zeit eine graublau Patina
	Kupfer	rötlich glänzend	Cu; bildet mit der Zeit eine grüne Patina (Kupferoxid)
	Blei	metallisch leicht glänzend	Pb
synthetisch (Kunststoff)	Bitumen	verschieden grüngrau	Rückstand bei der Destillation von Erdöl, wird beidseitig auf eine Trägereinlage (z.B. Polyesterflies, Glasflies) aufgebracht und danach mit Deckmaterialien (z.B. Sand, Schiefer, Talkum) beschichtet Beschichtung mit Schiefer
	Teer	schwarz	thermische Zersetzung von Steinkohle
	PVC (Polyvinylchlorit)	verschieden	$n\text{CH}_2=\text{CHCl} \rightarrow [-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]_n$
	PE (Polyethylen)	verschieden	$n\text{CH}_2=\text{CH}_2 \rightarrow [-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$
	PIB (Polyisobutylen)	verschieden	$(\text{C}_4\text{H}_8)_n$
vollversiegelte Freiflächen			
mineralisch	Beton	hellgrau	(siehe Dachbetonstein, ohne Farbe)
synthetisch	Asphalt	dunkelgrau/schwarz	Gemisch aus Bitumen und Mineralstoffkörnungen (z.B. Sand, Kies, Schotter, Splitt)
teilversiegelte Freiflächen			
mineralisch	Kopfsteinpflaster	verschieden	magmatische Gesteine (z.B. Granite, Basalte); Fugenfüllungen: Sand
	Betonsteinpflaster	hellgrau	Einzelsteine aus Beton (siehe Betondachstein)
		rot	Einzelsteine aus Beton angereichert mit Eisenoxiden für die rote Farbe (siehe Betondachstein)
	Splitt	rot	zerschlagene Ziegel (siehe Dachziegel); durch die Zerschlagung vergrößert sich die Oberfläche des Materials, enthält deshalb im Gegensatz zum Dachziegel Wasser
synthetisch	Splitt	hell	sehr feiner Gesteinssplitt, reich an Quarz und Calcium
		dunkel/schwarz	vorwiegend aus Hochofenschlacken (siehe Bitumen)

4.2 Messmethodik

Die spektralen Messungen wurden mit einem Feldspektrometer (ASD Field Spec Pro FR) durchgeführt. Das Messgerät besteht aus drei integrierten Spektrometern im VIS/NIR, SWIR I und im SWIR II Bereich. Es zeichnet die von der Erdoberfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 350nm bis 2500nm in 2151 Kanälen über ein Glasfaserkabel auf. Das Aufnahmeintervall (*sampling interval*) beträgt im VIS/NIR Bereich 1.4nm, im SWIR

Bereich beträgt es 2nm. Die spektrale Auflösung beträgt 3nm im VIS/NIR Bereich und 10nm im SWIR Bereich. Der Sensorkopf am Ende des Glasfaserkabels hat einen Öffnungswinkel von 25° . Er kann mit Hilfe von Voroptiken verkleinert werden.

Die spektralen Messungen der Oberflächenmaterialien stellen Reflexionswerte relativ zu einem Weißstandard (Spectralon-Weißstandard) dar. Es handelt sich dabei um eine standardisierte weiße Platte aus Halon. Die Beschaffenheit und Verarbeitung von Halon entspricht annähernd den Eigenschaften einer Lambertschen Oberfläche (*lambertian surface*). Diese reflektiert die einfallende Strahlung in allen Richtungen des Raumes mit der gleichen Intensität (Hapke, 1993). Halon wird oft als Referenz zur spektralen Messung von Materialien eingesetzt, da es fast 100% der einfallenden Strahlung im gesamten Wellenlängenbereich von $0.4\mu\text{m}$ - $2.5\mu\text{m}$ reflektiert, ohne nennenswerte Absorptionserscheinungen zu zeigen.

Der Messvorgang besteht aus drei Schritten. Im ersten Schritt wird das Gerät auf die momentane Beleuchtungsintensität optimiert. Danach erfolgt die Kalibration. Dazu werden der Dunkelstrom und das spektrale Signal des Spectralon-Weißstandards gemessen. Im dritten Schritt erfolgt die spektrale Messung des zu untersuchenden Materials. Die Messung eines Punktes stellt dabei eine Mittelung aus einer mit der Software definierbaren Anzahl von Einzelmessungen dar.

Der Einfluß unterschiedlicher Beleuchtungsverhältnisse wurde durch die Messung mit einem Goniometer im Labor durchgeführt. Ein Goniometer ist eine Vorrichtung, mit der Zenith- und Azimuthwinkel von Sensor, Strahlungsquelle und dem zu messenden Objekt variabel einstellbar sind. Es kann für BRDF Messungen¹ (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) und für Messungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Objektgeometrien² verwendet werden. Letztere kommen für die Untersuchungen in dieser Arbeit in Frage. In Abbildung 4.1 sind die Zenith- und Azimuthwinkel der Strahlungsquelle, des Sensors und des Objektes für den verwendeten Messaufbau dargestellt.

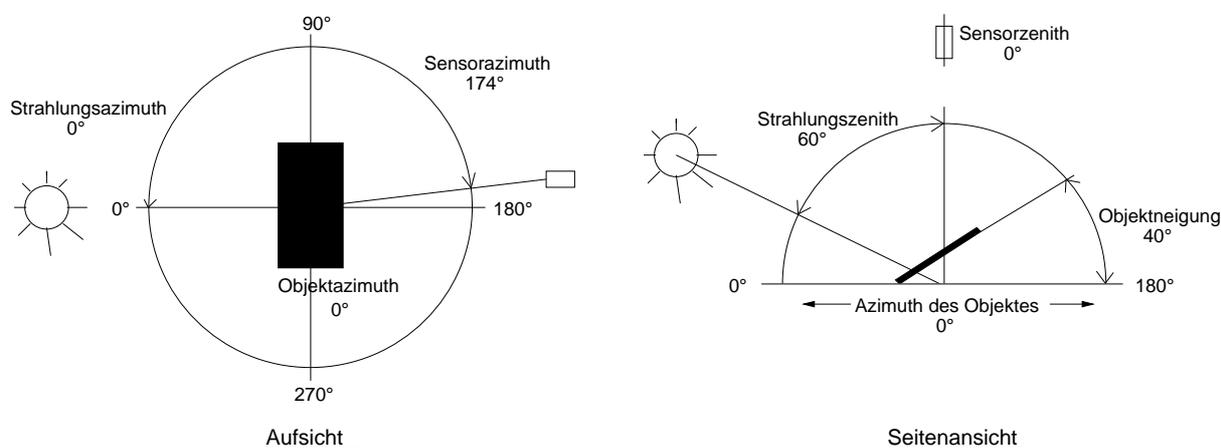


Abbildung 4.1: Geometrische Konfiguration der Goniometermessungen

Es wurden leicht unterschiedliche Messkonfigurationen für die Feldmessungen und die Goniometermessungen verwendet. Sie sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt. Bei den Feldspektrometermessungen konnte die Messhöhe aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit der Oberflächenmaterialien nicht vereinheitlicht werden. Die Höhe beträgt bei den versiegelten Freiflächen, Ve-

¹dabei befindet sich das Objekt in der Ebene und es werden Messungen in Abhängigkeit vom Sonnen- und Sensorwinkel gemacht

²es wird meist die konkrete Aufnahmesituation einer Flugzeugscanneraufnahme nachgestellt (Sonnen- und Sensorwinkel); die spektralen Messungen erfolgen in Abhängigkeit vom Objektzenith bzw. -azimuth

getationsflächen und offenen Freiflächen 1.0m. Die Dachmaterialien wurden aufgrund der kleinen Fläche, die zur Messung zur Verfügung stand, in einer Höhe von 0.5m gemessen.

Tabelle 4.2: Messkonfiguration für die Goniometer- und Feldmessungen

	Feldmessungen	Goniometermessungen
Anzahl der Einzelmessungen für Dunkelstrom, Weißstandard und das Oberflächenmaterial	50	50
Öffnungswinkel (Voroportik)	8°	8°
Messhöhe	1.0m	0.5m
Strahlungsquelle	Sonne	Laborlampe (2 x 1000 Watt)

4.3 Spektrale Charakteristika in Feld- und Laborspektren

In diesem Kapitel werden die spektralen Reflexionseigenschaften in den Feld- und Laborspektren analysiert. In Abschnitt 4.3.1 werden die Reflexionseigenschaften der versiegelten Oberflächen dargestellt. Dazu zählen die Dachmaterialien und die Materialien voll- und teilversiegelter Flächen. Abschnitt 4.3.2 beschreibt die Reflexionseigenschaften unversiegelter Oberflächen, wie z.B. Vegetation, Wasser und offener Grund (offene Bodenflächen). Das spektrale Signal der Oberflächenmaterialien kann Modifikationen aufweisen, die sich aus seiner Beschichtung, dem Alter und den Beleuchtungsverhältnissen ergeben. Sie werden in Abschnitt 4.3.3 erläutert.

4.3.1 Versiegelte Oberflächen

Die versiegelten Oberflächen weisen die größte Variationsbreite spektraler Reflexionseigenschaften auf. Die Unterschiede werden hauptsächlich durch die Vielzahl der vorkommenden Materialien hervorgerufen. Grundsätzlich lassen sich die Materialien in

- mineralische (keramische und natürliche Baustoffe)
- metallische und
- synthetische (Kunststoffmaterialien)

Materialgruppen einteilen. Wichtige Einflussfaktoren sind die Farbe und die Beschichtung des Materials. In Tabelle 4.1 sind die in diesem Kapitel vorgestellten versiegelten Oberflächen entsprechend ihrer Materialgruppe eingeteilt. Sie werden im Folgenden spektral charakterisiert und im Zusammenhang mit ihren chemischen Bestandteilen diskutiert.

Die spektralen Reflexionssignaturen für Dachmaterialien sind in Abbildung 4.2a, b und c nach den Materialgruppen geordnet abgebildet. Neben diesen gibt es eine Vielzahl ähnlicher Dachmaterialien, welche sich durch die Farbe und Herstellung unterscheiden. **Roter Dachziegel** gehört zu den am häufigsten verbauten mineralischen Dachmaterialien (Abb. 4.2a). Er wird aus verschiedenen Tonmineralen und einer Tonschlämme aus Eisenoxiden für die rote Farbe gebrannt. Dachziegel zeigen eine Tonmineralbande bei $2.2\mu\text{m}$ (Montmorillonit) und Eisenbanden bei $0.52\mu\text{m}$, $0.67\mu\text{m}$ und $0.87\mu\text{m}$. Charakteristisch ist der stete Anstieg der Reflexion im SWIR. Aufgrund des Brennprozesses wird das Wasser aus dem Material entfernt, was zum Anstieg der

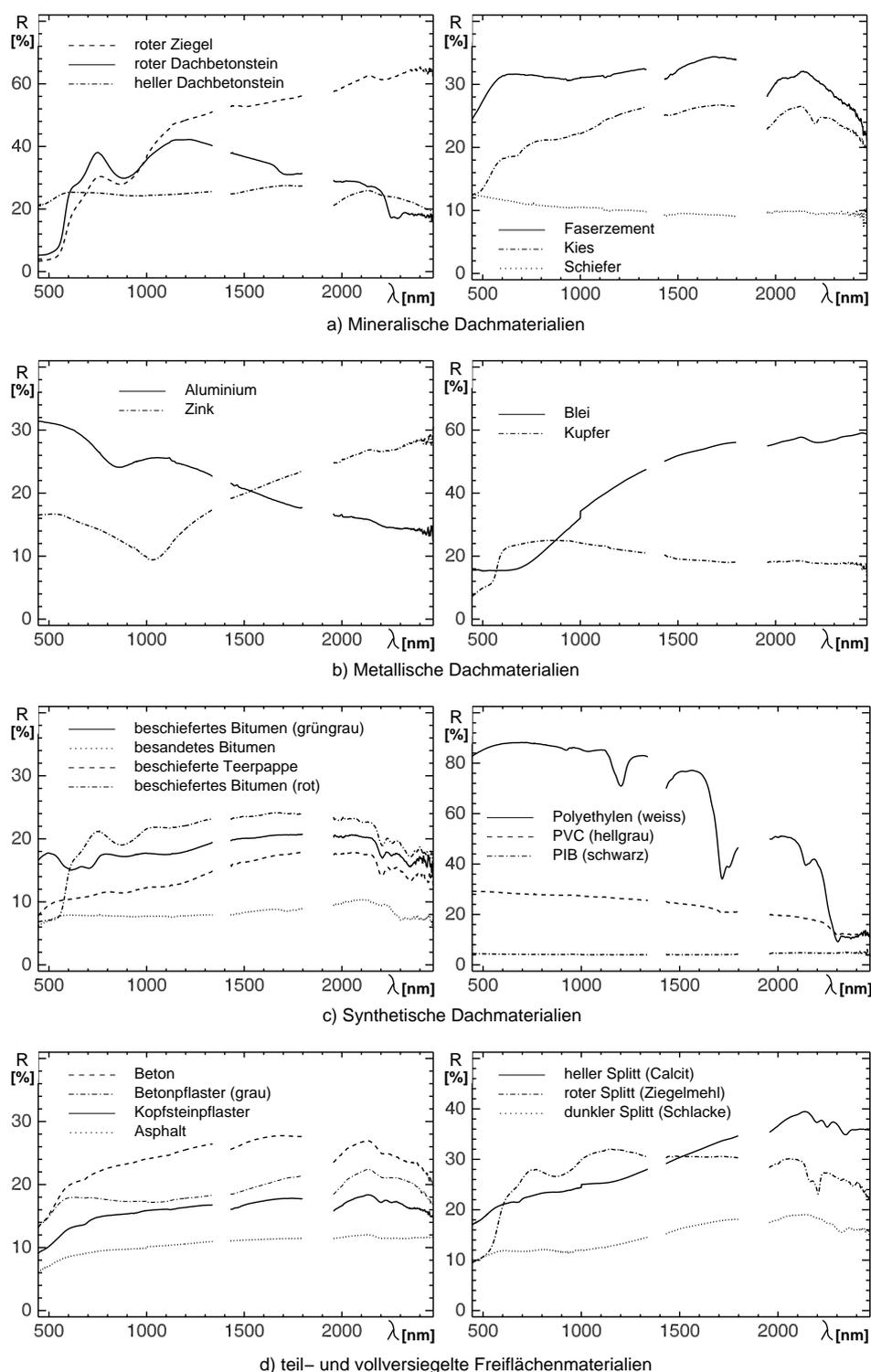


Abbildung 4.2: Spektrale Reflexionssignaturen ausgewählter Dach- und Freiflächenmaterialien (Feldspektrometer)

Reflexion im SWIR führt. Ein Ersatz für den Dachziegel ist der **Betondachstein**, welcher in ähnlichen Formen wie der Dachziegel produziert wird. Sie werden aus Zement und Wasser (Be-

ton) gefertigt und teilweise mit mineralischen oder synthetischen Farben angestrichen. Der helle Betondachstein zeigt keine ausgeprägten Absorptionserscheinungen, was auch für andere aus Beton bestehende Materialien typisch ist. Das Reflexionssignal vom roten Betondachstein wird durch die Farbe bestimmt. Es zeigt Eisenbanden und im Gegensatz zu Dachziegeln einen Abfall der Reflexion im SWIR aufgrund der synthetischen Farbe (siehe auch synthetische Materialien).

Faserzement gilt heute als Ersatzstoff für das früher verwendete Asbest und wird zu Platten und Wellplatten verarbeitet. Er besteht aus einer Mischung von Kunststoff- und Zellstofffasern und dem Bindemittel Zement. Bis auf eine breite jedoch schwache Absorptionsbande bei $2.1\mu\text{m}$ (Zellstofffasern) ähnelt das Reflexionssignal dem des ungefärbten Betondachsteins. **Kies** wird besonders im Süden und Westen Deutschlands als Dachmaterial eingesetzt. Das spektrale Signal wird dabei von den verwendeten natürlichen Kieselsteinen bestimmt. Im gemessenen Beispiel (Abbildung 4.2a) sind sowohl Eisenbanden, als auch die Tonmineralbande von Montmorillonit zu sehen. **Schiefer** ist ein teures und im Untersuchungsgebiet selten verbautes Dachmaterial und ist meist auf historischen Gebäuden zu finden. Es besteht aus Glimmer und Chloritmineralen. Das Reflexionsspektrum zeigt keine Absorptionserscheinungen und ist über den gesamten Wellenlängenbereich sehr niedrig.

Metallische Dachmaterialien werden besonders auf Sporthallen und Einkaufszentren verbaut (siehe Abbildung 4.2b). Aluminium und Zink sind dabei häufiger anzutreffen als Blei oder Kupfer. Üblich ist eine Beschichtung mit Farben auf synthetischer Basis. **Aluminium** hat eine breite und tiefe Absorptionsbande bei $0.84\mu\text{m}$. Bei **Zink** verschiebt sich die Absorptionsbande auf $1.02\mu\text{m}$. **Blei** hat sehr niedrige Reflexionswerte im sichtbaren Bereich und einen deutlichen Anstieg der Reflexion auf bis zu 60% im SWIR Bereich. **Kupfer** ist ein rötlich schimmerndes Metall, weshalb die höchsten Werte des sichtbaren Bereiches bei $0.65\mu\text{m}$ im Rot liegen. Die Reflexion geht im SWIR leicht zurück.

Die Gruppe der synthetischen Dachmaterialien beinhaltet sehr viele Arten der chemischen Zusammensetzung. Es handelt sich meist um langkettige Kohlenwasserstoffe, deren funktionale Gruppen wie z.B. -OH, -NH und -CH Absorptionen verursachen (Pieters & Englert, 1993). Am häufigsten wird **Dachbitumen** verbaut. Bitumen ist ein Rückstandsprodukt bei der Destillation von Erdöl. Es wird beidseitig auf eine Trägereinlage aufgestrichen und mit einem Deckmaterial beschichtet (Tabelle 4.1). In Abbildung 4.2c sind die Reflexionssignaturen von Dachbitumen mit unterschiedlichen Deckschichten dargestellt. Allen gemeinsam sind die durch funktionale Gruppen verursachten Absorptionsbanden bei $2.2\mu\text{m}$, $2.23\mu\text{m}$, $2.32\mu\text{m}$ und eine sehr schwache bei $2.1\mu\text{m}$. Die Deckschicht bestimmt das spektrale Signal besonders im sichtbaren und nahen Infrarotbereich.

In seltenen Fällen sind noch **Teeranstriche** auf Gebäuden zu finden. Teer entsteht durch die thermische Zersetzung von Steinkohle. Die gemessene Teerdachbahn ist beschiefert. Sie zeigt im SWIR II ein ähnliches Absorptionsverhalten wie Bitumen. Dachmaterialien aus Plastik werden besonders auf Hochhäusern mit Flachdächern verbaut. Das am stärksten reflektierende Material ist **Polyethylen (PE)**. Es zeigt starke Absorptionsbanden bei $1.2\mu\text{m}$ und $1.7\mu\text{m}$, welche durch Streckschwingungen bei C-H Verbindungen verursacht werden (Pieters & Englert, 1993). Ebenso deutlich sind die Absorptionsbanden bei $2.17\mu\text{m}$ und der steile Abfall der Reflexion ab $2.2\mu\text{m}$ mit der Folge von mehreren Banden ab $2.3\mu\text{m}$. **Polyvinylchlorid (PVC)** zeigt einen steten Abfall der Reflexion von $0.5\mu\text{m}$ bis $2.3\mu\text{m}$. Diese Charakteristik konnte auch bei anderen PVC-Materialien nachgewiesen werden. Es zeigt schwache Absorptionsbanden bei $1.7\mu\text{m}$ und $2.3\mu\text{m}$. **Polyisobutylene (PIB)** wird sehr selten verwendet. An diesem Beispiel ist zu sehen, welchen Einfluss die Farbe auf das spektrale Signal hat. Alle Absorptionsbanden sind aufgrund der niedrigen Reflexion nicht mehr sichtbar. Weitere Ausführungen zum Einfluss der Farbe werden

in Abschnitt 4.3.3 gegeben.

Die Reflexionssignaturen vollversiegelter und teilversiegelter Freiflächen sind in Abbildung 4.2d dargestellt. Am häufigsten werden Beton und Asphalt verbaut. **Beton** (mineralisch) besteht aus Zement und Wasser (Tabelle 4.1). Das Reflexionssignal zeigt sehr schwache Eisenbanden bei $0.52\mu\text{m}$ und $0.67\mu\text{m}$ und eine ebenfalls schwache Calcitbande bei $2.34\mu\text{m}$. **Asphalt** (synthetisch) besteht aus dem gleichen Grundmaterial wie Dachbitumen, mit dem Unterschied, dass es keine Deckschicht hat und dem Grundmaterial Bitumen Mineralstoffkörner zugemengt werden. Diese können die Absorptionsbanden von Bitumen verdecken. Das Reflexionssignal ist im Vergleich zum Dachbitumen etwas niedriger und zeigt nur sehr schwache Absorptionsbanden.

Die Materialien teilversiegelter Oberflächen umfassen verschiedene Pflasterarten und wassergebundene Decken (Splitt). In alten Stadtkernen ist als Straßenbelag oft noch **Kopfsteinpflaster** zu finden. Das spektrale Reflexionsverhalten ist hauptsächlich von den verwendeten Gesteinen abhängig. Das Beispiel in Abbildung 4.2d besteht vorwiegend aus verschiedenfarbigen Graniten. Demnach wird das Reflexionssignal durch die Bestandteile Quarz, Plagioklas, Feldspat und Glimmer (Muskovit, Biotit) sowie dem Fugenfüllmaterial (meist Sand) zwischen den Steinen bestimmt. Das Reflexionsspektrum zeigt Absorptionsbanden bei $2.2\mu\text{m}$ und $2.34\mu\text{m}$. Ursachen dafür können sowohl die Glimmeranteile im Gestein, als auch Verwitterungserscheinungen oder Einflüsse vom Fugenmaterial sein. **Betonpflaster** wird dem vollversiegelten Betonbelag sehr oft vorgezogen, da Regenwasser infiltrieren kann. Die Materialien sind gleich bis auf Beimengungen des Herstellers, die sich jedoch kaum auf das spektrale Signal auswirken. Die Reflexionsspektren von Beton und Betonpflaster ähneln sich demnach sehr (Abbildung 4.2d). Eine Unterscheidung dieser beiden Belagsarten auf der Grundlage ihres spektralen Signals ist deshalb nur sehr eingeschränkt möglich. Die in Abbildung 4.2d dargestellten **Splittmaterialien** werden besonders auf Parkwegen, Plätzen sowie Sport- und Spielplätzen verwendet. Ihr Infiltrationsvermögen ist von dem Grad der Verdichtung abhängig. Der **helle Splitt** besteht aus zertrümmerten sehr hellen und kalk- und tonhaltigen Gesteinssplittern. Sehr deutlich ist die Calcitbande bei $2.34\mu\text{m}$ und die Tonmineralbande bei $2.2\mu\text{m}$ zu sehen. **Roter Splitt** besteht aus Ziegelmehl, was in einer starken spektralen Ähnlichkeit zu Dachziegeln resultiert (Abbildung 4.2a). Der Unterschied besteht in der deutlichen sichtbaren Doppel-Absorptionsbande für Kaolinit ($2.19\mu\text{m}$ und $2.2\mu\text{m}$) und dem fehlenden Anstieg im SWIR. Durch den Vorgang der Zerkleinerung wurde die Oberfläche des Materials erheblich vergrößert, wodurch das Material trotz des Brennprozesses wieder Wasser aufnehmen kann (Reduktion der Reflexion im SWIR). **Dunkler Splitt** besteht aus Hochofenschlacken, der schwache Absorptionsbanden im SWIR II Bereich zeigt.

Die spektralen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Materialien der versiegelten Oberflächen sehr ausgeprägte spektrale Charakteristika haben. Das größte Materialspektrum weisen dabei die Dachmaterialien auf. Die Differenzierung von Dach- und Freiflächenmaterialien ist jedoch nicht immer gewährleistet. Grund dafür ist, dass die Materialien jeweils aus dem gleichen Grundmaterial bestehen. Zu diesen Materialien zählen Dachziegel und Ziegelsplitt sowie Dachbitumen und Asphalt. Problematisch ist auch die spektrale Abgrenzung von dunklen Materialien wie z.B. Schiefer, schwarzen synthetischen Stoffen und Asphalt. Die vorhandenen spektralen Signaturen sind aufgrund der geringen Reflexion nicht mehr differenzierbar.

4.3.2 Unversiegelte Oberflächen

Die unversiegelten Oberflächen umfassen die Vegetation, Böden (i.w.S.) und Wasserflächen. In jeder dieser Kategorien wurden bisher umfangreiche und sehr detaillierte Untersuchungen mit hyperspektralen Flugzeugscannerdaten und spektralen Labordaten durchgeführt (Lawrence *et al.*,

1994; Gao & Goetz, 1995; Chabrillat *et al.*, 2002; Leone & Sommer, 2000; Thiemann & Kaufmann, 2002). In der Stadt unterliegen die Reflexionseigenschaften der unversiegelten Oberflächen urbanen Einflussfaktoren wie z.B. Pflegemaßnahmen und anthropogener Beanspruchung, die das spektrale Signal verändern. Im Folgenden wird auf diese Besonderheiten eingegangen.

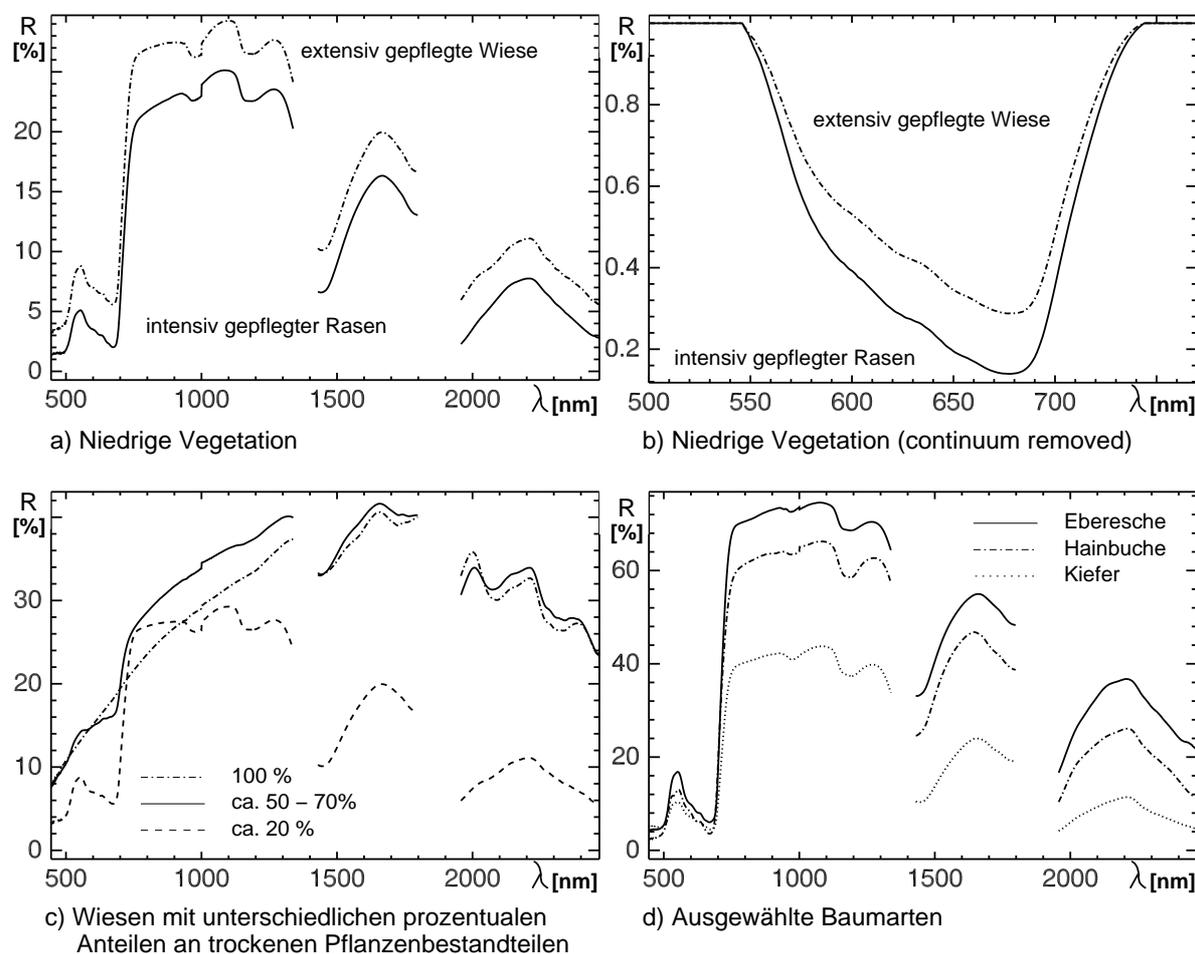


Abbildung 4.3: Spektrale Reflexionssignaturen urbaner Vegetation (Feldspektrometer)

Vegetation zeigt aufgrund der Absorption von Chlorophyll im blauen und roten Bereich des VIS ein relatives Reflexionsmaximum im grünen Bereich des sichtbaren Lichtes ($0,5\mu\text{m}$). Typisch ist der Anstieg vom roten Bereich im VIS zum nahen Infrarot, welches auch als „red edge“ bezeichnet wird (Walter-Shea & Norman, 1991). Weiterhin zeichnet sich die Vegetation durch das Reflexionsplateau im NIR und durch tiefe Absorptionsbanden von Wasser bei $1,4\mu\text{m}$ und $1,9\mu\text{m}$ aus. Photosynthetisch inaktive Pflanzenbestandteile wie Zellulose, Lignin und Stickstoff verursachen Absorptionsbanden bei $1,7\mu\text{m}$, $2,1\mu\text{m}$ und um $2,3\mu\text{m}$. Diese werden in der grünen Vegetation von den starken Wasserabsorptionsbanden überlagert und sind somit kaum sichtbar.

Fernerkundlich und ökologisch ist die Einteilung in niedrige Vegetation (z.B. Grünflächen, vegetationsbestandene Äcker und Brachen) und hochstämmige Vegetation (z.B. Bäume und Sträucher) sinnvoll. Die am häufigsten vorkommenden Grünflächen (Abbildung 4.3a) sind intensiv gepflegte **Rasen** (Mahd alle 2-3 Wochen) und extensiv gepflegte **Wiesen** (Mahd 2-3 mal im Jahr). Ihr spektrales Reflexionssignal stellt ein Mischsignal aus chlorophyllhaltigen Blättern, photosynthetisch inaktiven Pflanzenbestandteilen und Boden dar. Je höher der Anteil der chlo-

rophyllhaltigen Pflanzenbestandteile, desto steiler ist das „red edge“ ausgeprägt. Wiesen (außer Nass- und Feuchtwiesen) haben einen höheren Anteil an trockenem Material als Rasen. Rasen bildet demgegenüber ein dichtes Wurzelgeflecht und dichte grüne Blätter aus. Spektral lässt sich dies am geringer ausgeprägten „red edge“ von Wiese nachweisen (Abbildung 4.3b). Dennoch hängt das spektrale Signal sehr stark vom Bearbeitungs- und Pflegezustand während der spektralen Aufnahme ab. Beispielsweise kann bei einem stark abgemähten Rasen das spektrale Signal von Boden dominieren und das „red edge“ nahezu verschwinden. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf das spektrale Signal ist der Anteil trockener Pflanzenbestandteile (Abbildung 4.3c).

Unter der hochstämmigen Vegetation wurden Bäume und Sträucher zusammengefasst. Die spektrale Messung dieser wurde im Labor an den Blättern durchgeführt. Die Unterschiede liegen dabei in der Höhe des Reflexionsmaximums im grünen Bereich des sichtbaren Lichtes und der Reflexionshöhe im SWIR I und II. Am deutlichsten grenzen sich Laub- und Nadelbäume aufgrund der geringeren Reflexion ab (Abbildung 4.3d). Es gilt jedoch zu beachten, dass das spektrale Signal eines Baumes oder Waldes ein Mischsignal aus chlorophyllhaltigen Blättern, chlorophylllosen Baumbestandteilen (Ästen) und Schatten ist. Daher haben die spektralen Messungen von Einzelblättern wenig Aussagekraft. In Abschnitt 4.4 wird darauf gesondert eingegangen.

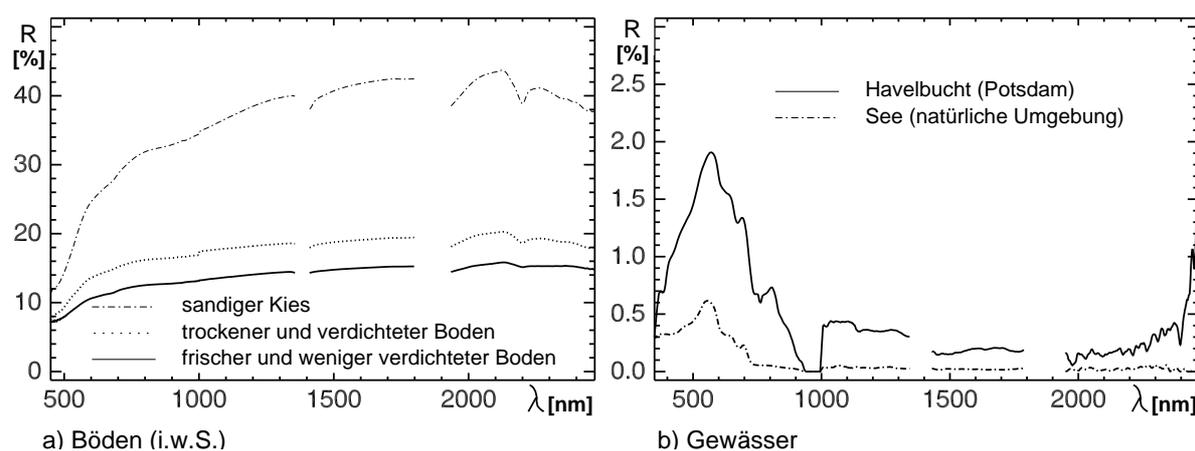


Abbildung 4.4: Spektrale Reflexionssignaturen unversiegelter Freiflächen (Feldspektrometer)

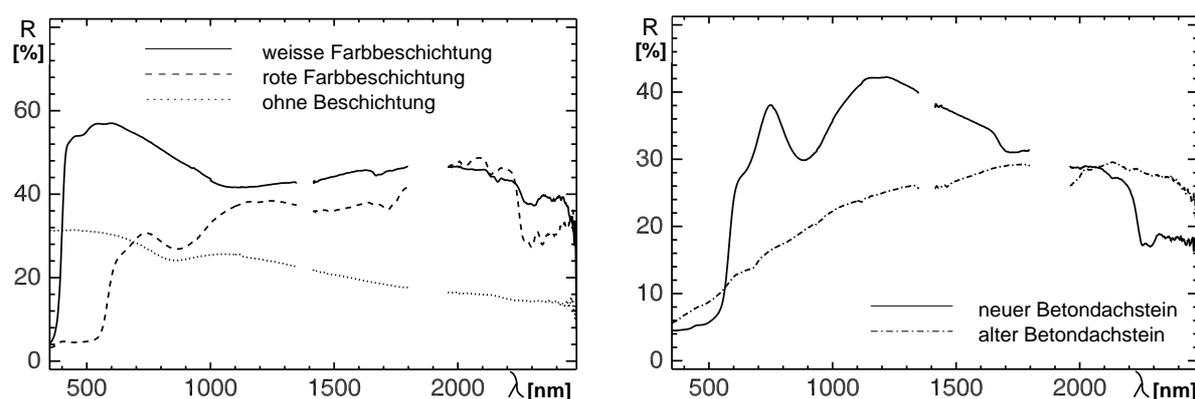
Offene Bodenflächen i.w.S. sind in der Stadt eher selten und temporär. Oft handelt es sich um Baugruben, Rasenflächen unter starker Trittbelastung (z.B. auf Sportplätzen) oder in Stadtrandlage um Kies- und Sandabbauflächen und abgeerntete Äcker. In Abbildung 4.4b sind die spektralen Reflexionssignale des kiesigen Sandes einer Kiesgrube und zweier Bodenflächen dargestellt. Alle zeigen Eisenbanden im VIS/NIR und die Tonmineralbande (Montmorillonit) bei $2.2\mu\text{m}$. Die Sandfläche hebt sich aufgrund der hohen Reflexion über den gesamten Spektralbereich und den stärker ausgebildeten Absorptionsbanden von den Böden ab. Die Böden haben einen höheren Gehalt an Humus, was zu niedrigeren Reflexionen besonders im VIS führt. Der stark verdichtete und trockene Boden hat gegenüber dem frischen und weniger verdichteten Boden eine leicht höhere Albedo. Die Proben wurden von der gleichen Sportplatzfläche genommen, sodass ein unterschiedliches Substrat als Ursache der spektralen Unterschiede ausgeschlossen ist.

Wasser hat als klimaverbesserndes Element eine hohe Bedeutung für die Stadt. Das spektrale Reflexionssignal von Wasser ist über den gesamten Wellenlängenbereich sehr niedrig und sinkt mit steigender Wellenlänge. Das spektrale Reflexionssignal von Wasser wird vor allem durch

die Art und Menge der Schwebstofffracht (Sedimente und Phytoplankton) und der Gewässertiefe bestimmt (Kondratyev & Filatov, 1999). Auf diese Weise können Gewässer unterschiedlichen Eutrophierungsstufen zugeordnet werden. Dennoch ist zu beachten, dass Gewässer einer starken jährlichen sowie saisonalen Dynamik unterliegen, die sie in der Art und Menge der Schwebstofffracht ausdrückt. Eine Differenzierung urbaner Gewässern lässt sich ohne aufwendige Feldarbeit (spektrale Messungen, Laboranalysen der Schwebstofffracht) demnach nicht sicher definieren. Dennoch stellen Sukopp *et al.* (1998) klar, dass der Eintrag von Nährstoffen in urbane Fließgewässer sowie Stillgewässer hoch ist. In Abbildung 4.4b ist das spektrale Reflexionssignal der Potsdamer Havelbucht gegenüber einem Gewässer ähnlicher Tiefe in natürlicher Umgebung abgebildet. Der Sedimentgehalt der Havel ist sehr hoch, dies zeigt sich im allgemein höheren Reflexionsniveau. Auch der Anteil des chlorophyllhaltigen Phytoplanktons ist wesentlich höher, was sich am Reflexionsmaximum im grünen Bereich zeigt ($0.55\mu\text{m}$).

4.3.3 Spektrale Modifikationen

Die in Abschnitt 4.3.1 und 4.3.2 dargestellten spektralen Merkmale sind Beispiele für eine Vielzahl von Materialien, deren spektrales Signal sich dennoch infolge von Beschichtung (z.B. Farbe), Alter und Beleuchtungsverhältnissen verändern kann.



(a) Aluminium für Dachdeckungen unterschiedlicher Beschichtung

(b) Roter Betondachstein (BDS) unterschiedlichen Alters

Abbildung 4.5: Einfluss des Alters und der Beschichtung auf das spektrale Reflexionsverhalten (Feldspektrometer)

Die **Beschichtung** betrifft hauptsächlich Dachmaterialien. Zur Beschichtung zählen Farbanstriche oder Glasuren, wie sie oft für Dachziegel verwendet werden. Sie kann auf synthetischer und mineralischer Basis hergestellt werden. Die Beschichtung kann das eigentliche spektrale Signal des Grundmaterials vollkommen überdecken. In Abbildung 4.5a sind die Reflexionssignaturen eines unbeschichteten, eines weiß und eines rot beschichteten Aluminiumbleches für Dachdeckungen dargestellt. Während das unbeschichtete Aluminium noch die typische breite Absorptionsbande bei $0.84\mu\text{m}$ zeigt, ist diese beim weiß beschichteten Material nicht mehr zu sehen. Stattdessen zeigen sich mehrere Absorptionsbanden im SWIR II, welche auf die synthetische Farbe zurückzuführen sind. Beim rot beschichteten Aluminiumblech tritt anstelle der Aluminiumbande die Eisenbande bei $0.87\mu\text{m}$. Auch hier sind die auf die synthetische Farbe zurückzuführenden

Absorptionsbanden im SWIR II zu sehen.

Einen großen Einfluss auf das spektrale Reflexionssignal einer versiegelten Oberfläche hat das **Alter**. In Abbildung 4.5b ist das Spektrum eines neuen roten Betondachsteins dargestellt, welches deutlich das spektrale Signal der Farbbeschichtung zeigt. Im Spektrum des alten roten Betondachsteins ist kein Anzeichen der roten Farbe (Verlust der Eisenbanden) mehr zu sehen. Stattdessen zeichnet sich das Spektrum des Betons ab. Sehr häufig überdecken auch dunkle Flechten und Moose auf Dächern das spektrale Signal des eigentlichen Materials. Bei älteren Freiflächen aus Beton konnte ein Abfall der Reflexion und schwächere Eisen- und Calcitbanden gegenüber neuem Beton festgestellt werden.

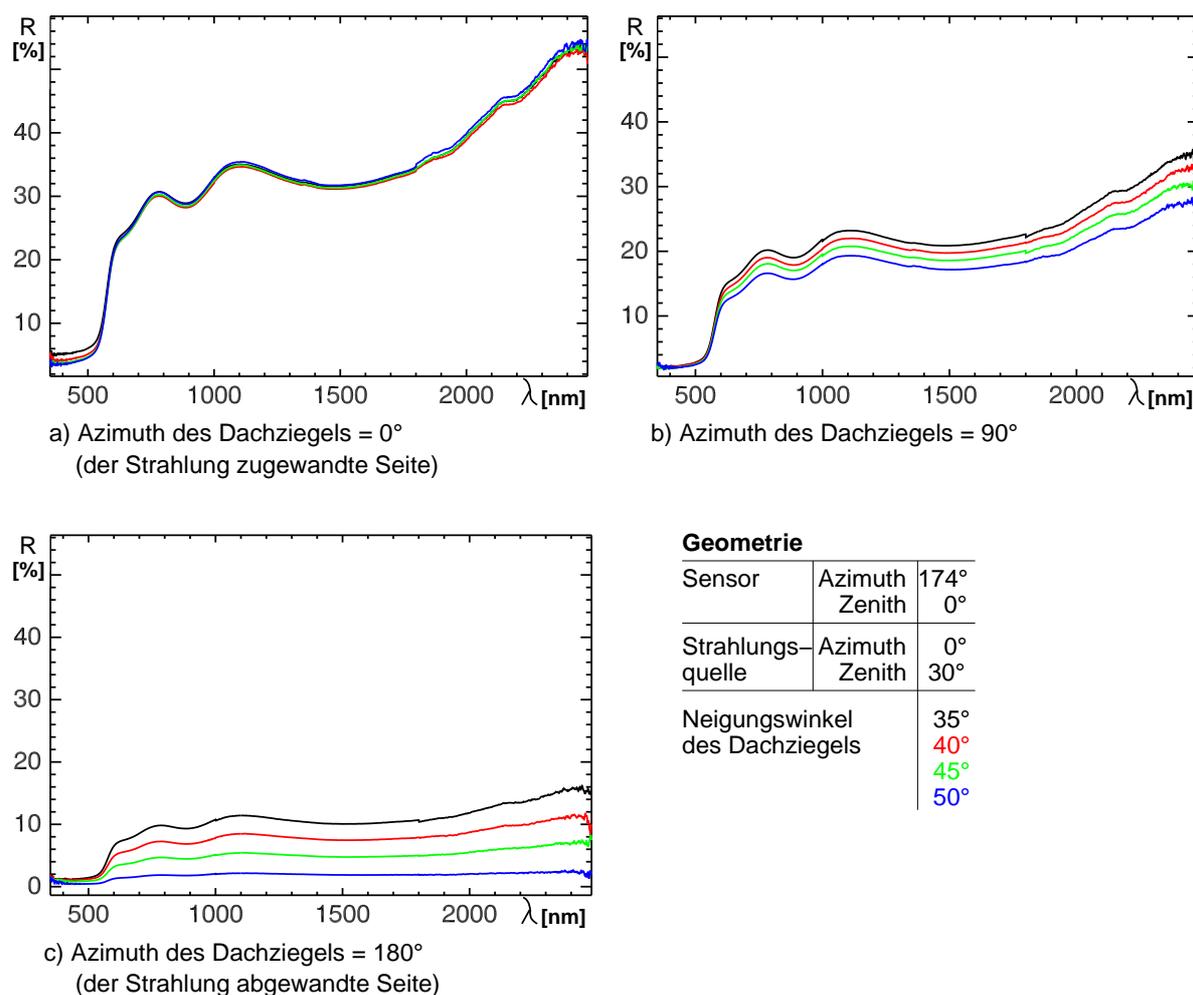


Abbildung 4.6: Einfluss des Neigungswinkels des Objektes auf das spektrale Reflexionsverhalten (Bsp. Dachziegel); untersucht an verschiedenen Azimutwinkeln des Objektes

Die **Beleuchtungsverhältnisse** spielen vor allem bei Dachmaterialien eine große Rolle. Beispielsweise werden Dachziegel und Betondachsteine mit einer Neigung zwischen 35%-50% gedeckt. Metalldeckungen werden teilweise auf Tonnendächern (bogenförmiges Dach) aufgebracht. Dies führt zu unterschiedlichen Neigungsgraden der Materialien auf einem Dach. Am Beispiel eines Dachziegels wurde daher die Abhängigkeit des spektralen Verhaltens von den Neigungswinkeln 35°, 40°, 45° und 50° getestet (Abbildung 4.6). Zusätzlich wurde die Stellung des Dachziegels zur Strahlungsquelle (Objektazimut) verändert, was der Ausrichtung der Gebäude zur

Sonne entspricht. Die Messungen wurden mit Hilfe des Goniometers (siehe Abschnitt 4.1) durchgeführt. Die Sensor- und Strahlungsquellengeometrie wurde entsprechend den Bedingungen beim Überflug des hyperspektralen HyMap-Scanners über Dresden simuliert.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Generell lässt sich sagen, dass sich die Neigung eines Daches nach seiner Ausrichtung zur Strahlungsquelle unterschiedlich auf die Albedo auswirkt. Auf die Art und die Positionen der Absorptionsbanden hat es keinen Einfluss. In Abbildung 4.6a wurden die Neigungswinkel (NWK) bei einem Objektazimuth des Dachziegels von 0° dargestellt. Im VIS ($0.5\mu\text{m}$) fällt die Reflexion relativ von 35° bis 50° NWK um 25%. Im SWIR I ($1.1\mu\text{m}$) und SWIR II ($2.2\mu\text{m}$) gibt es nur geringe relative Abweichungen von bis zu 2%. Abbildung 4.6b zeigt die Ergebnisse bei einer Drehung des Dachziegels um 90° . Im VIS fällt die Abweichung deutlich geringer aus als beim Objektazimuth von 0° . Relativ zum NWK von 35° fällt die Reflexion bei 50° NWK um maximal 11%. Die Abweichungen im SWIR I und SWIR II sind dagegen deutlicher. Im SWIR II fallen die Reflexionswerte relativ vom NWK von 35° zum NWK von 50° auf bis zu 80%. Alle Spektren sind über den gesamten Wellenlängenbereich niedriger als bei einem Objektazimuth von 0° . Dieser Trend setzt sich auch bei der der Strahlung abgewandten Seite (Azimuth von 180°) fort. Die absoluten Reflexionswerte erreichen noch maximal 15%. Die relativen Reflexionswerte sinken im VIS von 35° NWK zu 50° NWK um 64%. Im SWIR II führt der Abfall von mehr als 80% zum fast völligen Verschwinden der charakteristischen Absorptionsbanden.

Verallgemeinernd lassen sich daraus folgende Aussagen ableiten:

- die Reflexion ist maximal, wenn die einfallende Strahlung senkrecht auf das Material trifft
- die Geometrie hat keinen Einfluss auf die Position von Absorptionsbanden.

4.4 Spektrale Charakteristika in den HyMap-Daten

Nachdem im vorangegangenen Kapitel das spektrale Reflexionsverhalten urbaner Oberflächen mit Labor- und Feldspektrometermessungen untersucht wurde, soll nun überprüft werden, wie die hyperspektralen HyMap-Daten diese Charakteristika abbilden. Dazu wurden atmosphärisch korrigierte und in Reflexionswerte umgewandelte Bildspektren verwendet (Abschnitt 3.3.2). Zum besseren Verständnis der spektralen Phänomene in den Bilddaten muss vorerst geklärt werden, wie ein Bildspektrum entsteht und unter welchem Einfluss es sich befindet.

Die gezeigten Bildspektren stellen Mittelwerte aus einer bestimmten Anzahl von Spektren einzelner Pixel dar. Bei Betrachtung der spektralen Information eines Pixels wird modellhaft angenommen, dass die spektrale Information gleichmäßig auf die quadratische Fläche eines Pixels verteilt ist (Abbildung 4.7a). In der Realität bestimmt die *Point Spread Function (PSF)* die Verteilung der aufgenommenen spektralen Information. Die Form hängt dabei vom optischen System ab. Durch die Halbwertsbreite der PSF wird die Pixelgröße definiert (Abbildung 4.7b). Das bedeutet, dass die spektrale Information eines Pixels gleichzeitig zu einem geringen Anteil Informationen des benachbarten Pixels enthält. Einen wesentlich bedeutenderen Anteil kann jedoch die Strahlung ausmachen, welche von der Umgebung in das Gesichtsfeld des Sensors fällt. Dieses Phänomen wird auch als *adjacency effect* bezeichnet (Pearce, 1977; Dave, 1980). Die Höhe des Anteils hängt von der Oberflächenbeschaffenheit (BRDF) und der Helligkeit der Umgebung ab. Je stärker die Kontraste, desto größer ist der Einfluss des helleren Materials (Abbildung 4.7c). Es kann dabei größer erscheinen, als es in der Realität ist. Typisch für Bilddaten

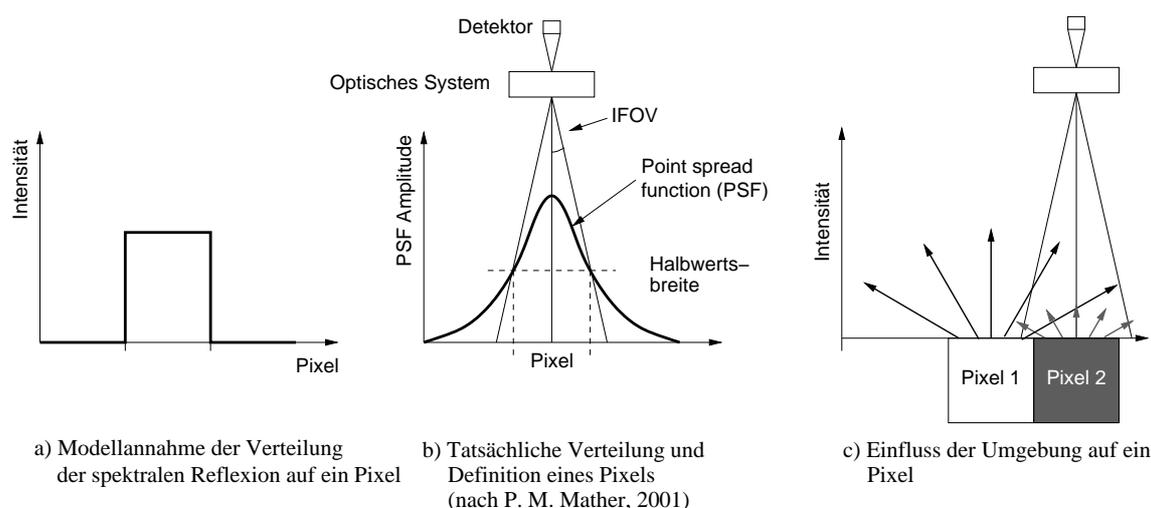


Abbildung 4.7: Definition eines Bildspektrums und Einflussfaktoren auf das spektrale Signal

urbaner Räume ist die Vielfalt stark kontrastierender Materialien. Daher muss mit einer Beeinflussung der Bilddaten aufgrund dieses Effektes gerechnet werden. Der *adjacency effect* kann näherungsweise durch spezielle Atmosphärenkorrekturprogramme minimiert werden (Richter, 1996; Sanders *et al.*, 2001). Sie standen jedoch für diese Arbeit nicht zur Verfügung (Abschnitt 3.3.2).

Neben diesen oben beschriebenen Einflüssen müssen bei der Interpretation der Bildspektren folgende Besonderheiten urbaner Gebiete gegenüber ländlichen Gebieten berücksichtigt werden:

- kleinflächiger und hochfrequenter Wechsel kontrastierender Oberflächmaterialien
- hoher Anteil von Schatten
- unterschiedliche Beleuchtung städtischer Objekte (Dachflächen)
- spektrale Ähnlichkeiten von Dach- und Freiflächenmaterialien unterschiedlicher Funktion

Im Unterschied zum ländlichen Raum sind urbane Gebiete durch einen **kleinflächigen und hochfrequenten Wechsel von Oberflächmaterialien** gekennzeichnet. Dadurch ist es sehr wahrscheinlich, dass Pixel auf Objektgrenzen liegen und damit spektrale Informationen von unterschiedlichen Materialien enthalten. Das Ergebnis ist ein hoher Anteil an sogenannten Mischpixeln. In Abbildung 4.8 ist ein Ausschnitt des Untersuchungsgebietes in Dresden im CIR-Luftbild (räumliche Auflösung ca. 25cm) und im HyMap-Bild (räumliche Auflösung ca. 6m) exemplarisch dargestellt. Das über das CIR-Luftbild gelegte Raster soll näherungsweise verdeutlichen, welche Pixel auf einem Objekt und welche auf Objektgrenzen liegen. Diese Information ist wichtig für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Identifizierung der städtischen Oberflächmaterialien. In den meisten Fällen wird dazu das lineare Entmischungsverfahren (*Linear Spectral Unmixing*) verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgrund des hohen Mischpixelanteils ein erweiterter Klassifizierungs- und Entmischungsalgorithmus eingesetzt (siehe Kapitel 5).

Der Anteil von **Schatten** ist aufgrund der Gebäude in der Stadt besonders hoch. Schatten stellt hinsichtlich der flächendeckenden Erfassung städtischer Oberflächen mit Fernerkundungsdaten (sowohl Luftbilder, als auch Spektraldaten) ein Problem dar. In den meisten Fällen ist das spektrale Signal des beschatteten Materials nicht mehr zu erkennen. Es muss als Schatten identifiziert

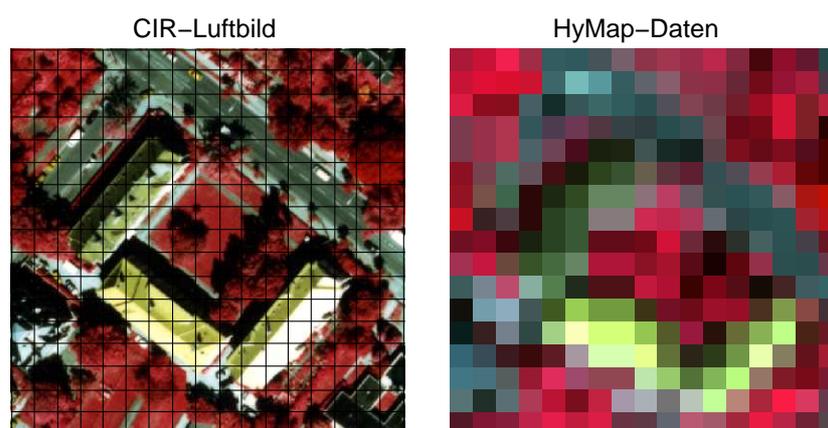


Abbildung 4.8: Hoher Mischpixelanteil in den hyperspektralen HyMap-Daten; links: Darstellung eines CIR-Luftbildes mit simulierter räumlicher Auflösung der HyMap-Daten rechts

werden und kann somit nicht mehr in die anschließende Flächenbilanzierung eingehen. Dennoch ist es in einigen Fällen möglich, beschattete Vegetationsflächen von anderen Schattenflächen anhand des spektralen Reflexionssignals zu trennen. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 4.9a gegeben. Das Spektrum des Schattens auf Vegetation zeigt Ansätze des Reflexionsanstieges in nahen Infrarot, wie es für Vegetation typisch ist.

Der Einfluss der unterschiedlichen **Beleuchtungsverhältnisse** von Dachmaterialien und der damit verbundenen verschiedenen Reflexion konnte bereits in den Labormessungen gezeigt werden (Abschnitt 4.3.3). Es ändert sich dabei nur die Albedo, nicht aber die Position der charakteristischen Absorptionsbanden. In einigen Fällen kann es besonders bei Metallen und Dachmaterialien mit Glas zur spiegelnden Reflexion kommen. Das spektrale Reflexionssignal ändert sich dabei vollkommen. In Abbildung 4.9b sind zum Vergleich die Spektren eines der Sonne abgewandten, eines der Sonne zugewandten und eines spiegelnd reflektierenden Zinkdaches dargestellt. Das spektrale Merkmal von Zink (breite Absorptionsbande bei $1.02 \mu\text{m}$) ist bei spiegelnder Reflexion nicht mehr zu erkennen. Diese spektralen Anomalien müssen bei der Trainingsgebietsauswahl für ein überwachtes Klassifizierungsverfahren beachtet werden.

Problematisch ist die Differenzierung von Oberflächenmaterialien gleichen Grundmaterials unterschiedlicher Funktion, wie es bei Dach- und Freiflächenmaterialien der Fall ist. Diese Materialien zeigen **ähnliche spektrale Signale**, die sich nur aufgrund der verschiedenen Nutzung und Verarbeitung geringfügig voneinander unterscheiden. Ein erstes Beispiel bilden roter Splitt und Dachziegel (Abbildung 4.9c). Beide bestehen aus gebrannten Tonen. Der Effekt der spektralen Ähnlichkeit ist besonders deutlich bei älteren Ziegeln ausgeprägt. Dachbitumen und Straßenasphalt bestehen aus Bitumen (Tabelle 4.1). Die Ähnlichkeit ist in diesem Beispiel bei dem wenig beschichteten Dachbitumen am größten (Abbildung 4.9d). Bei den genannten Materialien reicht die spektrale Information allein zur Differenzierung nicht aus. Für die automatische Differenzierung dieser Materialien werden deshalb auch Merkmale zur Form einbezogen (siehe Kapitel 5).

In Abbildung 4.9e ist ein Beispiel für die spektrale Ähnlichkeit zwischen dunklen Materialien dargestellt. Die spektralen Charakteristika sind aufgrund der niedrigen Albedo nur sehr schwach ausgebildet und können so mit Schatten verwechselt werden. Bei der Unterscheidung von Laub- und Nadelwald zeigten sich spektrale Ähnlichkeiten zwischen den Reflexionsspektren von beschatteten Laubwäldern und Nadelwäldern (Abbildung 4.9f).

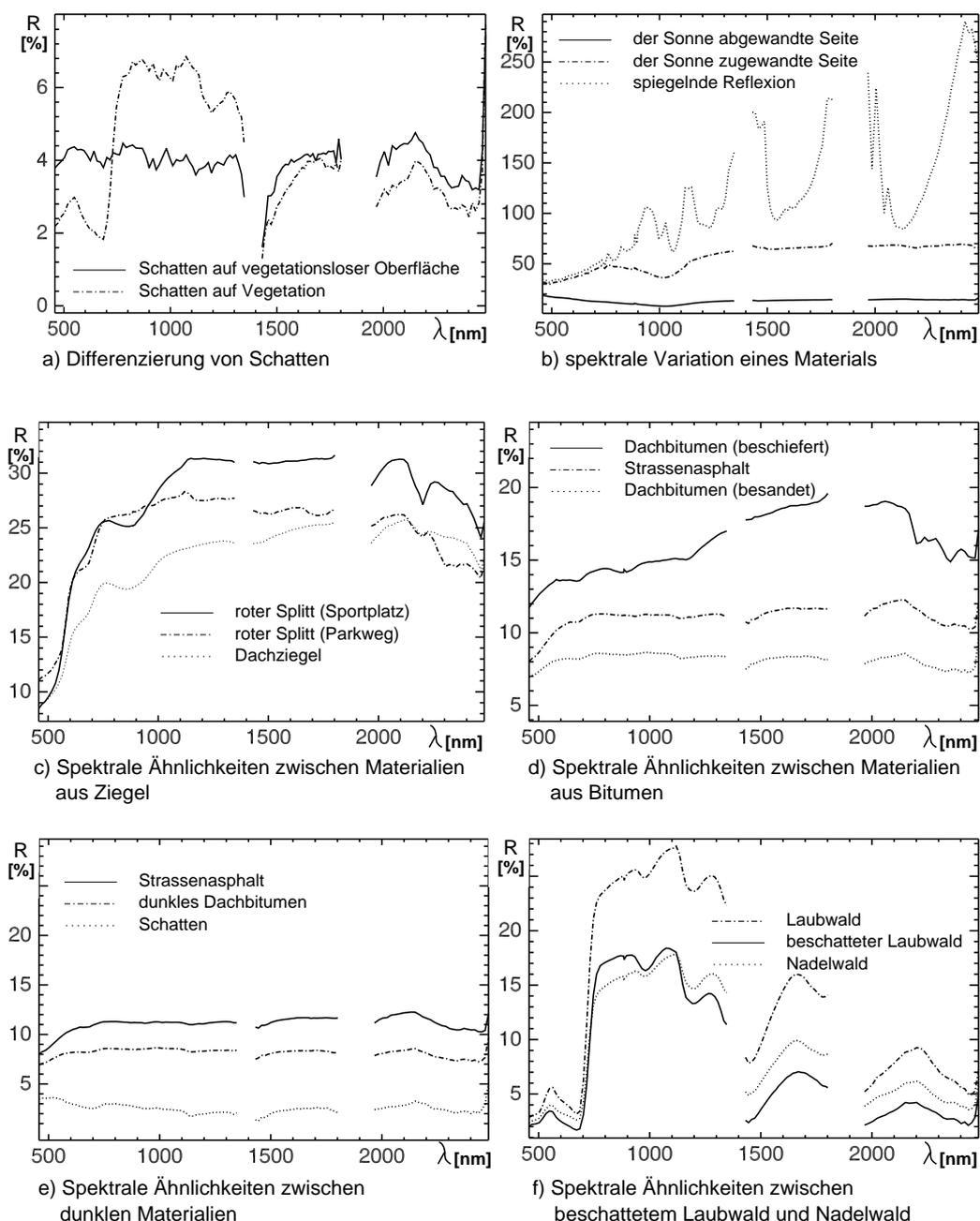


Abbildung 4.9: Spektrale Reflexionssignaturen städtischer Oberflächenmaterialien aus den HyMap-Daten des Testgebietes von Dresden

Von einer weiteren Unterscheidung verschiedener Baumarten wurde abgesehen. Die Labordaten (Abbildung 4.3d) zeigten zwar deutliche Unterschiede zwischen Blättern einzelner Baumarten, das spektrale Signal eines Baumes in den Bilddaten ist jedoch ein Mischsignal chlorophyllhaltiger Blätter und chlorophyllloser Baumbestandteile, wie z.B. Ästen und Schatten. Es hängt demnach nicht nur von dem Reflexionsvermögen der Blätter, sondern auch von der Struktur der Baumkronen ab (Lückigkeit der Baumkronen, Anteil an Schatten). Baumartenspezifische spektrale Untersuchungen in den Bilddaten waren im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da Bäume einer Art nicht in ausreichender Fläche im Untersuchungsgebiet existieren. Es kann somit nur

eine Unterscheidung von Laub- und Nadelwäldern vorgenommen werden. Nach stadtoökologischen Gesichtspunkten ist diese Art der Einteilung der hochstämmigen Vegetation auch ausreichend. Ein Beispiel bildet der in der Stadtökologie eingesetzte gewichtete Vegetationsmassewert von [Rose \(1991\)](#). Die verwendeten Gewichtungsfaktoren berücksichtigen nur die Differenzierung nach Laub- und Nadelwald.

4.5 Quantifizierung spektraler Merkmale

In den vorangegangenen Abschnitten [4.3](#) und [4.4](#) konnte gezeigt werden, inwieweit sich urbane Oberflächen anhand ihrer materialspezifischen Reflexionseigenschaften unterscheiden. Zur Beschreibung wurden Merkmale wie die Position, Tiefe und Breite von Absorptionsbanden (lokale Reflexionsminima), Position, Tiefe und Breite lokaler Reflexionsmaxima und die Albedo verwendet. In diesem Kapitel sollen die Merkmale der urbanen Oberflächenmaterialien mit numerischen Maßen beschrieben werden. Ziel ist eine automatische Trennung auf der Grundlage ihrer spektralen Charakteristika.

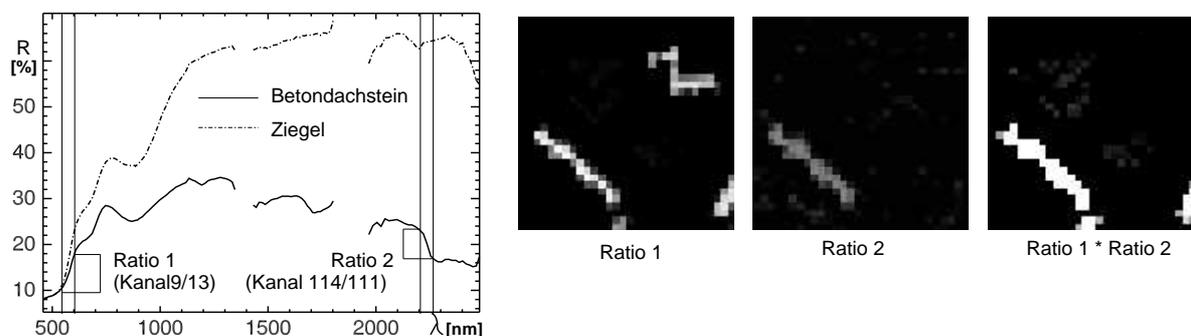


Abbildung 4.10: Numerische Merkmalsextraktion durch Ratiobildung (Bsp. Betondachstein)

Als numerische Maße werden Ratios, Flächeninhalte und die Grauwertbilder einzelner Kanäle verwendet. Die Ergebnisse sind jeweils Grauwertbilder, welche zwischen 0 und 255 skaliert sind. Ein Merkmal gilt dabei als ausgeprägt, wenn es einen Extremwert darstellt. In den Grauwertbildern drückt sich dies durch sehr helle oder sehr dunkle Pixel aus. Die in den Grauwertbildern ausgedrückten Merkmale können auch durch einfache numerische Operationen wie z.B. Multiplikation oder Addition miteinander kombiniert werden. Diese Methode wird vor allem bei ähnlichen Materialien eingesetzt, welche sich nur durch ein schwaches Merkmal voneinander trennen lassen.

In [Abbildung 4.10](#) ist exemplarisch die numerische Beschreibung von Betondachstein dargestellt. Als Information wird die rote Farbe und der damit verbundene Anstieg der Reflexion im roten Bereich des sichtbaren Lichtes verwendet (Ratio 1). Im Grauwertbild der Ratio 1 weist sowohl das mit Betondachstein gedeckte Haus (links unten), als auch das mit Ziegel gedeckte Haus (rechts oben) Extremwerte auf. Betondachstein ist weiterhin durch einen Abfall in der Reflexion zwischen Kanal 111 und 114 gekennzeichnet (Ratio 2). Dieses Merkmal ist nicht so stark ausgebildet. In der Kombination beider Merkmale durch Multiplikation der Grauwertbilder (Ratio 1 * Ratio 2) weist nur noch Betondachstein extreme Werte auf.

[Abbildung 4.11](#) zeigt ein weiteres Beispiel zur numerischen Merkmalsextraktion. Die tiefe und breite Absorptionsbande von Zink eignet sich zur Flächenbildung zwischen Kanal 11 und 61. In

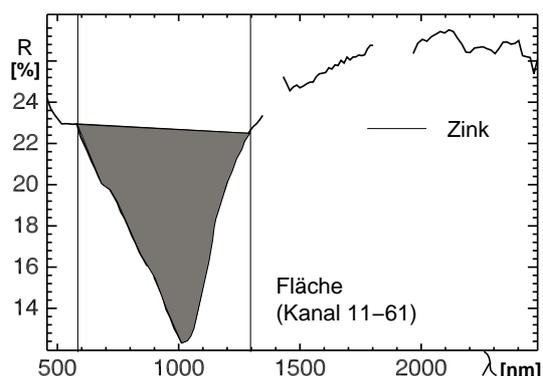


Abbildung 4.11: Numerische Merkmalsextraktion durch Flächeninhaltsberechnung (Bsp. Zink)

Tabelle 4.3 sind die Oberflächenmaterialien und ihre numerischen Maße zur Merkmalsextraktion aufgelistet. Sie finden in der in Kapitel 5 dargestellten automatisierten Identifizierung der urbanen Oberflächenmaterialien Anwendung.

Diese Art der Merkmalsextraktion kann dennoch nur mit Materialien durchgeführt werden, welche ausgeprägte spektrale Merkmale besitzen. Oberflächenmaterialien wie z.B. Schiefer oder Beton können aufgrund ihrer schwach ausgeprägten Merkmale mit dieser Methode nur eingeschränkt aus den hyperspektralen HyMap-Daten extrahiert werden. Es handelt sich dabei vorwiegend um Dachmaterialien. In Tabelle 4.3 sind daher nur die sicher numerisch beschreibbaren Materialien aufgelistet.

Tabelle 4.3: Numerische Merkmalsextraktion auf der Basis hyperspektraler HyMap-Daten

Oberflächenmaterial	Numerisches Maß und Erklärung
Aluminium	1. Flächeninhalt zwischen Kanal 20 und 36
dunkles Bitumen	1. es werden nur die Pixel berücksichtigt, welche in Kanal 25 einen Wert < 1000.0 haben 2. Invertieren dieser Grauwerte 3. Ratio (Anstieg) zwischen Kanal 10 und 17 4. Multiplikation der Ergebnisse aus 2. und 3.
helles Bitumen	1. es werden nur die Pixel berücksichtigt, welche in Kanal 25 einen Wert < 1800.0 haben 2. Flächeninhalt zwischen Kanal 109 und 113 3. Multiplikation der Ergebnisse aus 1. und 2.
Polyethylen (PE)	1. Ratio (Abstieg) zwischen Kanal 87 und 80 2. Ratio (Abstieg) zwischen Kanal 115 und 113 3. Multiplikation der Ergebnisse aus 1. und 2. 4. Multiplikation des Ergebnisse aus 3. mit Kanal 30 (höchste Reflexion von PE)
Polyvinylchlorid (PVC)	1. Mittelwert der Neigung zwischen Kanal 14 und 108 2. Standardabweichung der Neigung zwischen Kanal 14 und 108 3. Multiplikation der Ergebnisse aus 1. und 2.
roter Betondachstein	1. Ratio (Anstieg) zwischen Kanal 9 und 13 2. Ratio (Abstieg) zwischen Kanal 114 und 111 3. Multiplikation der Ergebnisse aus 1. und 2.
roter Ziegel	1. Ratio (Anstieg) zwischen Kanal 29 und 116 2. Ratio (Anstieg) zwischen Kanal 9 und 13 3. Multiplikation der Ergebnisse aus 1. und 2.
Zink	1. Flächeninhalt zwischen Kanal 61 und 11

Identifizierung städtischer Oberflächen

Die automatisierte Identifizierung städtischer Oberflächen mit Hilfe hyperspektraler Daten erfordert die Entwicklung von Methoden, die an den hohen spektralen sowie räumlichen Informationsgehalt der Daten angepasst sind. Im GFZ Potsdam (Sektion Fernerkundung) wurde auf der Grundlage von hyperspektralen DAIS-7915-Daten ein kombinierter Klassifizierungs- und Entmischungsalgorithmus entwickelt (Segl *et al.*, 2003b; Roessner *et al.*, 2001). Er wird mit einigen Modifikationen für die Auswertung der hyperspektralen HyMap-Daten von Dresden eingesetzt.

Das Verfahren beinhaltet die Integration einer Gebäudemasken, die einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses hat. Zur Erstellung dieser Gebäudemasken werden zwei Methoden erprobt, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Sie werden in diesem Kapitel vorgestellt und diskutiert.

Im Abschnitt 5.1 wird der kombinierte Klassifizierungs- und Entmischungsalgorithmus mit seinen auf die HyMap-Daten angepassten Modifikationen kurz erläutert. In Abschnitt 5.2 werden die für die überwachten Bildanalysemethoden notwendigen Klassen in Form von Trainingsdaten vorgestellt. Die Ergebnisse der automatisierten Identifizierung der städtischen Oberflächen werden in Abschnitt 5.3 dargestellt und diskutiert.

5.1 Algorithmus

Die hyperspektralen HyMap-Daten sind durch eine Vielzahl von Mischpixeln aufgrund der hohen Anzahl kleiner Objekte gekennzeichnet. Daher bietet sich für deren Identifizierung ein Entmischungsverfahren an. Die Qualität des Ergebnisses hängt dabei entscheidend von der Auswahl der an der Mischung beteiligten Oberflächenmaterialien ab. Diese werden auch als Endmember (EM) bezeichnet. Da in urbanen Daten eine hohe Anzahl spektral verschiedener Oberflächenmaterialien vorkommt (siehe Kapitel 4) sind problemorientierte Lösungen zur Endmemberauswahl notwendig. Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich die spektrale Mischung eines Pixels aus den unmittelbar in seiner Umgebung befindlichen spektral reinen Pixeln ergibt. Zu diesem Zweck wurde in dem Algorithmus nach Segl *et al.* (2003b) dem Entmischungsprozess eine Klassifizierung der spektral reinen Pixel (*Seedlings*) vorgeschaltet. Die sogenannten *Seedlings* gehen als Endmember in die Entmischung ein und bilden dabei räumliche und thematische Ausgangspunkte. Damit wird die Anzahl der möglichen Endmember in der Umgebung eines unbekanntes Mischpixels reduziert.

Die Identifizierung der *Seedlings* basiert auf der *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung. Voraussetzung dieses Verfahrens ist, dass alle *Seedlings* spektral voneinander trennbar sind. Die Untersuchungen im Abschnitt 4.4 ergaben jedoch, dass einige Dach- und Freiflächenmaterialien sich

spektral nicht eindeutig differenzieren lassen. Zu diesem Zweck werden im Algorithmus Gebäudemasken verwendet, welche die Trennung der betreffenden Materialien wesentlich verbessern.

In Abbildung 5.1 ist der gesamte Algorithmus zur Identifizierung der Oberflächenmaterialien in einem Flusschema dargestellt. Er wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Ausgangspunkt ist die Identifizierung der *Seedlings* unter Verwendung einer *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung, die in Abschnitt 5.1.2 dargestellt wird. Dabei werden Dach- und Freiflächen-*Seedlings* mit Hilfe von Gebäudemasken getrennt klassifiziert. Zwei Methoden zu ihrer Erstellung werden in Abschnitt 5.1.1 vorgestellt. Abschließend folgt ein iterativer Entmischungsprozess, auf den in Abschnitt 5.1.3 eingegangen wird.

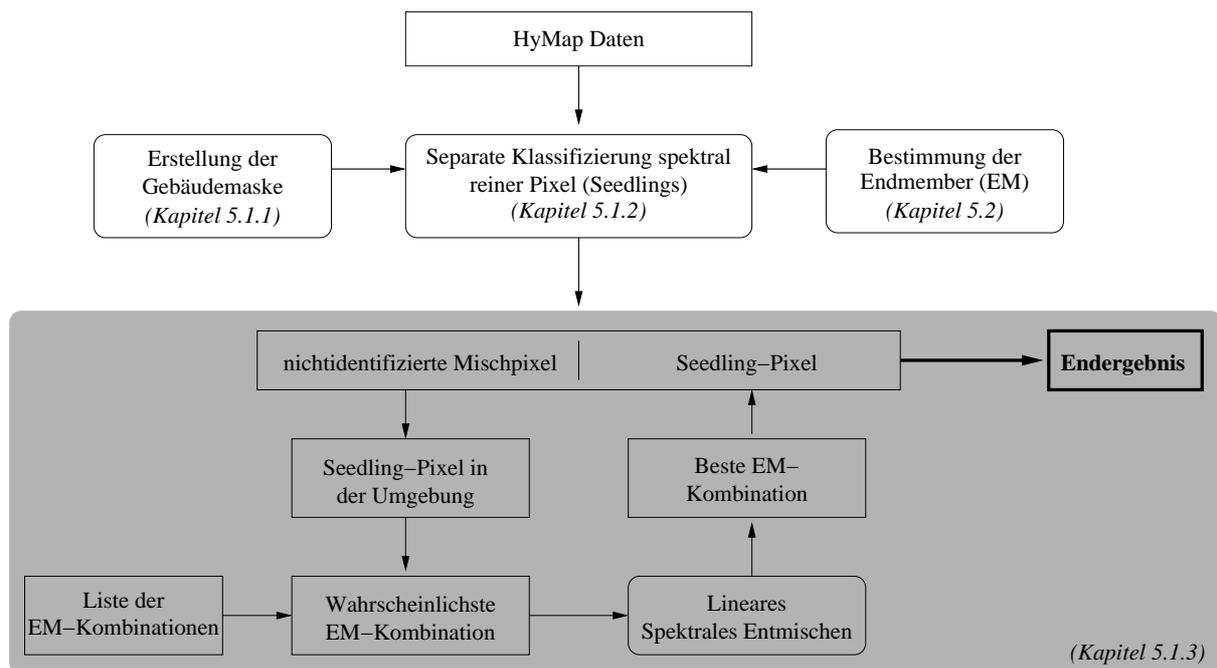


Abbildung 5.1: Kombiniertes Klassifizierungs- und Entmischungsalgorithmus zur automatischen Identifizierung städtischer Oberflächenmaterialien

5.1.1 Erstellung der Gebäudemasken

Die Gebäudemasken werden zur getrennten Identifizierung der Gebäude-*Seedlings* und der Freiflächen-*Seedlings* eingesetzt. In diesem Kapitel werden zwei Methoden zur Erstellung der Gebäudemasken beschrieben (Abbildung 5.2). Die erste Methode beruht auf der Extraktion der Gebäude durch Segmentierung unter alleiniger Nutzung der hyperspektralen HyMap-Daten (spektrale Methode). In der zweiten Methode wird die Gebäudemasken aus einem externen Gebäudedatensatz des Vermessungsamtes in Dresden erzeugt (externe Methode).

Bei der spektralen Methode werden die spektralen Informationen der Dachmaterialien und die Formmerkmale der Objekte aus den HyMap-Daten genutzt. Die Untersuchungen in Abschnitt 4.4 haben gezeigt, dass einige Oberflächenmaterialien aufgrund gleicher Grundmaterialien mit Hilfe der HyMap-Daten nicht allein auf der Basis spektraler Merkmale zu trennen sind. Es handelt sich dabei im Besonderen um Dachziegel und rote Splittflächen sowie um Dachbitumen und Straßenasphalt. Formmerkmale können in beiden Fällen zu einer sicheren Trennung führen.

Dachziegel unterscheiden sich von roten Splittflächen (z.B. Sport- und Tennisplätzen) vor allem durch die Größe ihrer Grundfläche. Dachbitumen lässt sich von Straßenasphalt vor allem aufgrund seines geringen Längen- und Breitenverhältnisses differenzieren.

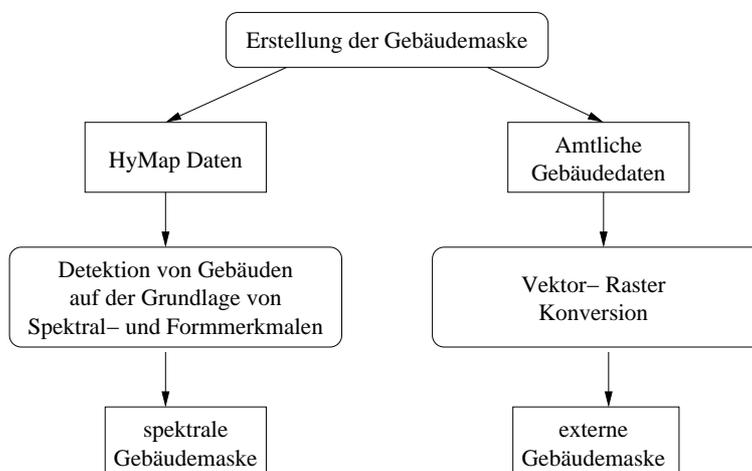


Abbildung 5.2: Erstellung von Gebäudemasken

Die spektrale Methode basiert auf der Bildsegmentierung mit Hilfe von Schwellenwerten in Grauwertbildern. Die Extrema verschiedener Grauwertbilder repräsentieren dabei jeweils ein Dachmaterial. Im ersten Schritt werden die Grauwertbilder durch die Quantifizierung der spektralen Merkmale, wie sie in Abschnitt 4.5 vorgestellt wurden, erzeugt. Dabei werden Ratios, Flächeninhalte zwischen bestimmten Kanälen errechnet oder separate Grauwertbilder einzelner Kanäle eingesetzt. Gibt es mehrere Merkmale, welche mathematisch beschrieben werden können, werden diese gegebenenfalls zur Verstärkung addiert oder multipliziert. Im zweiten Schritt werden die Gebäude auf der Grundlage dieser Grauwertbilder anhand ihrer Formmerkmale klassifiziert. Zunächst werden dabei Schwellenwerte definiert, welche die gewünschten Objekte (Gebäude) von den unerwünschten trennen. Da dieser Prozess stark von der Definition der Schwellenwerte abhängt, wird der Schwellenwert systematisch in einem Grauwertintervall variiert. Dadurch wird eine Vielzahl von Objekten extrahiert und abschließend mit typischen Gebäudeformen verglichen. Dabei werden die Gebäudegröße, die Länge und die Breite der gewünschten Gebäude berücksichtigt. Je öfter ein Objekt innerhalb dieses Intervalls detektiert wird, desto wahrscheinlicher ist seine korrekte Identifizierung. Die extrahierten Objekte werden zu einer Gebäudemasken zusammengefasst (Segl & Kaufmann, 2001).

Das Dachmaterial PVC konnte auf diese Weise nicht sicher detektiert werden. Grund dafür sind die extremen Variationen in der Albedo. Daher wurde zu dessen Erfassung das Klassifizierungsverfahren *Spectral Angle Mapper* verwendet, welches Oberflächen aufgrund ihrer spektralen Form unabhängig von der Albedo identifiziert. Das entstehende Winkelbild (rule image) wurde mit den oben beschriebenen Methoden segmentiert und die Objekte anhand der Formmerkmale extrahiert.

Die Erzeugung der Gebäudemasken mit der externen Methode basiert auf einem Gebäudedatensatz des Vermessungsamtes Dresden im Vektorformat (siehe Tabelle 3.1). Er wird nach Auskunft des Grünflächenamtes Dresden regelmäßig aktualisiert. Der verwendete Datensatz stammt von Januar 2000. Zur Nutzung der Gebäudemasken für das Identifizierungsverfahren werden die Vektoren ins Rasterformat konvertiert. Die Rasterweite beträgt dabei 6m, welche der räumlichen Auflösung der HyMap-Daten entspricht. Die Vektor-Raster-Konvertierung erfolgt nach dem Do-

minanzprinzip, wonach eine Rasterzelle als Gebäude klassifiziert wird, die zu mehr als 50% durch einen Gebäudevektor abgedeckt ist.

5.1.2 Identifizierung der *Seedlings*

Als *Seedlings* werden spektral reine Pixel bezeichnet, die zur räumlichen und thematischen Bestimmung der Endmember im folgenden iterativen Entmischen verwendet werden (Abschnitt 5.1.3). Die Qualität dieser *Seedlings* ist daher von außerordentlicher Bedeutung für den Entmischungsprozess.

Die Identifizierung der *Seedlings* erfolgt mit der *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung. Die dazu notwendigen Klassen in Form von Trainingsdaten werden in Abschnitt 5.2 vorgestellt. Sie repräsentieren alle im Untersuchungsgebiet vorkommenden Oberflächenmaterialien und Schatten. Für die *Maximum-Likelihood*-Klassifizierungen werden die Kanäle¹ ausgewählt, die den stärksten spektralen Kontrast zwischen den Oberflächenmaterialien darstellen. Die Identifizierung der *Seedlings* wird getrennt für Gebäude und alle restlichen Oberflächenmaterialien unter Einsatz der Gebäudemasken durchgeführt.

Die Zugehörigkeit der *Seedlings* zu einer Klasse wird über die Mahalanobis-Distanz klassenweise gesteuert. Damit besteht die Möglichkeit, spektrale Mischpixel von der *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung auszuschließen. Nur bei der Identifizierung der Gebäude-*Seedlings*, die anhand der HyMap-Daten erzeugt wurden, ist diese Art der Beeinflussung nicht nötig, da sie spektral reine Pixel darstellen.

Besonders für die restlichen Oberflächenmaterialien werden niedrige Mahalanobis-Distanzen für jede Klasse bestimmt. Damit wird der Ausschluss spektraler Mischungen von der Klassifizierung gesteuert. Für die Dachmaterialien wird diese Steuerung vor allem bei der Verwendung der externen Gebäudemasken angewendet. Damit besteht die Möglichkeit, dass Pixel, die aufgrund des geometrischen Versatzes der Gebäudemasken keine Gebäude in den HyMap-Daten abdecken, zurückgewiesen werden.

Nach der Klassifizierung der Gebäude-*Seedlings* werden die Kanten der klassifizierten Objekte durch ein Skelettierungsverfahren eliminiert (verändert nach Hilditch (1969)). Damit werden klassifizierte Randpixel von Objekten entfernt, die aufgrund ihrer Randposition potentielle Mischpixel darstellen. Sie werden im folgenden iterativen Entmischungsprozess identifiziert.

5.1.3 Iteratives Entmischen

Ziel des iterativen Entmischens ist es, alle nicht als *Seedlings* klassifizierten Pixel (Mischpixel) auf der Basis des *Linear-Spectral-Unmixing*-Verfahrens zu identifizieren. Die sich in der Umgebung der Mischpixel befindlichen *Seedlings* beinhalten dabei wichtige Informationen für den Entmischungsprozess. Sie dienen der Bestimmung der an der spektralen Mischung beteiligten Endmember (EM), da sich die spektralen Mischungen zu einer hohen Wahrscheinlichkeit aus benachbarten Oberflächenmaterialien ergeben.

Zur Nutzung dieser Informationen wurde auf der Grundlage der DAIS-7915-Daten eine neue Technik zur pixelorientierten Endmemberbestimmung entwickelt (Segl & Roessner, 1999), welche auch für die HyMap-Bilddaten verwendet wird. Diese Technik gliedert sich in vier Schritte und wird in Abbildung 5.3 dargestellt. Zuerst werden in einer Liste alle möglichen EM-

¹Kanäle: 3/9/10/14/18/23/29/39/42/45/53/58/61/68/72/ 76/79/83/87/89/94/96/101/105/108/115/119/124/127

Kombinationen, die in einem Pixel auftreten können, gespeichert (Abb. 5.3a). Dabei werden maximal zwei Endmember pro Kombination zugelassen, womit sich die Wahrscheinlichkeit für einen positiven und damit interpretierbaren Flächenanteil der EM im Entmischungsprozess erhöht. Diese Regelung zielt auf den Schwachpunkt des *Linear-Spectral-Unmixing*-Verfahrens, bei dem durch eine große Anzahl von EM negative Mischanteile entstehen. Die Reduzierung der EM wirkt dem entgegen.

Im zweiten Schritt werden für ein Mischpixel die möglichen Endmember bestimmt. Dabei können drei Fälle auftreten (Abb. 5.3b). Im idealen Fall ist das Pixel (1) eine Mischung aus den beiden angrenzenden *Seedlings*. Gibt es mehr als zwei Endmember in der definierten Umgebung, werden alle Kombinationen mit diesen Endmembers aus der Liste gewählt. Ist nur ein Endmember in der Umgebung (Pixel 2), werden alle Kombinationen aus der Liste, die diesen Endmember enthalten, ausgesucht. Gibt es keine *Seedlings* in der Umgebung des Mischpixels (3), wird es in dieser Iteration vorerst als nicht identifiziert zurückgewiesen.

Im dritten Schritt werden alle für das betreffende Mischpixel ausgewählten EM-Kombinationen entmischt. Abschließend wird die Plausibilität mit Hilfe eines statistischen Hypothesen-Tests überprüft. Bestehen mehrere EM-Kombinationen den Test, wird die beste durch den kleinsten RMS (*root mean square*) bestimmt. Wenn keine EM-Kombination den Hypothesen-Test besteht, werden sie als nicht identifiziert zurückgewiesen und bei der nächsten Iteration erneut berücksichtigt. Die auf diese Weise identifizierten Pixel werden mit den *Seedlings* zusammengefasst und gehen als erweiterte *Seedling*-Information in die nächste Iteration ein (Abb. 5.3c). Das Mischpixel 3 hat nun *Seedlings* in seiner Umgebung und wird im Entmischungsprozess berücksichtigt.

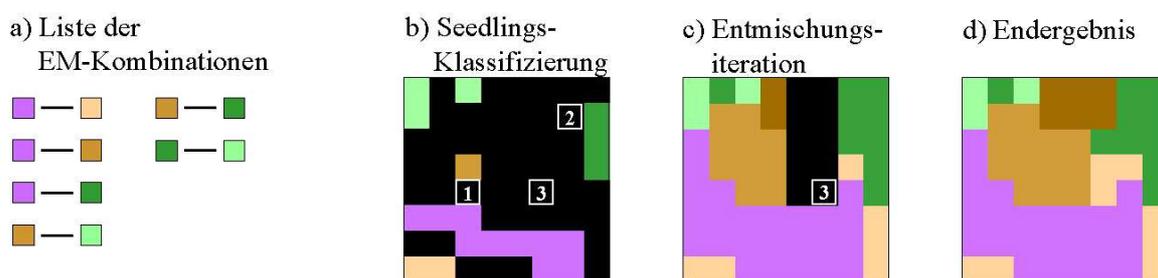


Abbildung 5.3: Pixelorientierte Endmember-Auswahl nach (Segl & Roessner, 1999)

Auf diese Weise „wachsen“ die entmischten Ergebnisse um die *Seedlings* herum. Der iterative Entmischungsprozess endet, wenn es keine Mischpixel mehr gibt, die erfolgreich unter den Bedingungen des Hypothesen-Tests entmischung werden können (Abb. 5.3d). Für die Entmischung wird jeder zweite Kanal² der HyMap-Bilddaten eingesetzt, da die spektrale Form der Spektren entscheidend ist.

5.2 Thematische und spektrale Bestimmung von Klassen

Die im Identifizierungsalgorithmus verwendeten Verfahren zur Bildanalyse sind überwachte Verfahren. Diese erfordern die thematische und spektrale Bestimmung der Klassen (Oberflächenmaterialien) in den HyMap-Bilddaten. Für eine erfolgreiche Bildanalyse müssen die Klassen den

²Kanäle: 3/5/7/9/11/13/15/17/19/21/23/25/27/29/31/33/35/37/39/41/43/45/47/49/51/53/55/57/59/61/63/65/67/69/71/73/75/77/79/81/83/85/87/89/91/93/95/97/99/101/103/105/107/109/111/113/115/117/119/121/123/125/127

Annahmen der verwendeten Analysemodelle entsprechen und alle Oberflächenmaterialien sowie ihre spektralen Variationen repräsentieren.

Tabelle 5.1: Thematische und spektrale Bestimmung der Klassen in den HyMap-Daten

Oberflächentyp	Nr.	Oberflächenmaterial	Anzahl der Klassen (spektrale Variationen)
Gebäudedächer	1	Dachziegel	5
	2	Betondachstein	1
	3	Schiefer	1
	4	Gründach	1
	5	Aluminium	5
	6	Zink	2
	7	Kupfer	1
	8	Dachbitumen	6
	9	PVC	4
	10	Polyethylen	4
	11	Plexiglas	1
	12	Glas	1
	13	Andere	12
vollversiegelte Freifläche	14	Beton	1
	15	Asphalt	4
	16	Andere	1
teilversiegelte Freifläche	17	Kopfsteinpflaster	1
	18	Betonpflaster	1
	19	Splittflächen	5
	20	Andere	1
hochstämmige Vegetation	21	Laubbäume	1
	22	Nadelbäume	1
niedrige Vegetation	23	intensiv gepflegte Rasen	2
	24	extensiv gepflegte Wiesen	3
	25	Acker	1
	26	Brache	1
offener Grund	27	Sand- und Kiesflächen	5
	28	humoser Boden	1
Gewässer	29	fließendes Gewässer	6
	30	stehendes Gewässer	5
Schatten	31		6
Summe	31		90

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt. Darin sind sowohl alle unterschiedlichen Oberflächenmaterialien als auch ihre spektralen Variationen enthalten. Die Bestimmung ist ein Ergebnis der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Untersuchungen, in dem alle materialbedingten spektralen Variationen und andere Effekte in den HyMap-Bilddaten analysiert wurden. Es konnten dennoch nur die Oberflächenmaterialien erfasst werden, die bei der räumlichen Auflösung der Bilddaten von ca. 6m in spektral reiner Form und ausreichender Pixelanzahl vorkamen. Daher wurden besonders kleinflächig vorkommende Oberflächenmaterialien, wie beispielsweise Beton auf schmalen Gehwegen und andere Pflasterarten, nicht als Klassen erfasst.

Die Variationen ergeben sich besonders aufgrund der Farbe (z.B. Ziegel, Kunststoffmaterialien), dem Alter und der Nutzungsintensität (z.B. Ziegel, Asphalt), unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen (z.B. Kunststoffmaterialien), Beleuchtungseffekten (besonders bei Metal-

len) und der Art der Pflegemaßnahmen (z.B. Vegetation). Alle bezeichneten Effekte und die Auswirkung auf das spektrale Signal wurden bereits in Abschnitt 4.4 diskutiert.

Die spektral sehr ähnlichen Oberflächenmaterialien, welche sowohl für Freiflächen als auch für Gebäudematerialien verwendet werden (z.B. Dachziegel und roter Splittbelag sowie Dachbitumen und Asphalt) wurden ebenfalls getrennt als Klasse definiert. Der Algorithmus zur Identifizierung der Oberflächenmaterialien sieht aufgrund der Bedeutung ihrer Differenzierung für Freiflächen- und Gebäudematerialien getrennte Analysen vor.

Schatten wurde als zusätzliche Klasse eingeführt. Er stellt kein Oberflächenmaterial dar, sondern deren spektrale Variationen aufgrund von Beschattungen. Die diagnostischen Absorptionsbanden der beschatteten Oberflächenmaterialien sind aufgrund der geringen Albedos nicht mehr sichtbar. Es konnten nur vegetationsbedeckte und vegetationslose beschattete Flächen als Klassen erfasst werden (siehe auch Abschnitt 4.4).

Damit wurden 90 unterschiedliche Klassen für das Untersuchungsgebiet erfasst. Sie repräsentieren 31 Oberflächenmaterialien und ihre spektralen Variationen.

5.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Erstellung der Gebäudemasken (Abschnitt 5.3.1), der *Seedlings* und des kombinierten Klassifizierungs- und Entmischungsalgorithmus vorgestellt (Abschnitt 5.3.2).

5.3.1 Gebäudemasken

Die Gebäudemasken wurden auf der Grundlage der HyMap-Daten (spektrale Gebäudemasken) und aus einem Vektordatensatz des Vermessungsamtes Dresden (externe Gebäudemasken) erstellt. Die Ergebnisse beider Methoden werden an zwei Beispielgebieten dargestellt und diskutiert (Abbildung 5.4).

Mit der spektralen Methode wurden 6.2% des Untersuchungsgebietes als Gebäude erkannt. Demgegenüber waren es auf der Basis des Gebäudedatensatzes des Vermessungsamtes 10.5%. Die Ursachen des Unterschiedes liegen in der Art der Methode und lassen nicht auf deren Qualität schließen. Die externe Gebäudemasken enthält theoretisch alle Gebäude zum Zeitpunkt der Erfassung. Die mit der spektralen Methode erfassten Gebäude umfassen nur jene, die in den HyMap-Bilddaten durch spektral reine Pixel repräsentiert sind. Damit werden vor allem sehr kleine Häuser, wie sie häufig in Villengebieten und Kleingartenanlagen vorkommen, nicht erfasst.

Die in Abbildung 5.4 dargestellten Beispielgebiete ermöglichen einen differenzierteren Blick auf die Qualität der Gebäudemasken. Die blauen Pixel stellen die externe und die roten die spektrale Gebäudemasken dar. Weiß markiert übereinstimmende Pixel beider Masken. An den langen schmalen Gebäuden im Beispiel 1 ist der leichte geometrische Versatz der externen Gebäudemasken gegenüber den HyMap-Daten zu sehen. Dieser Versatz kann bei der folgenden Klassifizierung der Gebäude-*Seedlings* zu Fehlklassifizierungen oder Rückweisungen führen, da die externe Maske nicht die Gebäudepixel, sondern angrenzende Oberflächentypen wie Gehwege oder Schatten abdeckt. Die markierten Gebäude (a) und (b) verdeutlichen, dass neben den Übereinstimmungen beider Gebäudemasken (weiß) auch jeweils unterschiedliche Gebäude erkannt wurden.

Das Beispiel 2 in der Abbildung 5.4b zeigt diesen Effekt deutlicher. Im Fall (c) wurden zwei Gebäude in der spektralen Maske erkannt, die nicht in der externen Gebäudemasken enthalten

sind. Dies deutet auf die ungenügende Aktualität der Gebäudedaten hin, obwohl der Aufnahmezeitpunkt annähernd denen der HyMap-Daten entspricht. Im Gegensatz dazu sind mehrere Gebäude erkennbar, die nur von der externen Gebäudemasken abgebildet werden (blau). In den meisten Fällen handelt es sich tatsächlich um spektral nicht erfasste Gebäude, Fall (d) zeigt jedoch ein Gebäude, das in den HyMap-Daten nicht vorhanden ist. Nach einer Feldbegehung konnte klargestellt werden, dass dieses Gebäude zum Zeitpunkt des HyMap-Überfluges bereits abgerissen war.

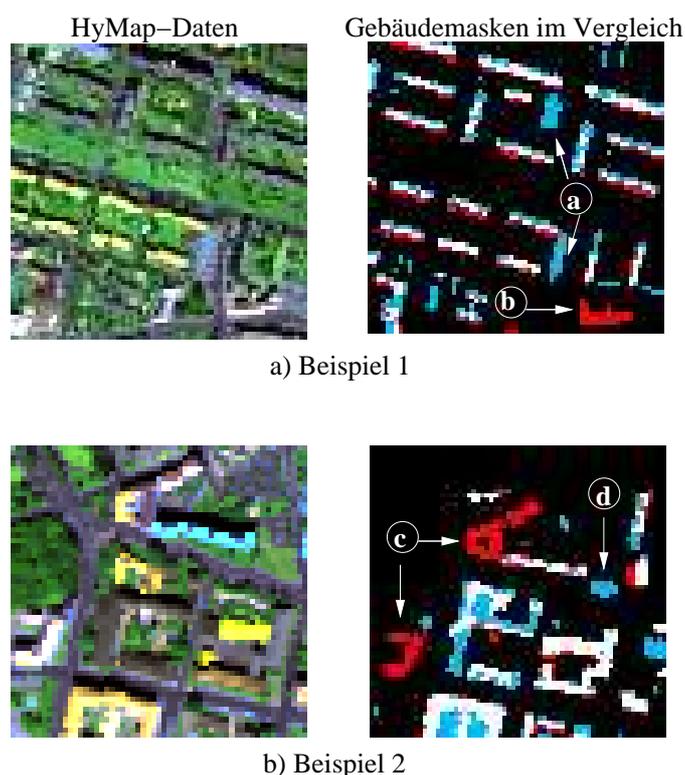


Abbildung 5.4: Gebäudemasken im Vergleich - blau: externe Gebäudemasken, rot: spektrale Gebäudemasken, weiß: Übereinstimmung zwischen beiden Gebäudemasken (Erläuterung der Fallbeispiele (a) bis (d) im Text)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass beide Methoden zur Erstellung der Gebäudemasken Vor- und Nachteile haben. Während bei der Verwendung externer Daten annähernd alle Gebäude erfasst werden können, ist das Ergebnis stark von der Aktualität und der geometrischen Passgenauigkeit zu den Bilddaten abhängig. Davon unabhängig ist die Gebäudemasken, welche auf der Basis der HyMap-Bilddaten erstellt wurde. Desweiteren werden nur spektral reine Pixel erfasst, was die Fehlklassifizierung bei der späteren *Seedlings*-Klassifizierung minimieren kann. Dennoch wurden nicht alle Gebäude aufgrund ihrer spektralen Charakteristik erfasst.

Im Folgenden werden beide Gebäudemasken zur getrennten Erstellung zweier Identifizierungsergebnisse, welche auf der Basis des in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Identifizierungsalgorithmus erzeugt werden, verwendet. Die Entscheidung für die effektivere Methode wird erst nach der Genauigkeitsanalyse in Kapitel 6 gefällt. Das bessere Ergebnis geht in die stadtoökologisch orientierte Auswertung in Kapitel 7 ein.

5.3.2 Oberflächenmaterialien

Der Algorithmus zur Identifizierung der Oberflächenmaterialien beinhaltet die Definition der Liste der EM-Kombinationen, die Identifizierung der Gebäude- und Freiflächen-*Seedlings* und die Entmischung der Mischpixel (siehe Abschnitt 5.1). Die Definition der Liste wird im Folgenden erläutert. Die Zwischenergebnisse des Verfahrens und das Endergebnis sind in Abbildung 5.5 an einem Bildbeispiel aus dem Untersuchungsgebiet in Dresden dargestellt und werden diskutiert. Dabei wird sowohl das Ergebnis unter Verwendung der spektralen Gebäudemasken (Abb. 5.5 links) als auch der externen Gebäudemasken (Abb. 5.5 rechts) berücksichtigt.

Die Liste der EM-Kombinationen enthält 2256 Endmemberpaare. Sie umfasst die Kombinationen der Freiflächenmaterialien (versiegelte Freiflächen, offener Grund und Vegetation) mit den Gebäudematerialien und die Kombinationen der Freiflächenmaterialien untereinander. Eine Zusammenstellung der Gebäudematerialien untereinander wurde nicht zugelassen, was die Identifizierung mehrerer Materialien auf einem Dach verhinderte. Das Verfahren erforderte eine weitere Liste. Sie enthielt Materialien, die nicht bei der Entmischung als Endmember verwendet werden durften, wenn sie nicht als *Seedlings* in der Umgebung des zu entmischenden Pixels vorkamen. Dazu zählten beim Verfahren unter Verwendung der externen Gebäudemasken die Dachmaterialien, Wasser, dunkler Splitt und Schatten, die bei den *Maximum-Likelihood*-Klassifizierungen sehr gut erfasst wurden. Die Liste enthielt für das Verfahren unter Verwendung der spektralen Gebäudemasken nur Wasser, dunklen Splitt und Schatten. Dachmaterialien waren als EM ohne ihr Vorhandensein in der Umgebung des zu entmischenden Pixels zugelassen, da bei der Erstellung der Gebäude-*Seedlings* nur spektral reine Pixel berücksichtigt wurden. Damit sind kleine Gebäude in den *Seedlings* nicht erfasst und mussten demnach im Entmischungsprozess identifiziert werden.

Die Bestimmung der Gebäude-*Seedlings* erfolgte innerhalb der Gebäudemasken getrennt von den anderen *Seedlings* durch die *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung (Abbildung 5.5b). Danach wurden alle übrigen reinen Pixel mit dem *Maximum-Likelihood*-Verfahren und der Mahalanobis-Distanz klassifiziert und mit den Gebäude-*Seedlings* zu einem Datensatz zusammengeführt (Abbildung 5.5c). Dieser bildete die Grundlage (*Seedlings*) für die iterative Entmischung der verbliebenen spektralen Mischpixel (Abbildung 5.5d).

Tabelle 5.2: Prozentuale Flächenanteile der klassifizierten und entmischten Oberflächenmaterialien - Gegenüberstellung der Ergebnisse unter Verwendung der spektralen und der externen Gebäudemasken

Bezeichnung	Ergebnisse mit spektraler Gebäudemasken in [%]	Ergebnisse mit externer Gebäudemasken in [%]
Gebäude- <i>Seedlings</i>	3.5	6.5
Alle <i>Seedlings</i>	43.1	45.2
Klassifiziert und entmischt	98.8	98.9

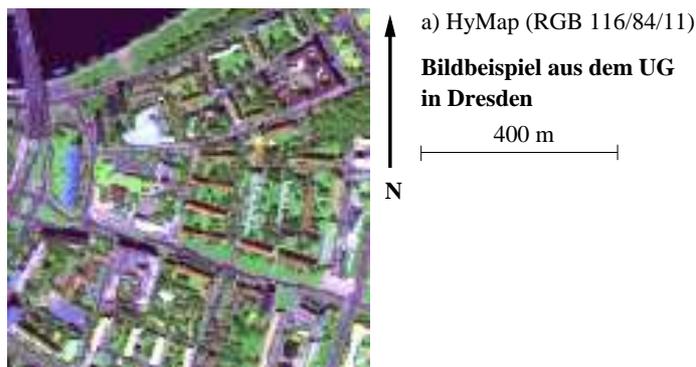
Bei dem Entmischungsdurchlauf unter Verwendung der spektralen sowie externen Gebäude-*Seedlings* wurden jeweils nach 10 Iterationen keine weiteren Pixel mehr entmischt. Somit konnten ca. 99% des Untersuchungsgebietes identifiziert werden. Die jeweils klassifizierten und entmischten Anteile der Oberflächenmaterialien im Untersuchungsgebiet sind für die Ergebnisse unter Verwendung beider Gebäudemasken in Tabelle 5.2 gegenübergestellt.

Eine erste visuelle Kontrolle mit Hilfe von Ortholufbildern und Erkenntnissen aus Begehungen lässt auf gute Ergebnisse für beide Durchläufe schließen. Vor allem bei Wasser, Vegetation,

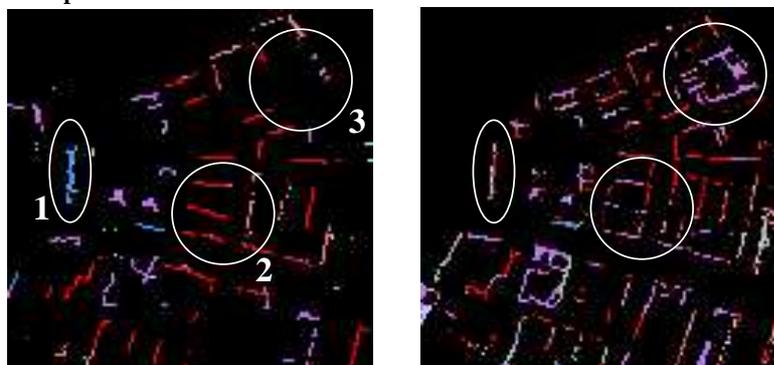
Asphalt und Materialien teilversiegelter Flächen ist eine Übereinstimmung der Entmischungsergebnisse zu erkennen (Abbildung 5.5d). Die Unterschiede bei der Betrachtung der Gebäude zeigen, dass die Qualität der Entmischung stark von der Qualität der klassifizierten *Seedlings* abhängt. In Abbildung 5.5d sind die Gebäude des Ergebnisses mit der spektralen Gebäudemasken sowohl räumlich als auch thematisch besser identifiziert als im Ergebnis mit der externen Hausmaske. Demgegenüber sind in dem Ergebnis unter Verwendung der externen Gebäudemasken mehr Gebäude identifiziert worden.

Dies wird an einem Beispielgebiet an drei Fällen dargestellt. Fall 1 zeigt ein Gebäude, dessen Dachmaterial im Entmischungsergebnis mit der spektralen Gebäudemasken richtig als PVC identifiziert wurde (Abbildung 5.5d). Im Ergebnis mit der externen Hausmaske dagegen wurde es als Beton (Freifläche) falsch identifiziert. Grund dafür sind die Gebäude-*Seedlings* (Abbildung 5.5b), welche in der externen Gebäudemasken infolge der geometrischen Passungengenauigkeit nicht das Gebäude, sondern die angrenzenden Freiflächen wie z.B. Gehwege aus Beton abdecken. Dabei werden vor allem Mischpixel abgedeckt, die bei der *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung fehl- oder gar nicht klassifiziert wurden. Ähnlich verhält es sich auch im Fall 2. Die in der externen Gebäudemasken enthaltenen Pixel decken die Schattenbereiche der Gebäude ab. Folglich traten bei der *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung (*Seedlings*-Identifizierung) Verwechslungen mit dunklen Materialien (hier Bitumen) auf, die als solche in der iterativen Entmischung zum Teil identifiziert wurden. Tatsächlich sind diese Gebäude jedoch mit Dachziegeln gedeckt. Im Fall 3 wurde ein Gebäude im Ergebnis der externen Gebäude-*Seedlings* (Abb. 5.5b rechts) erkannt, während es bei den spektralen Gebäude-*Seedlings* (Abb. 5.5b links) nicht klassifiziert wurde. In der Folge wurde dieses Gebäude auch nicht entmischt (Abb. 5.5d links).

Die Ergebnisse machen deutlich, dass der Erfolg der Entmischung von der Qualität der *Seedlings* abhängt. Beide Ergebnisse zeigen dabei Vorteile und Defizite. Die folgende Genauigkeitsanalyse soll dazu dienen, die Qualität der Entmischungsergebnisse anhand von quantitativen Maßen festzustellen.



Ergebnisse des Identifizierungsalgorithmus mit
spektraler Gebäudemaske externer Gebäudemaske



Legende

Dachmaterialien

- Dachziegel
- Betondachstein
- Aluminium
- Zink
- Bitumen
- PVC
- Polyethylen

Andere Oberflächentypen

- Beton
- Asphalt
- Teilversiegelt
- Bäume und Sträucher
- Rasen, Wiese
- Offener Grund
- Wasser
- Schatten
- nicht identifiziert

Abbildung 5.5: Ergebnisse des Identifizierungsalgorithmus für ein Beispielgebiet von Dresden

Thematische Genauigkeitsanalyse

Die thematische Genauigkeitsanalyse dient der Beurteilung der Qualität der fernerkundlichen Ergebnisse. Der in Kapitel 5 vorgestellte Algorithmus zur automatisierten Identifizierung der städtischen Oberflächenmaterialien produzierte zwei Entmischungsergebnisse, die auf der Basis unterschiedlicher Gebäudemasken erstellt wurden. Beide Entmischungsergebnisse werden in diesem Kapitel bezüglich ihrer Genauigkeit überprüft und miteinander verglichen. Abschließend wird das Ergebnis des effektiveren Verfahrens ausgewählt, welches den Ausgangspunkt für die anschließende Charakterisierung der Stadtbiotoptypen auf der Basis ihrer Oberflächenmaterialien (Kapitel 7) bildet.

Da ein pixelorientierter Ansatz zur Qualitätsüberprüfung der Entmischungsergebnisse ungeeignet ist, wurde eine flächenstatistische Genauigkeitsanalyse der Oberflächenmaterialien durchgeführt. Diese Methode ist jedoch lageunspezifisch. Daher wurde zusätzlich das Vorhandensein städtischer Objekte überprüft. Der objektorientierte Ansatz wurde im Rahmen eines Geoinformationssystems (GIS) verwirklicht. Auf diese Weise konnten die gerasterten fernerkundlichen Ergebnisse und die im Vektorformat erhobenen Referenzdatensätze miteinander verglichen werden.

In Abschnitt 6.1 wird zunächst ein Überblick über die bisher eingesetzten Genauigkeitsverfahren gegeben. Da keines dem gestellten Anspruch der Praktikabilität und Nutzerorientiertheit entspricht, wird in Abschnitt 6.2 die Methodik eines eigenen Verfahrens zur Genauigkeitsanalyse vorgestellt. Dazu sind Referenzdaten notwendig, deren Erstellung in Abschnitt 6.3 vorgestellt wird. Die Ergebnisse der objektorientierten Genauigkeitsanalyse werden in Abschnitt 6.4 präsentiert.

6.1 Genauigkeitsanalysen von Klassifizierungs- und Entmischungsergebnissen

Genauigkeitsanalysen basieren auf dem Vergleich eines Referenzdatensatzes mit fernerkundlich erfassten Einheiten. Der Referenzdatensatz stellt dabei die „Wahrheit“ dar. Er wird meist für ein kleineres Gebiet oder eine Auswahl von Pixeln mit einer hohen Genauigkeit erstellt.

Derzeit gibt es keine etablierte Methode zur quantitativen Analyse der Genauigkeit von Ergebnissen auf *sub-pixel*-Niveau, welche auf der Basis räumlich und spektral hochauflösender Fernerkundungsdaten erzeugt wurden. Das Hauptproblem stellt dabei die Lokalisierung der Pixel im Referenzdatensatz und die damit verbundene Quantifizierung der Flächenanteile im Pixel vorkommender Oberflächenmaterialien dar. Kleine Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Pixelposition können zu signifikanten Fehlern im Referenzdatensatz führen. Abweichungen, die

beim Vergleich des Ergebnis- und Referenzdatensatzes registriert werden, sind damit nicht mehr eindeutig als Fehler bei der Entmischung interpretierbar.

Um diesen Problemen zu entgehen, wurden indirekte Genauigkeitsanalysen durchgeführt. Dabei wurde die Qualität nicht über die Oberflächentypen überprüft, sondern über die den Oberflächentypen zugeordneten Eigenschaften. Ji & Jensen (1999) beispielsweise erfassten auf der Basis von Landsat-TM-Daten durch *sub-pixel*-Analysen die Versiegelung in Charleston (USA). Dabei wiesen sie den Oberflächentypen und ihren Anteilen pro Pixel einen Versiegelungswert zu. Der entstehende Datensatz entsprach einem Klassifizierungsergebnis und wurde anhand 200 zufällig ausgewählter Pixel mit Hilfe von Luftbildern im Rahmen einer Konfusionsmatrix ausgewertet. Die Fehler- oder Konfusionsmatrix ist eine klassische Methode zur Überprüfung der Genauigkeit von Klassifizierungsergebnissen (Aronoff, 1982; Congalton *et al.*, 1983). Bei der Methode von Ji & Jensen (1999) wurde nicht das eigentliche Ergebnis, welches die Oberflächentypen darstellt, überprüft. Für die Genauigkeitsanalyse der mit den HyMap-Daten erfassten Oberflächenmaterialien ist sie deshalb nicht geeignet.

In Segl *et al.* (2003b) und Roessner *et al.* (2001) wurden die prozentualen Flächenanteile der erfassten Oberflächenmaterialien eines großen Gebietes im Referenzdatensatz mit denen im Entmischungsdatensatz verglichen. Diese Analyse ermöglicht Aussagen über die Präsenz oder das Fehlen von Oberflächenmaterialien und ihrer prozentualen Anteile. Dennoch ist diese Art der Genauigkeitsanalyse lageunspezifisch, wodurch Fehler flächenstatistisch „ausgeglichen“ werden können. Sie berücksichtigen nicht die Übereinstimmung von Oberflächenmaterialien an einer bestimmten Position (Campbell, 1996).

Huguenin *et al.* (1997) erfassten zwei Vegetationsarten mit einer *sub-pixel*-Analyse auf der Basis von Landsat *Thematic Mapper*- Daten (TM). Die Genauigkeit des Ergebnisses wurde mit 200 zufällig ausgewählten Pixeln überprüft. Diese wurden bezüglich der beiden Vegetationsarten mit Hilfe von CIR-Luftbildern erhoben und mit dem Entmischungsergebnis verglichen. Dabei wurde nur das Vorhandensein der Vegetationsarten und nicht ihre flächenmäßigen Anteile überprüft. Grund dafür war die Schwierigkeit, die Kontrollpixel exakt am Boden zu lokalisieren. Kleine Fehler können dabei zu signifikanten Fehlern in der Bestimmung der Flächenanteile der Vegetationsarten führen. Zur Prüfung ihres Vorhandenseins ist die Genauigkeit bei der Bestimmung der Pixelposition ausreichend.

Tatem *et al.* (2001) führten automatisierte Kartierungen auf *sub-pixel*-Niveau auf der Basis von simulierten SPOT HRV- und Landsat TM-Daten durch. Für die Genauigkeitsanalyse wurde zusätzlich zu flächenstatistischen Methoden ein Korrelationskoeffizient R eingeführt. Dieser beschreibt den Zusammenhang zwischen Ergebnis- und Referenzdaten. Die Simulation der zur *sub-pixel*-Analyse verwendeten Daten erfolgte aus Luftbildern, die letztlich auch für die Verifizierung verwendet wurden. Im Gegensatz zu echten Satellitenbilddaten kann die Position eines Pixels auf dieser Basis exakt bestimmt werden. Die Genauigkeitsanalyse ist jedoch mit „echten“ Fernerkundungsdaten nicht fehlerlos realisierbar.

Eine sehr verbreitete referenzdatensatzunabhängige Methode zur Bestimmung der Qualität von Entmischungsergebnissen ist die Ausgabe des RMS-Fehlers (*root-mean-squared error*) für jedes Pixel (Eibl *et al.*, 1996; Kressler & Steinocher, 1996). Er ist ein Kriterium zur Bestimmung des besten Mischmodells, sagt aber nichts über die Genauigkeit der identifizierten Klassen (Oberflächenmaterialien) aus. Dazu muss beachtet werden, dass der RMS-Fehler bei Entmischungsmethoden mit einer fixen Anzahl von Endmitgliedern pro Pixel¹ stark von der Anzahl der Klassen abhängt, die in das Mischmodell eingehen. Ist bei der Entmischungsmethode keine

¹diese Methode wird am häufigsten verwendet

Einschränkung hinsichtlich der Anzahl der Endmember pro Pixel gegeben, werden solange Endmember „dazugemischt“, bis das Mischspektrum fast identisch abgebildet ist. Dies führt dazu, dass Endmember „um jeden Preis“ minimale prozentuale Anteile am Spektrum bekommen und der RMS-Fehler damit verkleinert wird. Dies trifft vor allem bei Standardmethoden zu, in denen in der Regel alle zur Entmischung verwendeten Endmember im Mischmodell berücksichtigt werden. Desweiteren kann der RMS-Fehler nur innerhalb einer Szene verglichen werden, da er von den Daten und anderen Faktoren, wie z.B. Korrekturverfahren, abhängt. Der RMS-Fehler ist aus den angeführten Gründen kein aussagekräftiges Maß zur Bestimmung der Qualität der Oberflächenidentifizierung im Entmischungsergebnis.

6.2 Objektorientierte Genauigkeitsanalyse im GIS

In diesem Abschnitt wird eine Methode zur Überprüfung der Genauigkeit der Entmischungsergebnisse vorgestellt, welche eine Kombination aus flächenstatistischen Analysen und der Prüfung des Vorhandenseins von Objekten darstellt. Die Objekte werden dabei von ihren Oberflächenmaterialien repräsentiert. Der Vorteil der objektorientierten Genauigkeitsanalyse gegenüber einer pixelorientierten Analyse liegt in der einfacheren Bestimmung der Position des Referenzdatensatzes in den HyMap-Bilddaten. Die Positionierung von Objekten ist wesentlich zuverlässiger als die von Pixeln. Damit werden die durch geometrische Verschiebungen entstehenden Ungenauigkeiten im Referenzdatensatz minimiert. Für den Nutzer in der stadtplanerischen Praxis ist von Interesse, ob ein Objekt erfasst wurde oder nicht. Die Form ist an dieser Stelle von zweitrangiger Bedeutung, da sie auf der Basis der HyMap-Daten aufgrund der räumlichen Auflösung nicht in der für Gebäudedaten üblichen Genauigkeit reproduziert werden kann.

Die Genauigkeitsanalyse stützt sich auf Referenzgebiete, in denen die städtischen Objekte, wie z.B. Gebäude und Straßen, auf der Basis von Ortholuftbildern geometrisch erfasst werden. Die Objekte werden anhand ihrer Oberflächenmaterialien thematisch charakterisiert. In der Analyse werden im ersten Schritt die manuell klassifizierten Oberflächenmaterialien und die fernerkundlich erfassten Oberflächenmaterialien für das Referenzgebiet flächenstatistisch erhoben und miteinander verglichen. Diese Analyse ermöglicht Aussagen über die flächenmäßige Präsenz und das Fehlen von Oberflächenmaterialien. Die Übereinstimmung von Oberflächenmaterialien an einer bestimmten Position wird vorerst vernachlässigt.

In den folgenden Ausführungen wird die Methodik der objektorientierten Genauigkeitsanalyse im Rahmen eines GIS erläutert. Dazu werden der Referenzdatensatz und der Entmischungsdatsatz in ein einheitliches Datenformat gebracht, um sie miteinander vergleichen zu können (Abschnitt 6.2.1). In Abschnitt 6.2.2 wird definiert, unter welchen Bedingungen ein Objekt als getroffen gilt. Die Beschreibung der Genauigkeitsmaße, die zur Beurteilung der Entmischungsergebnisse interpretiert werden, sind in Abschnitt 6.2.3 dargestellt.

6.2.1 Aufbau des GIS

Für die Aufarbeitung der Referenzdaten und der Entmischungsdaten sowie eine objektorientierte Auswertung eignet sich die Verarbeitung in einem Geo-Informationssystem (GIS). Dieses stellt Bausteine für die gemeinsame Verarbeitung von Raster- und Vektordaten bereit. Auf der Grundlage der ARC/INFO-Software wurden unter Verwendung der Makro-Sprache AML (*Arc-Macro-Language*) automatisierte Methoden zur Aufbereitung des Referenzdatensatzes und der Integration der Entmischungsergebnisse ins GIS entwickelt.

Der Referenzdatensatz wird als Vektordatensatz erstellt. Die Entmischungsergebnisse liegen im Rasterformat vor. Für die Genauigkeitsanalyse im Rahmen des GIS müssen beide in ein gemeinsames Datenformat überführt werden. Dazu wird der Referenzdatensatz (Abb. 6.1a) ins Rasterformat in der Auflösung der HyMap-Bilddaten (6m) umgewandelt (Abb. 6.1b). Die gerasterten Objekte sind Gegenstand der Genauigkeitsanalyse. Grundsätzlich werden dabei die Oberflächenmaterialien der gerasterten Objekte in der manuellen Klassifizierung mit denen im Entmischungsergebnis verglichen.

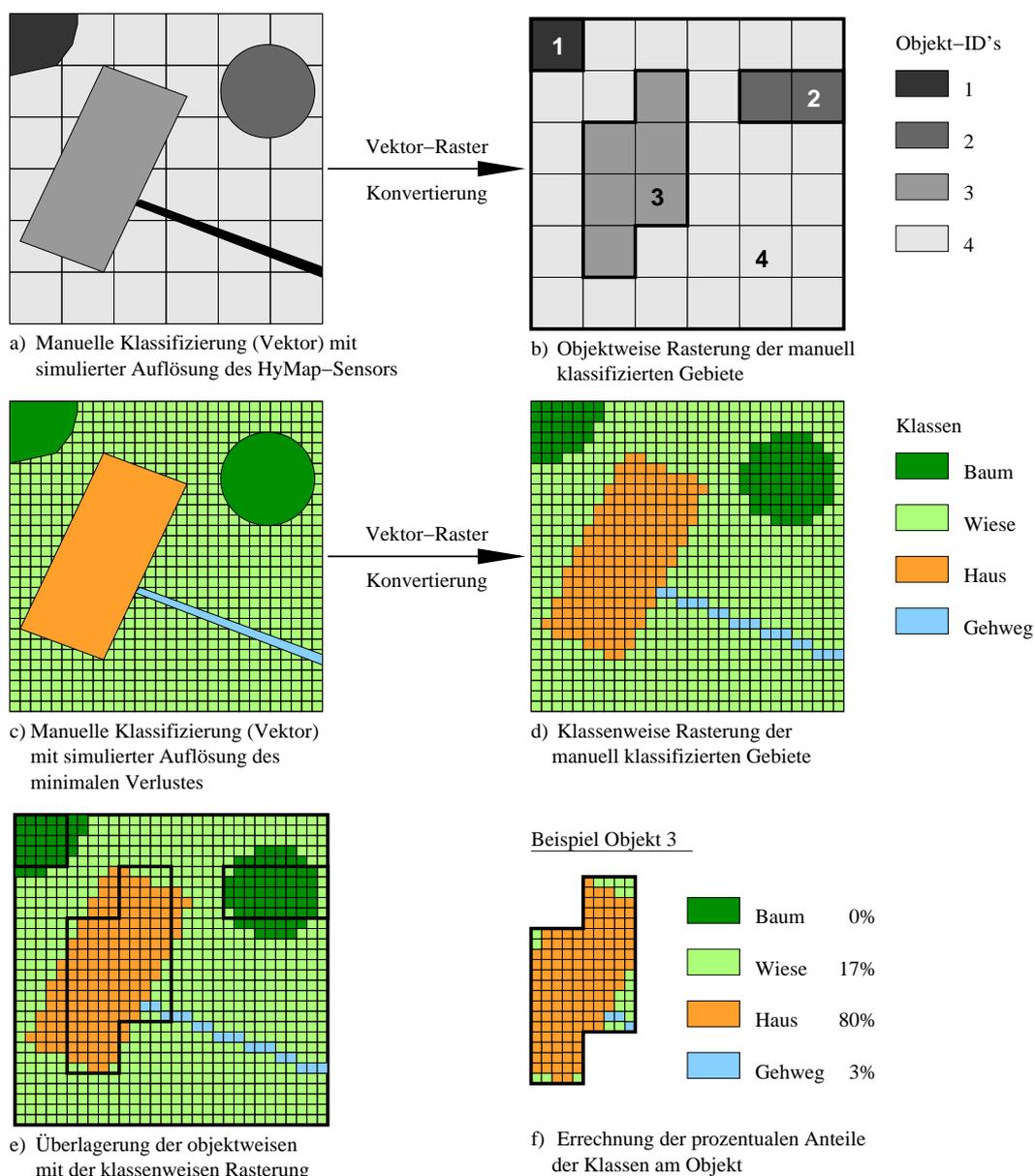


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der Aufarbeitung des Referenzdatensatzes

Das Standardtool der Software zur Vektor-Raster-Konvertierung arbeitet nach dem Dominanzprinzip. Dies führt zu Verlusten besonders bei kleinen und schmalen Objekten und zur Änderung der Form der Objekte. Das gerasterte Objekt deckt nicht mehr exakt ein vektorielles Objekt ab. Zur Erstellung eines an die *sub-pixel*-Genauigkeit der Entmischungsergebnisse angepassten

Referenzdatensatzes wird dieser „entmischt“. Dazu wird der Referenzdatensatz zusätzlich mit einer höheren Auflösung gerastert, in der alle Objekte abgebildet sind (Abb. 6.1b und c). Nun wird in Überlagerung beider Rasterdatensätze der flächenmäßige Anteil der als Vektor erfassten Objekte im gerasterten Objekt errechnet (Abb. 6.1e und f).

Ziel der Genauigkeitsanalyse ist es, die Erfassung der Oberflächenmaterialien zu überprüfen. Für jedes Objekt im Vektordatensatz ist jeweils ein Oberflächenmaterial als Attribut in der dazugehörigen Datenbank gespeichert. Zur Erfassung der Oberflächenmaterialien wird bei der ersten Rasterung in der Auflösung des HyMap-Datensatzes jedem Pixel der Wert des entsprechenden Objektes vergeben (objektweise Rasterung). Bei der Rasterung in der hohen Auflösung erhält jedes Pixel den Wert des entsprechenden Oberflächenmaterials (klassenweise Rasterung). In Abbildung 6.1f ist für ein Beispiel (Objekt 3) die Errechnung der prozentualen Anteile der Oberflächenmaterialien (Klassen) am Objekt dargestellt. Die Anteile werden in Tabellenform für jedes gerasterte Objekt im GIS gespeichert.

Zum Vergleich der Entmischungsergebnisse mit dem Referenzdatensatz werden die fernerkundlich erfassten Oberflächenmaterialien in den Grenzen der gerasterten Objekte erhoben. Ausgangspunkt sind die Grauwertbilder für jedes Oberflächenmaterial, in denen die prozentualen Flächenanteile für jedes Pixel gespeichert sind. Die Grauwertbilder werden mit den gerasterten Objekten des Referenzdatensatzes (Abb. 6.1b) überlagert und flächenstatistisch ausgewertet. Im Ergebnis werden für jedes Objekt die prozentualen Flächenanteile der fernerkundlich erfassten Oberflächenmaterialien in der Datenbank des GIS in einer Tabelle gespeichert.

Sowohl der Referenzdatensatz als auch die Ergebnisse aus der Entmischung liegen somit in Tabellenstruktur vor (Tabelle 6.1). Beide Tabellen sind über die ID der gerasterten Objekte des Referenzdatensatzes miteinander verknüpft. Dadurch lassen sich einfache Vergleichsoperationen zwischen dem Referenzdatensatz und den Entmischungsergebnissen auf der Basis der Objekte durchführen.

Tabelle 6.1: Tabellenstruktur des aufgearbeiteten Referenz- und Entmischungsdatensatzes; Beispiel Objekt 3 des Referenzdatensatzes (siehe Abb. 6.1c)

Objekt-ID	Klasse Baum [%]	Klasse Wiese [%]	Klasse Haus [%]	Klasse Gehweg [%]	Summe [%]
3	0.0	17.0	80.0	3.0	100.0

6.2.2 Trefferdefinition

Für die lagespezifische Genauigkeit wird überprüft, ob ein Objekt, welches im Referenzdatensatz vorhanden ist, auch in den Entmischungsergebnissen repräsentiert ist. Ein Objekt ist durch das Oberflächenmaterial charakterisiert, welches den größten Flächenanteil hat (Abb. 6.1f). Demnach gilt ein Objekt in den Entmischungsergebnissen als getroffen, wenn das Oberflächenmaterial mit dem maximalen Flächenanteil sowohl in den Referenzdatensatz als auch im Entmischungsdatensatz übereinstimmt.

Diese Annahme ist korrekt, wenn beide Datensätze geometrisch exakt übereinstimmen. In Abschnitt 3.3.3 wurde jedoch dargestellt, dass die HyMap-Daten starke lokale Verzerrungen aufweisen. Daher wird die Definition eines Treffers erweitert. In Abbildung 6.2 ist dies exemplarisch

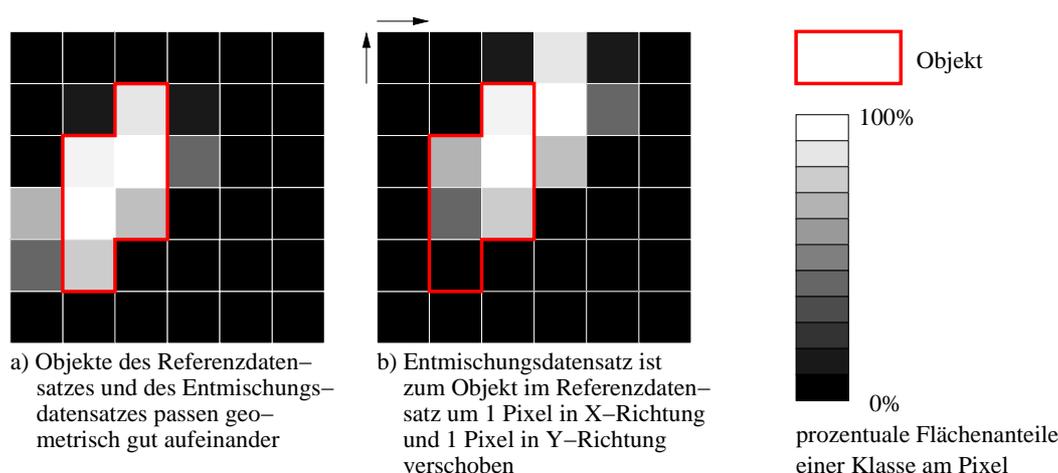


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Trefferdefinition

für ein Gebäude im Entmischungsdatensatz in Überlagerung mit einem gerasterten Objekt dargestellt. Abbildung 6.2a zeigt beide Datensätze in genauer geometrischer Passgenauigkeit. Die Annahme des flächenmäßig maximal vorkommenden Oberflächenmaterials ist in diesem Fall korrekt. In Abbildung 6.2b sind beide Datensätze um ein Pixel verschoben. Dabei hat das entsprechende Oberflächenmaterial nur noch den zweitgrößten prozentualen Flächenanteil. Aus diesem Grund wird die Definition eines Treffers um den zweitgrößten Flächenanteil erweitert, wenn der maximale nicht übereinstimmt.

Aufgrund der *sub-pixel*-genauen Aufarbeitung des Referenzdatensatzes ist ein Vergleich der Flächenstatistiken jedes Objektes in beiden Datensätzen möglich. Die Ungenauigkeit, die sich aus dem geometrischen Versatz ergibt, wurde durch die objektweise Genauigkeitsanalyse minimiert. Dennoch beeinflussen weitere Effekte die Genauigkeit des Referenzdatensatzes. Mit der *Point-Spread-Function* (PSF) wird beschrieben, welchen Anteil an spektraler Information für ein Pixel von den Nachbarn zusätzlich aufgenommen wird. Dieser Anteil wurde bei der Entmischung mitidentifiziert, jedoch nicht im Referenzdatensatz berücksichtigt. Einen weiteren Einfluss hat das im Zuge der geometrischen Korrektur angewandte *Resampling*-Verfahren des *Nearest Neighbour*, welches zwar das spektrale Signal eines Pixels nicht verändert, dafür aber seine Position.

Diese Effekte werden im Referenzdatensatz nicht berücksichtigt, was zu Verzerrungen bei der Bewertung der thematischen Genauigkeit führt. Je kleiner die bewerteten Objekte dabei sind, desto größer ist der Einfluss dieser Effekte. Die Angabe des Treffers als Genauigkeitsmaß stellt daher in Kombination mit einer flächenstatistischen Analyse über das gesamte Referenzgebiet ein realistisches Maß zur Einschätzung der Genauigkeit dar.

6.2.3 Genauigkeitsmaße

Die Genauigkeit der Entmischungsergebnisse wird anhand von Objekten überprüft. Die Objekte werden entsprechend ihrer Oberflächenmaterialien unterschieden. Die Genauigkeitsmaße umfassen den prozentualen Anteil der getroffenen Objekte (Treffergenauigkeit), den prozentualen Anteil der Objektfläche und die Treffermatrix.

Im Rahmen der lagespezifischen Genauigkeitsanalyse wird überprüft, ob die in den Referenzdaten erfassten Objekte in den Entmischungsergebnissen getroffen wurden. Dabei wird der pro-

zentuale Anteil der getroffenen Objekte ausgegeben. Die sogenannte Treffergenauigkeit muss im Zusammenhang mit der Größe der Objektflächen interpretiert werden, da sehr kleine nicht getroffene Objekte zu einer schlechten Treffergenauigkeit führen, obwohl ein Großteil der Flächen richtig identifiziert wurde. Sie werden daher neben der Treffergenauigkeit als zweites Maß angegeben.

In der Treffermatrix sind sowohl die Objekte der Referenzdaten als auch die der Entmischung dargestellt. Daraus kann abgelesen werden, mit welchen Oberflächenmaterialien die falsch identifizierten Objekte verwechselt wurden. Die Zeilen enthalten dabei die Ergebnisse aus der Entmischung, während die Spalten die Referenzdaten repräsentieren. Die in der Treffermatrix errechneten Treffergenauigkeiten für jedes Material ergeben sich aus dem Verhältnis getroffener Objekte zu ihrer Gesamtzahl.

6.3 Manuelle Klassifizierung ausgewählter Stadtgebiete

Die Genauigkeit der Entmischungsergebnisse wird an 5 Testgebieten überprüft. Sie sind repräsentativ, da sie die zahlen- und flächenmäßig am häufigsten im Untersuchungsgebiet vorkommenden Biotoptypen enthalten. Die darin vorkommenden städtischen Objekte wurden flächendeckend auf der Basis von nahezu zeitgleich zu den HyMap-Bilddaten aufgenommenen Ortholuftbildern erfasst. Dadurch konnten Fehler, die auf eine echte Oberflächenänderung zurückzuführen sind, ausgeschlossen werden. Die Form der Objekte wurde aus den Ortholuftbildern digitalisiert und bezüglich der durch sie repräsentierten Oberflächenmaterialien attribuiert. Die Materialinformationen wurden für die Vegetation aus den Ortholuftbildern abgeleitet. Alle anderen Oberflächenmaterialien wurden durch Feldbegehungen erfasst. Die Testgebiete sind in den Abbildungen [A.1](#) und [A.2](#) im Anhang dargestellt.

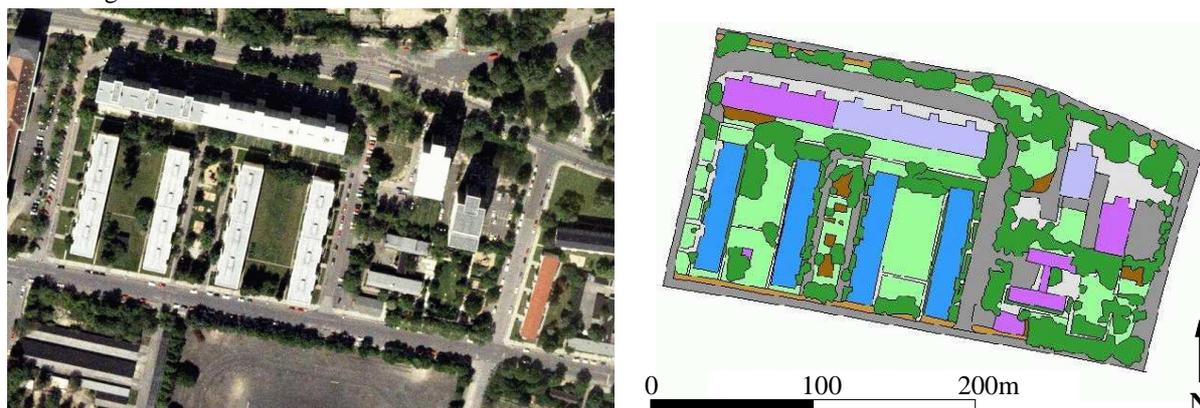
Tabelle 6.2: Charakterisierung der Referenzgebiete

Referenzgebiet	dominierender Biotoptyp	Charakterisierung
1	Großform- und Hochhausbebauung	- breite 7-10 stöckige Gebäude, Flachdächer - dazwischen großflächige intensiv gepflegte Grünanlagen - durchschnittlicher Anteil von Laubgehölzen - reine Wohnfunktion
2	Zeilenbebauung	- langgestreckte, schmale 5-stöckige Gebäude, Satteldächer - dazwischen großflächige intensiv gepflegte Grünanlagen - durchschnittlicher Anteil von Laubgehölzen und Sträuchern - Garagenanlagen - reine Wohnfunktion
3	Zeilenbebauung, Gewerbegebiete	- gemischte Bebauung, unterschiedliche Gebäudegrößen - teilweise Blockbebauung - geringer Anteil an Laubgehölzen - gemischte Nutzung
4	Industriegebiet	- sehr große flache Gebäude mit Flachdächern - nahezu vollständige Versiegelung - sehr geringer Anteil an Vegetation - industrielle und gewerbliche Nutzung
5	Industrie- und Sonderflächen	- Mischung aus Referenzgebiet 3 und 4

Die 5 Testgebiete unterscheiden sich in der Größe der in ihnen vorkommenden Objekte und ihrer dominierenden Flächennutzung. Sie sind in Tabelle [6.2](#) charakterisiert. Die Testgebiete

wurden in Bereichen des Untersuchungsgebietes ausgewählt, welche durch eine hohe Material- und Objektdichte gekennzeichnet sind. Der Schwerpunkt liegt auf den dicht bebauten Gebieten, da der Algorithmus zur Identifizierung der Oberflächenmaterialien darauf optimiert wurde. Sie klammern Gebiete mit großflächig auftretenden Oberflächenmaterialien, wie z. B. Wald und die Elbe mit deren flussnahen Wiesen, aus, da sich diese aufgrund des geringen Mischpixelanteils einfacher als dicht bebauten Bereiche detektieren lassen. Die visuelle Kontrolle zeigte, dass die großflächigen Gebiete sehr gut in den Entmischungsergebnissen wiedergegeben sind (siehe Karte B.4). Unter ihrer Berücksichtigung würde die Analyse der Genauigkeit für die dicht bebauten Bereiche zu unrealistischen Ergebnissen führen.

Referenzgebiet 1



Legende der manuellen Klassifizierung

	Dachbitumen		Kopfsteinpflaster
	PVC		Laubbaum
	Polyethylen		Rasen
	Beton		Sand u. Kies
	Asphalt		

Abbildung 6.3: Manuelle Klassifizierung des Referenzgebietes 1

Zwei Effekte beeinflussen die Vergleichbarkeit der Orthofotobilder und HyMap-Daten - Schatten und die perspektivische Verzerrung der Gebäude im Luftbild. Bedingt durch die unterschiedliche Aufnahmegeometrie und die Befliegung zu unterschiedlichen Tageszeiten weisen beide Bilder Schattenwürfe auf, welche jeweils unterschiedliche Oberflächenmaterialien verdecken. In diesem Fall wurden die Oberflächenmaterialien der beschatteten Bereiche in den Orthofotobildern aus den Informationen der Feldbegehungen vervollständigt. Der Referenzdatensatz ist danach schattenfrei. Die perspektivische Verzerrung der Gebäude wurde durch die unterschiedlichen Öffnungswinkel beider Systeme verursacht. Dadurch werden verschiedene Flächen in beiden Daten verdeckt. Der Referenzdatensatz wurde bezüglich der perspektivischen Verzerrung korrigiert, indem die Gebäude nur gemäß ihres Grundrisses erfasst und die dadurch wieder freiliegenden Oberflächenmaterialien mit Informationen aus den Feldbegehungen ergänzt wurden.

6.4 Genauigkeit der fernerkundlich erfassten Oberflächenmaterialien

Die Entmischungsergebnisse unter Verwendung der spektralen Gebäudemaske (SP-Ergebnis) und der externen Gebäudemaske (EX-Ergebnis) wurden vergleichend analysiert. Dabei stellte sich heraus, dass die Werte der Genauigkeitsparameter für beide Ergebnisse ähnlich sind. Dennoch wird zur stadtökologischen Analyse das SP-Ergebnis verwendet. Im Folgenden wird die Genauigkeit der beiden Entmischungsergebnisse dargestellt. Die Analyse gliedert sich in die Auswertung der Gesamtflächenstatistik (Abschnitt 6.4.1) und der Trefferstatistik (Abschnitt 6.4.2).

In die Betrachtungen gehen sowohl die Oberflächenmaterialien, als auch die Oberflächentypen ein, die in der Einteilung der städtischen Oberflächen von der Ebene 3 repräsentiert werden (siehe Abb. 2.10). Die Genauigkeitsanalyse auf dieser Ebene ist besonders im Hinblick auf die spätere Auswertung der Ergebnisse in Kapitel 7 von Interesse. Die Parameter der stadtökologischen Charakterisierung werden hauptsächlich auf der Basis der Oberflächentypen von Ebene 3 gebildet.

6.4.1 Gesamtflächenstatistik

Die Abbildung 6.4 zeigt für alle Referenzgebiete die prozentualen Anteile der Oberflächenmaterialien der Referenzdaten im Vergleich zum SP-Ergebnis und dem EX-Ergebnis. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Ausnahme der Klassen Schiefer und Andere Dachmaterialien alle in den Referenzdaten klassifizierten Oberflächenmaterialien auch in den Entmischungsergebnissen identifiziert wurden. Dagegen wurden einige Materialien, wie z.B. Betonpflaster, Nadelgehölze und Schatten in den HyMap-Bilddaten entmischt, die nicht in den Referenzdaten klassifiziert wurden. Fast alle dieser Materialien liegen jedoch unter 1%. Die Nadelgehölze, welche mit ca. 6% entmischt wurden, sind auf eine Fehlidentifizierung zurückzuführen, da sie nicht im Referenzdatensatz vorkommen. Schatten (4.5%) ist tatsächlich spektral in den HyMap-Bilddaten enthalten, wurde aber nicht in den Referenzdaten erfasst. Die Zahlenwerte der Ergebnisse sind in Tabelle A.2 im Anhang für jedes Oberflächenmaterial aufgelistet.

In Tabelle 6.3 sind die Oberflächenmaterialien auf der Ebene 3 ihrer Einteilung zusammenfassend dargestellt (siehe Abb. 2.10), da sie in der stadtökologischen Auswertung u.a. auf dieser Generalisierungsstufe verwendet werden. In ihrer Gesamtheit sind die Dachmaterialien flächenanteilmäßig in beiden Ergebnissen gut vertreten. Im SP-Ergebnis wurden 3.5% zu wenig und im EX-Ergebnis 3.0% zu viel identifiziert. Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus der ersten visuellen Kontrolle in Abschnitt 5.1. Die vollversiegelten Flächen sind bei beiden Entmischungsergebnissen unterrepräsentiert. Besonders Beton zeigt ein flächenmäßiges Defizit von ca. 7% (Abb. 6.4). Die Ursachen für dieses Defizit werden in Abschnitt 6.4.2 ergründet.

Die hochstämmige Vegetation zeigt in ihrer Gesamtheit sehr gute Übereinstimmungen zwischen den Referenzdaten und den Entmischungsergebnissen. Diese Werte ergeben sich zum Teil aus einer Unterpräsenz der Laubgehölze und dem Vorhandensein der Nadelgehölze in den Entmischungsergebnissen (Abb. 6.4). In Abschnitt 6.4.2 wird untersucht, auf welchen Oberflächenmaterialien in den Referenzdaten die Nadelgehölze identifiziert wurden.

In beiden Entmischungsergebnissen wurde auf ca. 4.5% der Flächen Schatten identifiziert. Diese Flächen decken andere Oberflächenmaterialien ab, die bei der Flächenstatistik nicht berück-

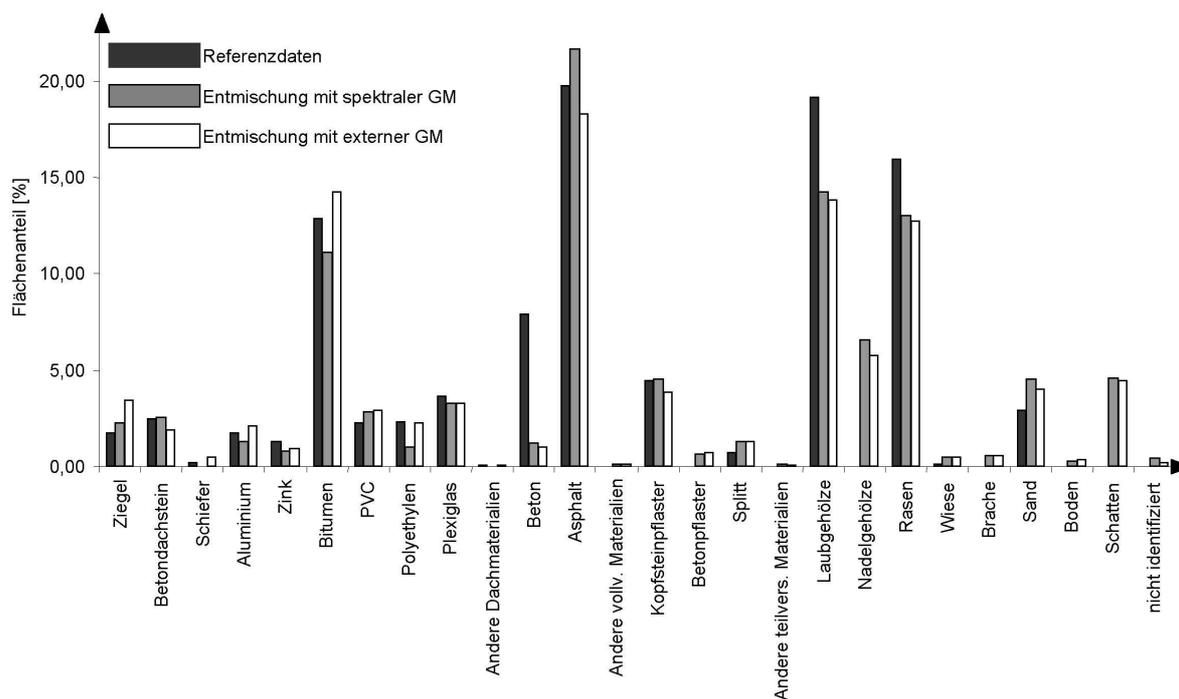


Abbildung 6.4: Gesamtflächenstatistik der Oberflächenmaterialien aller Referenzgebiete (GM = Gebäude-
maske)

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Gesamtflächenstatistik für alle Referenzgebiete auf Ebene 3 der Oberflächentypen in (%)

Oberflächentyp	Manuelle Klassifizierung in [%]	SP-Ergebnis in [%]	EX-Ergebnis in [%]
Dachmaterialien	28.9	25.3	31.9
Vollversiegelt	27.7	23.1	19.5
Teilversiegelt	5.2	6.6	6.0
Hochstämmige Vegetation	19.2	20.9	19.6
Niedrige Vegetation	16.1	14.1	13.9
Offener Grund	2.9	4.8	4.4
Schatten		4.6	4.5
nicht identifiziert		0.4	0.2

sichtigt werden können. In der folgenden Trefferstatistik werden die Ursachen für die in der Gesamtflächenstatistik auftretenden Abweichungen detailliert untersucht.

6.4.2 Trefferstatistik

In Tabelle 6.4 sind die Ergebnisse der Trefferstatistik für die Oberflächentypen der Ebene 3 zusammenfassend dargestellt. Tabelle 6.5 enthält die Genauigkeitsmaße für alle Oberflächenmaterialien. Die Treffermatrizen sind jeweils für das SP-Ergebnis und das EX-Ergebnis in Abbildung A.3 und A.4 dargestellt.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für die Oberflächentypen (Ebene 3)

Oberflächentyp (Ebene 3)	Objekt- anzahl	Fläche im Referenz- gebiet [%]	SP-Ergebnis		EX-Ergebnis	
			getroffene Objekte [%]	Fläche der getroffenen Objekte [%]	getroffene Objekte [%]	Fläche der getroffenen Objekte [%]
Dachmaterialien	144	28.8	81.3	95.2	86.1	93.9
Vollversiegelte Freiflächen	162	24.9	57.4	75.8	50.6	72.3
Teilversiegelte Freiflächen	37	7.0	5.4	7.3	21.6	74.6
Hochstämmige Vegetation	252	20.3	63.9	88.7	66.7	90.5
Niedrige Vegetation	283	16.9	48.1	66.5	46.3	66.6
Offener Grund	20	2.1	30.0	76.1	20.0	63.0
Gesamt	898	100.0	57.3	77.6	57.6	81.2

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse für die Oberflächenmaterialien (Ebene 4)

Oberflächentyp (Ebene 3)	Objekt- anzahl	Fläche im Referenz- gebiet [%]	SP-Ergebnis		EX-Ergebnis	
			getroffene Objekte [%]	Fläche der getroffenen Objekte [%]	getroffene Objekte [%]	Fläche der getroffenen Objekte [%]
Ziegel	3	1.0	100.0	100.0	66.7	95.1
Betondachstein	15	2.8	93.3	94.1	66.7	70.8
Schiefer	3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Aluminium	5	3.2	80.0	94.8	60.0	89.4
Zink	7	2.5	71.4	96.8	57.1	89.8
Bitumen	90	12.7	71.1	92.2	72.2	85.0
PVC	7	1.5	100.0	100.0	71.4	79.7
Polyethylen	13	2.0	69.2	97.8	46.2	72.0
Plexiglas	1	2.5	100.0	100.0	100.0	100.0
Beton	81	6.4	4.9	0.9	0.0	1.5
Asphalt	81	18.5	67.9	82.7	65.4	82.3
Kopfsteinpflaster	34	6.5	0.0	0.0	14.7	68.7
Splitt	1	0.5	100.0	100.0	0.0	0.0
Andere teilv. Materialien	2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Laubbaum	252	20.3	52.0	82.6	50.8	84.9
Rasen	280	16.7	46.8	65.5	43.9	64.8
Wiese	3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Sand	20	2.1	30.0	68.3	20.0	0.0
Gesamt	898	100.0	48.4	71.8	49.1	63.0

Die Referenzgebiete enthalten insgesamt 898 Objekte. Davon wurden in beiden Entmischungsergebnissen ca. 57% der Objekte getroffen. Dies entspricht im SP-Ergebnis einer Fläche von 78% und im EX-Ergebnis einer Fläche von 81%. Die Dachmaterialien haben mit 28.8% den größten Flächenanteil an den Referenzgebieten. Sie wurden in beiden Ergebnissen sehr gut erfasst. Im SP-Ergebnis wurden 81% der Gebäude getroffen, was einer Fläche von 95% entspricht. Für das EX-Ergebnis wurde eine etwas höhere Treffergenauigkeit von 86% errechnet, die getroffene Fläche beträgt dagegen nur 93% (Tab. 6.4). Tabelle 6.5 zeigt, dass die einzelnen Dachmaterialien im SP-Ergebnis mit einer höheren Genauigkeit getroffen wurden als im EX-Ergebnis.

Objekte, die mit vollversiegelnden Freiflächenmaterialien bedeckt sind, wurden im SP-Ergebnis zu 57% (76% Fläche) und etwas weniger im EX-Ergebnis zu 51% (72% Fläche) getroffen. Haupt-

verantwortlich für die geringen Treffergenauigkeiten ist Beton, der im SP-Ergebnis nur zu 5% und im EX-Ergebnis gar nicht getroffen wurde. Asphalt wurde dagegen bei beiden Ergebnissen mit mehr als 65% getroffen, was einer Fläche von ca. 82% entspricht. Probleme gab es bei den teilversiegelten Freiflächen. Im SP-Ergebnis wurden nur 5% dieser Objekte getroffen, im EX-Ergebnis waren es mit 22% (75% der Fläche) deutlich mehr. Im Folgenden wird auf einzelne Effekte bei den versiegelten Freiflächen genauer eingegangen.

Die getrennte Identifizierung der spektral ähnlichen Dach- und Freiflächenmaterialien war ein Hauptkriterium bei der Entwicklung des Klassifizierungs- und Entmischungsalgorithmus. Dieses ist zum Teil sehr gut gelungen. Beim SP-Ergebnis wurden 71% der mit Bitumen gedeckten Gebäude getroffen, was einer Fläche von ca. 92% aller Bitumendächer entspricht. Nur 14% wurden als der spektral ähnliche Asphalt identifiziert (Abb. A.3). Entsprechend des Verhältnisses aus getroffenen Objekten und der dazugehörigen Fläche, handelt es sich bei den nicht getroffenen Bitumendächern vorwiegend um sehr kleine Gebäude. Sie konnten spektral nicht eindeutig in der Gebäudemasken als *Seedlings* erfasst werden. In der Entmischung kam es deshalb oft zu Verwechslungen mit Asphalt.

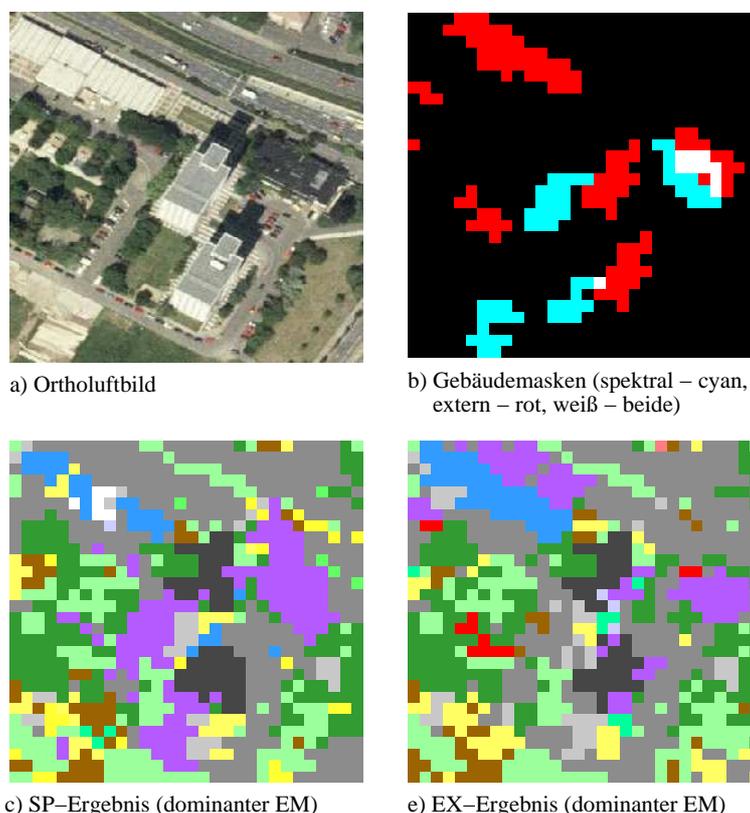


Abbildung 6.5: Einfluss der Qualität der Gebäudemasken auf die Trennung von spektral ähnlichen Dach- und Freiflächen (Legende der Entmischungsergebnisse siehe Abb. 5.5)

Im EX-Ergebnis wurden 72% der Objekte getroffen. Dies entspricht einer etwas geringeren Fläche gegenüber dem SP-Ergebnis von 85%. Der Einfluss der Objektgröße ist dabei nicht so stark ausgeprägt. Eine größere Rolle spielt der geometrische Versatz² der externen Gebäudemasken zu

²An dieser Stelle wird von Versatz gesprochen, da die HyMap-Daten den Bezug darstellen. Der Versatz ergibt sich jedoch aus den lokalen Verzerrungen des HyMap-Datensatzes. Die externe Gebäudemasken ist geometrisch einwandfrei. Die darin erfassten Gebäude wurden geodätisch sehr genau vermessen

den HyMap-Bilddaten. Ein Beispiel ist in Abbildung 6.5 an den beiden würfelförmigen hohen Gebäuden demonstriert (Abb. 6.5a). Sie befinden sich in einem Gebiet mit starkem lokalen Versatz der externen Gebäudemasken zu den HyMap-Daten. Die roten Pixel repräsentieren die externe Gebäudemasken, die nicht auf den Gebäuden liegt, sondern auf den umliegenden Freiflächen (Abb. 6.5b). Im EX-Ergebnis wurden sie daher nicht als Bitumen, sondern zum Teil als der spektral ähnliche Asphalt entmischt (Abb. 6.5d). Im SP-Ergebnis wurden sie korrekt identifiziert (Abb. 6.5c).

Die getrennte Identifizierung der spektral ähnlichen Dachziegel und roten Splittflächen kann nicht ausreichend quantitativ belegt werden, da zu wenige Objekte dieser Oberflächenmaterialien in den Referenzgebieten vorkommen. Dennoch ist festzustellen, dass im SP-Ergebnis keines der Ziegeldächer fehlidentifiziert wurde. Das mit rotem Splitt bedeckte Objekt im Referenzdatensatz wurde ebenfalls richtig identifiziert (Abb. A.3). Eine visuelle Kontrolle der Ergebnisse zeigte ebenfalls gute Resultate. Die Parkwege des Landschaftsparks „Großer Garten“, die mit rotem Splitt bedeckt sind, wurden auch als solche erkannt. Verwechslungen gab es bei Objekten, die eine ähnliche Form wie Gebäude haben, wie z.B. kleineren Sportplätzen. In Abbildung 6.6a und b ist zu sehen, dass der Sportplatz sehr gut identifiziert wurde. Aufgrund seiner Größe konnte dieser trotz spektraler Ähnlichkeit zu Ziegel bei der Gebäudemaskenerstellung durch Segmentierung ausgeschlossen werden. Dies gelang bei dem Beispiel in Abbildung 6.6c und d nicht. Der Sportplatz entspricht sowohl in der Form als auch in der Größe einem Gebäude. Er wurde im SP-Ergebnis fehlidentifiziert. Die Ergebnisse im EX-Ergebnis zeigen bei diesen Oberflächenmaterialien die gleichen Effekte.

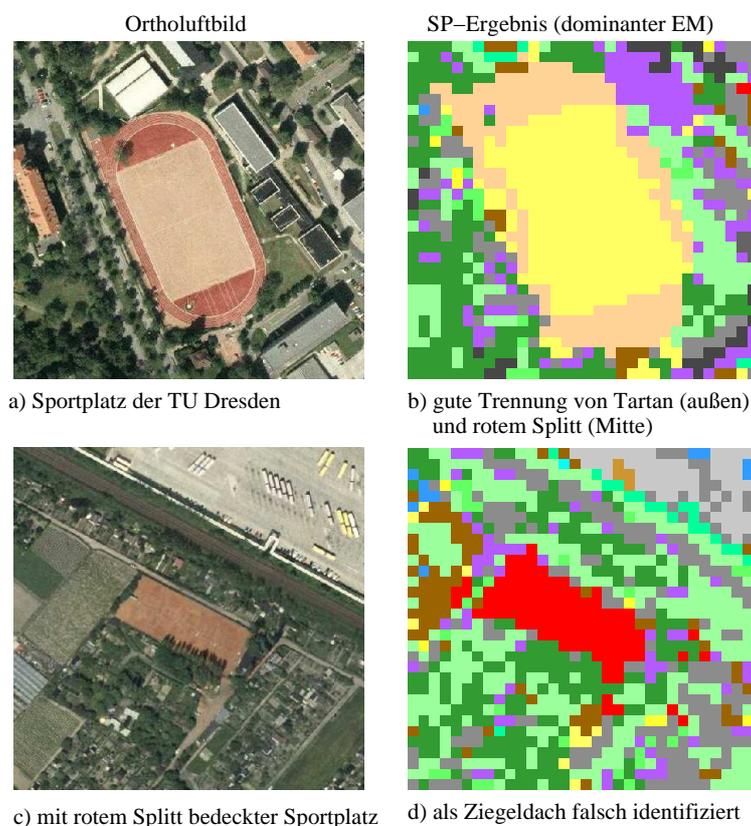


Abbildung 6.6: Trennung von spektral ähnlichen Dach- und Freiflächen unter Berücksichtigung der Form (Legende der Entmischungsergebnisse siehe Abb. 5.5)

Die Treffergenauigkeit von Beton ist in beiden Ergebnissen sehr gering. Dies zeichnete sich bereits in der Gesamtflächenstatistik ab. Die Gründe liegen in der sehr schmalen und kleinen Erscheinung der Betonflächen. Es handelt sich meist um Gehwege, die vom HyMap-Sensor nicht als spektral reine Pixel abgebildet werden konnten. Die kleinen Objekte erhöhen den Einfluss der PSF (*point spread function*) und benachbarter Oberflächenmaterialien, die in das Gesichtsfeld des Sensors einstrahlen (siehe Abschnitt 4.4). Dies erschwert auch die Definition von Trainingsgebieten. Für das Untersuchungsgebiet in Dresden konnte nur ein Trainingsgebiet für Beton bestimmt werden, welches die spektrale Variabilität des Betons nicht abdeckt. Zusätzlich zu diesen technisch bedingten Effekten kommen die realen Erscheinungen in der Stadt. Die Gehwege sind oft in der Nähe von Gebäuden, wodurch sie zum Teil beschattet sind. Desweiteren werden sie häufig von Laubbäumen gesäumt, was zu Überdeckungen der Gehwege führt. Diese Erscheinungen erklären die vorwiegenden Verwechslungen mit dunklen Freiflächenmaterialien, wie z.B. Asphalt und Bitumen (Abb. A.3 und A.4). Weiterhin wurden auf den Betonflächen Schatten (beide Ergebnisse 3.7%) und Laubgehölze (SP-Ergebnis: 16.0%; EX-Ergebnis: 12.0%) identifiziert.

Nadelgehölze wurden auf verschiedenen Oberflächenmaterialien wie z.B. Bitumen, Kopfsteinpflaster, Laubgehölzen und vor allem Rasen identifiziert. In Abschnitt 4.4 wurde bereits die spektrale Ähnlichkeit zwischen beschatteten Laubgehölzen und Nadelgehölzen beschrieben. Dieses Phänomen spiegelt sich auch in beiden Entmischungsergebnissen wieder. In den Referenzdaten wurden keine Schattenflächen berücksichtigt. Dennoch wird das spektrale Signal eines Baumes durch die Schattenbereiche in der Krone beeinflusst. Desweiteren wurden die von den Bäumen beschatteten Rasenflächen als Nadelgehölze fehlidentifiziert. Für eine realistischere Einschätzung der Treffergenauigkeit wäre die Erfassung der beschatteten Vegetationsflächen in den Referenzdaten nötig. Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmegeometrien der den Referenzdaten (Ortholuftbilder) und den Entmischungsergebnissen (HyMap-Bilddaten) zugrundeliegenden Daten sind jedoch die Schattenwürfe unterschiedlich und können folglich nicht verglichen werden.

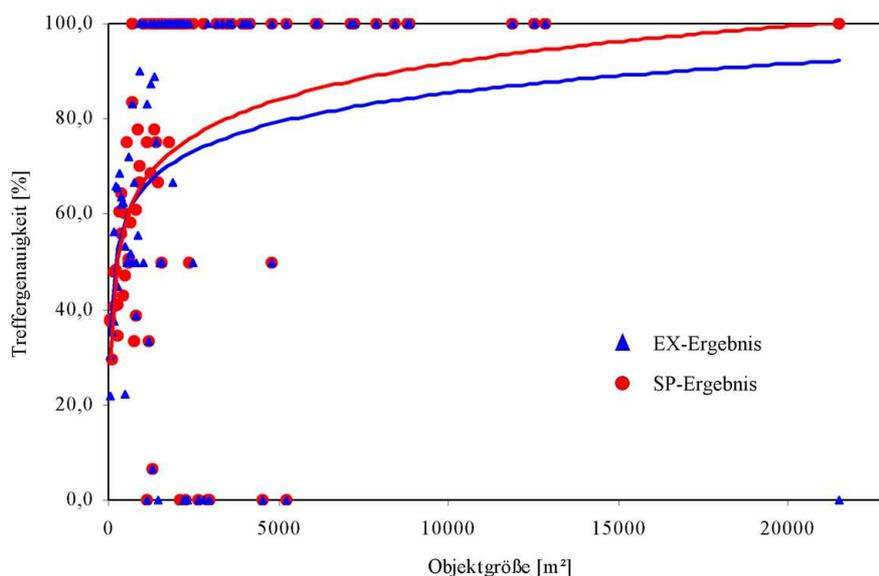


Abbildung 6.7: Zusammenhang zwischen Treffergenauigkeit und Objektgröße

Die dargestellten Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse zeigen deutlich, dass die Objektgröße einen erheblichen Einfluss hat. Daher wurde der Zusammenhang zwischen der Objektgröße und der Treffergenauigkeit näher untersucht. Die Ergebnisse für beide Entmischungsergebnisse sind in

Abbildung 6.7 dargestellt. Daraus ist ein deutlicher Anstieg der Treffergenauigkeit mit der Objektgröße zu erkennen. Der Ausschluss aller Objekte, welche kleiner als 6 Pixel (ca. 1300m²) sind, führte zu wesentlich besseren Resultaten. Im SP-Ergebnis wurden 63.5% aller Objekte getroffen und im EX-Ergebnis 64.5%.

Beide Ansätze zeigen Vor- und Nachteile. Für die weitere stadtökologische Analyse wird das Entmischungsergebnis, welches mit der spektralen Gebäudemasken (SP-Ergebnis) erzeugt wurde, ausgewählt. Die HyMap-Bilddaten enthalten ausreichend viele spektrale Informationen zur Detektion von Dachmaterialien auf der Basis ihrer spektralen Reflexionssignaturen und zur Trennung von Dach- und Freiflächenmaterialien. Der Einsatz externer Daten ist daher nicht nötig. Zudem konnte die Identifizierung der Oberflächenmaterialien durch die Verwendung der externen Gebäudemasken nicht deutlich verbessert werden. Grund dafür sind hauptsächlich die starken lokalen Verzerrungen der HyMap-Bilddaten.

Charakterisierung städtischer Biotope

In diesem Kapitel wird das Informationspotential der fernerkundlichen Ergebnisse für die ökologische Charakterisierung von städtischen Biotopen an einer Reihe von Untersuchungen demonstriert. Die Biotope werden mit Hilfe neuer quantitativer Maße charakterisiert. Diese Maße umfassen die materielle Ausstattung der Biotope und daraus abgeleitete quantitative Parameter, welche die Versiegelung, die Bebauung bzw. die Vegetation beschreiben. Grundlage dafür bilden die auf der Basis der HyMap-Daten weitgehend automatisch ermittelten Oberflächenmaterialien (siehe Kapitel 5).

In Abschnitt 7.1 werden die verwendeten GIS-basierten Methoden vorgestellt. Die neue, durch die fernerkundlichen Ergebnisse erweiterte Datenbasis der Stadtbiotopkartierung wird am Beispiel von zwei Biotopen in Abschnitt 7.2 dargestellt. Abschnitt 7.3 umfasst die Untersuchung der Aussagekraft der quantitativen Parameter zur Zustandsbeschreibung der städtischen Biotope. Abschließend werden in Abschnitt 7.4 exemplarisch zwei problemorientierte Analysen zur Charakterisierung städtischer Biotope durchgeführt.

7.1 Methodik

Zur Erfassung der Anteile der Oberflächenmaterialien für jedes Biotop werden die fernerkundlichen Ergebnisse in das GIS der Stadtbiotopkartierung integriert (Abschnitt 7.1.1). Dies bildet die Grundlage für die GIS-basierte Auswertung, welche die Ableitung quantitativer Parameter (Abschnitt 7.1.2) sowie die Darstellung in Kartenform und andere Analysen beinhaltet (Abschnitt 7.1.3).

7.1.1 Datenintegration

Zur Integration der Oberflächenmaterialien in das GIS der Stadtbiotopkartierung von Dresden müssen die gerasterten fernerkundlichen Ergebnisse und die vektoriellen Biotope in ein einheitliches Datenformat überführt werden. Dies erfolgt durch Rasterung der Biotope. Damit ist die Grundlage für eine statistische Erhebung der Oberflächenmaterialien innerhalb der Biotope geschaffen. Die prozentualen Anteile der Oberflächenmaterialien werden in einer Tabelle gespeichert und in das vektorielle GIS der Stadtbiotopkartierung integriert.

Für jedes Oberflächenmaterial existiert ein Grauwertbild, in dem die prozentualen Flächenanteile pixelweise gespeichert sind. In der Datenbank der vektoriellen Stadtbiotopkartierung sind für jedes Biotop eine Identifikationsnummer (ID) und mehrere Merkmale in Form von Attributen in einer Tabelle gespeichert (Abb. 7.1a). Zur Überführung der beiden Datensätze in ein einheitliches Format werden die Vektoren der Stadtbiotopkartierung in der räumlichen Auflösung des

HyMap-Datensatzes von 6m gerastert. Es entsteht ein kontinuierliches Bild, dessen Pixelwerte die ID der gerasterten Biotope darstellen. Liegt ein Pixel auf der Grenze zwischen zwei Biotopen, erhält es die ID des flächenmäßig am stärksten vertretenen Biotops. Die Biotope sind durch die ID voneinander abgrenzbar. Dies ermöglicht die Durchführung statistischer Analysen mit eindeutigem Bezug auf jedes Biotop. Über die ID sind die gerasterten Biotope mit der vektoriellen Datenbank der Stadtbiotopkartierung verknüpfbar. Da sowohl der Datensatz der Oberflächenmaterialien als auch der Stadtbiotopkartierung georeferenziert wurden, sind nun im Rahmen des GIS mathematische Operationen zwischen beiden Datensätzen möglich.

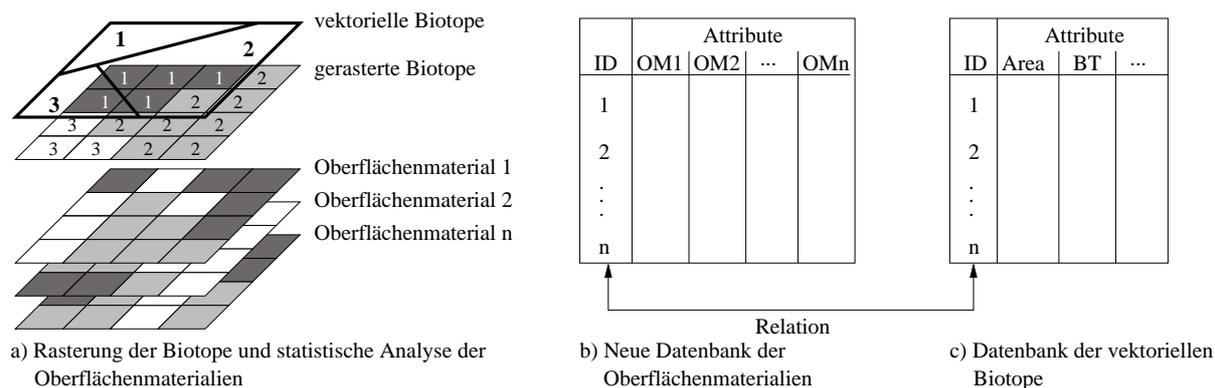


Abbildung 7.1: Verknüpfung der Oberflächenmaterialien mit den Stadtbiotopen über Attributtabelle

Innerhalb einer Biotopfläche, welche sich aus der Anzahl von Pixeln mit der gleichen ID definiert, wird der prozentuale Flächenanteil eines Oberflächenmaterials (OM) errechnet. Die Ergebnisse werden in einer neuen Tabelle gespeichert. Die Tabelle enthält die ID des jeweiligen Biotops und seine dazugehörigen Anteile der Oberflächenmaterialien (Abb. 7.1b). Diese wird abschließend über die ID mit der Tabelle der vektoriellen Biotope verknüpft (Abb. 7.1c). Ergebnis ist eine um die prozentualen Flächenanteile der Oberflächenmaterialien erweiterte Datenbank der vektorisierten Stadtbiotopkartierung.

7.1.2 Ableitung quantitativer Parameter

Zur Zustandsbeschreibung städtischer Biotope wurden die folgenden Parameter ausgewählt.

- ungewichteter Versiegelungsgrad (VG_{ug})
- gewichteter Versiegelungsgrad (VG_g)
- Bebauungsgrad (BBG)
- Überschildungsgrad (ÜG)
- Vegetationsflächengrad (VDG)
- Gesamtvegetationsgrad (GVG)

Alle quantitativen Parameter wurden für jedes Biotop auf der Basis der in der neuen Datenbank abgespeicherten Oberflächenmaterialien erhoben und in der Datenbank der Stadtbiotopkartierung als weitere Attribute abgespeichert. Die Bedeutung der quantitativen Parameter für eine stadttökologische Zustandsbeschreibung wurde in Abschnitt 2.5 dargelegt. Im

Folgendes wird ihre Berechnung auf der Basis der fernerkundlich erfassten Oberflächenmaterialien näher erläutert. Die Schattenanteile und die in der fernerkundlichen Analyse als zurückgewiesen ausgegebenen Flächen wurden von der Berechnung ausgeschlossen. Die Bezugsflächen stellen die Flächen der städtischen Biotop dar.

Der **ungewichtete Versiegelungsgrad** (VG_{ug}) gibt den prozentualen Anteil der teil- und vollversiegelten Flächen einschließlich der bebauten Flächen an, bei denen von einer 100%igen Versiegelung ausgegangen wird. Er wird entsprechend der Gleichung 7.1 errechnet.

$$VG_{ug} = \frac{\sum \text{voll- und teilversiegelte Fläche}}{\text{Bezugsfläche}} * 100\% \quad (7.1)$$

Beim **gewichteten Versiegelungsgrad** (VG_g) werden die teil- und vollversiegelten Flächen entsprechend ihrer Versickerungsleistungen gewichtet. Die entsprechenden Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 7.1 aufgelistet. Sie wurden in Zusammenarbeit mit dem Grünflächenamt Dresden festgelegt und beruhen auf der Basis der mittleren Abflussbeiwerte der [ATV-DVWK-A-138 \(2002\)](#). Der gewichtete Versiegelungsgrad wird nach der Gleichung 7.2 errechnet.

$$VG_g = \frac{\sum [(\text{voll- und teilversiegelte Fläche}) * (\text{Bodenkennwert})]}{\text{Bezugsfläche}} * 100\% \quad (7.2)$$

Tabelle 7.1: Modifizierte Bodenkennwerte zur Gewichtung des Versiegelungsgrades auf der Grundlage der Abflussbeiwerte der [ATV-DVWK-A-138 \(2002\)](#)

Oberflächenmaterial	Bodenkennwert
Dachmaterialien	1.0
Vollversiegelte Freiflächen	1.0
Teilversiegelte Freiflächen	
- Betonpflaster	0.75
- Kopfsteinpflaster	0.65
- Splittflächen (wassergebundene Decken)	0.45
Vegetation	0.0
Offene Freiflächen	0.0
Schatten	Flächen gehen nicht in die Berechnung ein

Der **Bebauungsgrad** (BBG) drückt das Verhältnis von bebauter zu unbebauter Fläche aus. In den hyperspektralen Daten werden die Gebäude über ihre Dachmaterialien erfasst. Demnach entspricht die Summe aller Dachmaterialien der bebauten Fläche. Der Bebauungsgrad wird nach der Gleichung 7.3 berechnet.

$$BBG = \frac{\sum \text{bebaute Fläche}}{\text{Bezugsfläche}} * 100\% \quad (7.3)$$

Zur Beschreibung der Vegetation werden drei Parameter verwendet, die zusammen betrachtet Aussagen zur strukturellen Erscheinung der Vegetation ermöglichen. Der **Überschirmungsgrad** ($\ddot{U}G$) beschreibt das Verhältnis aus vegetationüberschirmter Freifläche zur Bezugsfläche. Zur überschirmenden Vegetation gehören Bäume und Sträucher. Der Überschirmungsgrad wird nach der Gleichung 7.4 berechnet.

$$\ddot{U}G = \frac{\sum \text{vegetationsüberschirmte Freifläche}}{\text{Bezugsfläche}} * 100\% \quad (7.4)$$

Der **Vegetationsdeckungsgrad (VDG)** bestimmt das Verhältnis aus vegetationsbedeckter Freifläche zur Bezugsfläche. Die vegetationsbedeckten Freiflächen umfassen Rasen, Wiesen, vegetationsbestandene Äcker und Brachen. Der VDG wird nach Gleichung 7.5 berechnet.

$$VDG = \frac{\sum \text{vegetationsbedeckte Freifläche}}{\text{Bezugsfläche}} * 100\% \quad (7.5)$$

Eine Zusammenfassung finden der ÜG und der VDG im **Gesamtvegetationsgrad (GVG)**. Darin wird das Verhältnis aller vegetationsbestandenen Flächen zur Bezugsfläche ausgedrückt. Der GVG wird nach der Gleichung 7.6 berechnet.

$$GVG = \frac{\sum \text{Vegetationsfläche}}{\text{Bezugsfläche}} * 100\% \quad (7.6)$$

7.1.3 GIS-basierte Auswertung

Grundlage der Analysen ist die um die Oberflächenmaterialien und die quantitativen Parameter erweiterte Datenbank der Stadtbiotopkartierung. Wichtigste Voraussetzung für deren GIS-basierte Auswertung ist die Selektion von Daten nach Merkmalen mit Hilfe von Operatoren, wie z.B. AND, OR, LIKE, > und <. Damit besteht die Möglichkeit, Datenmengen problemorientiert zu gruppieren und zu analysieren. Diese Funktion wird genutzt, um eine bestimmte Datenmenge sowohl in der Karte darzustellen und zu interpretieren, als auch statistisch zu analysieren.

Wichtiger Bestandteil der Auswertung fernerkundlich erhobener Daten ist die räumliche Analyse der quantitativen Parameter in Karten. Die Art und Verteilung der quantitativen Parameter können einen wesentlichen Beitrag zur ökologischen Bewertung städtischer Räume liefern. Dabei spielen besonders die räumlichen Kriterien Größe und Anordnung eine außerordentliche Rolle (Bastian & Schreiber, 1999). Die visuelle Auswertung ermöglicht das Erkennen der räumlichen Zusammenhänge zwischen Biotopen und die Art und Stärke ihrer gegenseitigen Beeinflussung.

Die statistische Analyse dient der Bewertung der Aussagekraft der quantitativen Parameter für die Biotoptypen bezüglich ihrer Merkmale. Dabei werden die Mittelwerte der quantitativen Parameter für die Biotope eines Typs errechnet. Der Vergleich der gemittelten Parameter verschiedener Biotoptypen ermöglicht die Ableitung biotopspezifischer Merkmale. Die Schwankungen dieser Merkmale zwischen den Biotopen eines Typs werden mit der Berechnung der Standardabweichung σ abgeschätzt, wonach Aussagen zur Heterogenität bzw. Homogenität des Biotoptyps möglich sind. Die weitere Untersuchung der Heterogenität eines Parameters wird durch das Histogramm visualisiert. Aus dieser Darstellung sind wichtige Aussagen zur Verteilung des Parameters ableitbar.

Aufgrund der räumlichen Auflösung der HyMap-Daten sind der Erfassung und statistischen Analyse der Oberflächenmaterialien bezüglich der Biotope Grenzen gesetzt. Deshalb werden nur die Biotope zur Auswertung verwendet, die eine bestimmte Größe und Verhältnis von Fläche und Umfang haben. Die Grenzwerte dazu wurden empirisch erhoben. Danach werden alle Biotope, die kleiner als 330m² sind (entspricht einer 3X3 Pixel-Umgebung) und ein kleineres Fläche-Umfang Verhältnis als 3.5 haben, von den statistischen Analysen durch Vergabe eines Zusatzattributes ausgeschlossen. Mit dieser Kennzeichnung können diese Biotope von den anderen separiert werden. Damit werden im Untersuchungsgebiet 1114 Biotope von insgesamt 7350 ausgeschlossen, die ausgeschlossenen Biotope entsprechen 1.38% der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes. Darunter befinden sich vor allem Biotope der Kleingehölze und Büsche sowie der Gewässer und deren Uferzonen.

7.2 Darstellung der erweiterten Datenbasis

Für nahezu alle Biotope der Stadtbiotopkartierung Dresden innerhalb des Untersuchungsgebietes wurden die prozentualen Flächenanteile ihrer Oberflächenmaterialien erfasst. Darüberhinaus wurden für diese Biotope die in Abschnitt 7.1.2 dargestellten quantitativen Parameter zur Zustandsbeschreibung errechnet. Die Ergebnisse wurden direkt in das GIS der Stadtbiotopkartierung integriert. Damit wurde eine erweiterte Datenbasis für stadtoökologisch orientierte Analysen geschaffen. In Tabelle 7.2 sind an zwei Beispielbiotopen die Merkmale aus der Stadtbiotopkartierung sowie die aus den Hyperspektraldaten abgeleiteten quantitativen Merkmale aufgelistet.

Tabelle 7.2: Erweiterte Datenbank der Stadtbiotopkartierung Dresdens

Merkmale	Biotop 1	Biotop 2
Biotop im Ortholuftbild		
Merkmale (aus der Stadtbiotopkartierung)		
Biototyp	BB - Blockrand- und Zeilenbebauung	BA - Einzel- und Reihenhausbebauung
Strukturmerkmal	e - vegetationsarme und -lose Flächen	a - reich strukturierte Gärten und Anlagen mit hohem Anteil meist alter und wertvoller Laubgehölze; Koniferen und Zierrasen nur untergeordnet; großflächig mit parkähnlichem Charakter; meist alte Villengärten
Versiegelungsgrad	80-100%	40-60%
Materielle Ausstattung (aus HyMap-Daten)		
prozentuale Flächenanteile der der Oberflächenmaterialien in [%]	57 Ziegel (Dach) 1 Alu (Dach) 4 Zink (Dach) 15 Asphalt 1 rotes Betonpflaster 2 roter Splitt 2 Baum 3 Rasen 6 Sand 9 Andere	19 Ziegel (Dach) 3 Bitumen (Dach) 2 Zink (Dach) 14 Asphalt 2 Kopfsteinpflaster 2 roter Splitt 39 Baum 7 Rasen 7 Sand 5 Andere
Quantitative Parameter in [%] (aus HyMap-Daten)		
ungewichteter Versiegelungsgrad	89	45
gewichteter Versiegelungsgrad	87	43
Bebauungsgrad	62	25
Überschirmungsgrad	9	41
Vegetationsdeckungsgrad	5	9
Gesamtvegetationsgrad	12	48

Das Biotop der Blockrand- und Zeilenbebauung wurde im Rahmen der Stadtbiotopkartierung als vegetationsarmer bzw. -loser Lebensraum mit einer sehr hohen Versiegelung von 80-100% charakterisiert. Dies kann mit den aus den HyMap-Daten abgeleiteten Ergebnissen quantitativ untermauert werden. Demnach ist das Biotop zu 89% versiegelt. Der gewichtete Versiegelungsgrad zeigt zudem, dass der Einfluss von teilversiegelten Oberflächen relativ gering ist (VG_g 87%). Der Gesamtvegetationsgrad von 12% bestätigt, dass es sich um ein vegetationsarmes Biotop handelt. Das Biotop hat einen hohen Bebauungsgrad von 62% und wird von mit Ziegeln (57%) gedeckten Gebäuden dominiert. Der Anteil von Asphalt muss als leicht überschätzt eingestuft werden. Grund dafür sind spektrale Verwechslungen der vielen Schattenbereiche mit Asphalt (siehe Abschnitt 6.4).

Das Biotop der Einzel- und Reihenhausbebauung ist im Rahmen der Stadtbiotopkartierung wesentlich günstiger beschrieben worden. Danach ist es durch einen sehr hohen Anteil an wertvollen und alten Laubgehölzen und eine Versiegelung zwischen 40-60% charakterisiert. Diese Angaben lassen sich durch die fernerkundlichen Ergebnisse bestätigen. Der ungewichtete Versiegelungsgrad beträgt 45% und der Überschildungsgrad 41%. Die bebauten Fläche wird von mit Ziegeln (19%) gedeckten Gebäuden dominiert, es werden jedoch auch Bitumen und Zink als Dachmaterialien eingesetzt. Der Bebauungsgrad von 25% ist charakteristisch für diesen Biotoptyp. Zum Teil sind die Gärten dieses Biotops mit Rasenflächen durchsetzt (7%). Jedoch ist ein höherer Anteil an deckender Vegetation anzunehmen, da viele Bereiche durch Bäume verdeckt werden.

Aufgrund der räumlichen Auflösung der HyMap-Daten sind der Erfassung und statistischen Analyse der Oberflächenmaterialien bezüglich der Biotope Grenzen gesetzt. Dies betrifft insbesondere kleine und schmale Biotope, die nur von wenigen bzw. keinen Pixeln vollständig abgedeckt sind. Eine hohe Genauigkeit der für diese Biotope erfassten Oberflächenmaterialien kann aufgrund lokaler geometrischer Versätze zwischen der Stadtbiotopkartierung und den HyMap-Bilddaten nicht garantiert werden. Deshalb werden nur Biotope zur Auswertung verwendet, die eine bestimmte Größe und ein bestimmtes Verhältnis von Fläche und Umfang haben. Die Grenzwerte dazu wurden empirisch erhoben. Alle Biotope, die kleiner als 330m^2 sind (entspricht einer 3×3 Pixel-Umgebung) oder ein kleineres Fläche-Umfang-Verhältnis als 3.5 haben, werden von den statistischen Analysen ausgeschlossen. Durch die Vergabe eines Zusatzattributes werden diese Biotope von den anderen separiert. Damit sind im Untersuchungsgebiet 1114 Biotope von insgesamt 7350 ausgeschlossen, die einer Gesamtfläche von 1.4% des Untersuchungsgebietes entsprechen. Darunter befinden sich vor allem Biotope der Kleingehölze und Büsche sowie der Gewässer und deren Uferzonen.

7.3 Quantitative Parameter

In diesem Abschnitt wird die Aussagekraft der quantitativen Parameter für eine Charakterisierung der städtischen Biotope genauer untersucht. Zuerst wird die Genauigkeit des visuell geschätzten Versiegelungsgrades aus der Stadtbiotopkartierung mit dem Versiegelungsgrad, der auf der Basis der HyMap-Daten errechnet wurde, verglichen (Abschnitt 7.3.1). Daran schließt sich eine räumliche Analyse der in Karten dargestellten quantitativen Parameter im Untersuchungsgebiet (Abschnitt 7.3.2). In Abschnitt 7.3.3 wird die Aussagekraft der quantitativen Parameter durch statistische Analysen beurteilt.

7.3.1 Der Versiegelungsgrad im Vergleich

In der Stadtbiotopkartierung Dresden ist der Versiegelungsgrad der einzige quantitative Parameter, der entsprechend seines Anteils an voll- und teilversiegelten Flächen auf einer fünfstufigen Skala für jedes Biotop visuell geschätzt wird (VG_{MAN}). Im Vergleich dazu steht der ungewichtete Versiegelungsgrad, welcher auf der Basis der fernerkundlich erfassten Oberflächenmaterialien errechnet wurde (VG_{HYMAP}). Beide Versiegelungsgrade werden anhand ihrer Qualität abgeschätzt. In Karte B.5 sind sie vergleichend für das Untersuchungsgebiet abgebildet. Desweiteren wird abschließend die Bedeutung des gewichteten gegenüber dem ungewichteten Versiegelungsgrad an einem Beispiel demonstriert.

Tabelle 7.3: Versiegelungsgrade (VG) im Vergleich

Nr.	Biotop- typ	Fläche [m ³]	VG_{MAN} [%]	VG_{BTK} [%]	Übereinstimmung zwischen VG_{MAN} u. VG_{BTK}	VG_{HYMAP} [%]	abs. Differenz $VG_{MAN} - VG_{HYMAP}$ [%]
1	BA	2006	28.5	40-60		30.2	1.7
2	BB	16077	56.4	60-80		62.3	6.0
3	BB	14161	69.1	60-80	x	50.7	18.4
4	BB	7860	81.6	80-100	x	89.1	7.5
5	BB	6964	37.4	60-80		36.0	1.4
6	BB	7851	31.3	40-60		53.6	22.3
7	BB	25717	31.4	40-60		28.7	2.6
8	BB	28359	30.8	40-60		28.3	2.6
9	BB	5994	32.7	20-40	x	47.4	14.6
10	BC	21690	51.1	40-60	x	53.2	2.1
11	BC	6791	60.9	60-80	x	66.6	5.7
12	BC	3546	74.7	60-80	x	75.6	0.9
13	BC	2080	30.9	40-60		43.4	12.5
14	CA	9399	67.5	80-100		68.9	1.5
15	CA	17665	26.9	60-80		37.8	10.9
16	CA	5486	72.2	80-100		67.1	5.1
17	CB	71616	92.3	80-100	x	87.4	5.0

Zur Abschätzung der Qualität des VG_{HYMAP} dient ein auf der Basis des manuell klassifizierten Referenzdatensatzes erhobener Versiegelungsgrad VG_{MAN} . Der Referenzdatensatz wurde bereits für die Genauigkeitsanalyse in Kapitel 6 eingesetzt und gilt als „Wahrheit“. Zur Erhebung des VG_{MAN} wurden zuerst die im Referenzdatensatz enthaltenen Oberflächenmaterialien für jedes Biotop bestimmt. Dazu wurden sowohl der Referenzdatensatz als auch die von ihm abgedeckten Biotope in einer Auflösung von 0.5m gerastert und entsprechend der in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Methode analysiert. Die resultierenden prozentualen Flächenanteile der Oberflächenmaterialien wurden zur Errechnung des ungewichteten Versiegelungsgrades VG_{MAN} entsprechend der Gleichung 7.1 genutzt.

Für den Vergleich wurden alle Biotope der in den Referenzgebieten liegenden Einzel- und Reihenhausbauung (BA), der Blockrand- und Zeilenbauung (BB), der Großform- und Hochhausbauung (BC), der Gewerbeflächen (CA) und der Industrieflächen (CB) ausgewählt. Damit wurden insgesamt 17 Biotope für den Vergleich berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.3 dargestellt. Die Versiegelungsgrade VG_{MAN} und VG_{BTK} stimmen dann überein, wenn die VG_{MAN} von den Intervallen der fünfstufigen Skala des VG_{BTK} abgedeckt werden. Die Übereinstimmung zwischen VG_{MAN} und VG_{HYMAP} wird durch die absolute Differenz abgeschätzt.

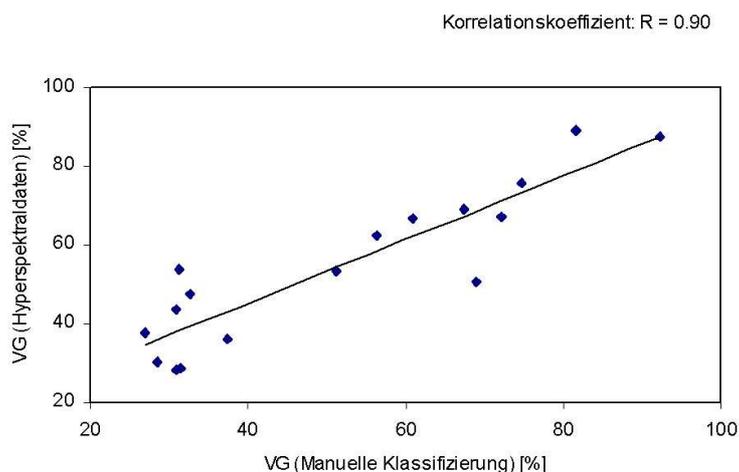


Abbildung 7.2: Zusammenhang zwischen den Versiegelungsgraden auf der Basis der manuellen Klassifizierung (VG_{MAN}) und der HyMap-Daten (VG_{HYMAP})

In Betrachtung der untersuchten Biotope ist der VG_{HYMAP} verlässlicher als der VG_{BTK} einzuschätzen. Von den 17 erhobenen Biotopen stimmen nur 7 Versiegelungsgrade der manuellen Klassifizierung (VG_{MAN}) mit denen aus der Biotopkartierung (VG_{BTK}) überein. Der Vergleich von VG_{MAN} mit VG_{HYMAP} zeigt in nur 5 Fällen eine Abweichung von über 10%, wobei der Biotop Nr. 6 die größte Abweichung mit 22.3% aufweist. Aufgrund der hohen Reflexion der Dachmaterialien in diesem Biotop, kam es infolge der Überstrahlung der benachbarten Pixel zu einer scheinbaren Vergrößerung der Gebäude und damit zur erhöhten Identifizierung versiegelter Oberflächen. Die Theorie des Überstrahleffektes wurde in Abschnitt 4.4 detailliert beschrieben. Demnach weichen die VG_{HYMAP} der restlichen 12 Biotope nur um durchschnittlich 3.5% ab. Der statistische Zusammenhang zwischen dem VG_{MAN} und VG_{HYMAP} wurde in der Abbildung 7.2 dargestellt. Der Zusammenhang wurde mit einem Korrelationskoeffizient von 0.9 bestätigt. Die Genauigkeit des fernerkundlich erfassten Versiegelungsgrades im gesamten Untersuchungsgebiet wird ebenfalls als hoch eingeschätzt. Auf der Basis der CIR-Luftbilder ist eine Abschätzung des Versiegelungsgrades schwierig, da eine Unterscheidung von versiegelten und unversiegelten vegetationslosen Flächen nicht gesichert möglich ist.

Zusätzlich zum ungewichteten Versiegelungsgrad wurde aus den fernerkundlich erfassten Oberflächenmaterialien der gewichtete Versiegelungsgrad errechnet (Gleichung 7.2). Er spiegelt den Einfluss teilversiegelter Oberflächen, die im Biotop verbaut wurden, wieder. Dies wird an einem Beispiel demonstriert. Der ungewichtete Versiegelungsgrad (HyMap) eines Biotops¹ des Typs EF (vegetationsfreie und -arme Flächen der Grünanlagen) beträgt 76%. Der gewichtete Versiegelungsgrad hat einen Wert von 58%. Damit wird deutlich, dass der Anteil der teilversiegelten Flächen einen erheblichen Einfluss auf die Versickerungsfähigkeit des Biotops haben. Im Biotop wurde auf der Basis der Hyperspektraldaten 44% Splittflächen identifiziert. Es handelt sich um einen Sportplatz, der mit dunklem Splitt und Schotter bedeckt ist.

7.3.2 Räumliche Analyse

Für die räumliche Analyse der quantitativen Parameter wurden diese für das Untersuchungsgebiet kartographisch in den räumlichen Einheiten der Biotope dargestellt (Karten B.6 bis B.10).

¹ID: 3673

Die quantitativen Parameter liefern Informationen zu Vegetationsstrukturen (Gesamtvegetationsgrad, Überschirmungsgrad und Vegetationsdeckungsgrad) und zu den baulichen Strukturen (Bebauungsgrad und Versiegelungsgrad). Für eine übersichtliche Visualisierung wurden sie jeweils in 6 Stufen dargestellt. Die Parameter liegen jedoch als kontinuierliche Werte vor.

Die Dresdner Heide, die Elbe mit ihren Elbwiesen und der Große Garten weisen im Untersuchungsgebiet den niedrigsten Versiegelungsgrad, den niedrigsten Bebauungsgrad und den höchsten Gesamtvegetationsgrad auf. Aufgrund ihrer flächenhaften Ausdehnung stellen sie sowohl klimatische Entlastungsbereiche als auch potentielle Lebensstätten und Rückzugsräume für seltene und gefährdete Tier- und Pflanzenarten dar. Das Dresdner Industriegebiet ist durch eine sehr hohe Versiegelung, dichte Bebauung und geringe Vegetationsvorkommen gekennzeichnet. Damit ist eine erhöhte Gefahr des negativen Einflusses auf die angrenzenden ökologisch positiv bewerteten Gebiete, wie z.B. dem Prießnitzgrund und der Dresdner Heide, gegeben. Die Bedingungen dieses Einflusses werden genauer in Abschnitt 7.4.1 untersucht.

Ebenfalls hohe Versiegelungsgrade und hohe Bebauungsgrade sind im Wohngebiet Neustadt zu finden. Hier konzentrieren sich vor allem die Biototypen der Blockrandbebauung. Diese Art der Bebauung ist für die Ausbildung von Biotopverbunden aufgrund seiner kompakten Bauweise nicht geeignet. Dennoch können Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen der Innenhöfe zu einem besseren städtischen Mesoklima in diesen Stadtteilen führen. Dagegen weisen die Radeberger Vorstadt, Teile von Gruna und Zschernitz sowie Strehlen eine lockere Bebauung und hohe Vegetationsvorkommen auf. Der dominierende Biototyp ist dabei die Einzel- und Reihenhausbauung, der durch hohe Lebensqualität für Menschen, Tiere und Pflanzen gekennzeichnet ist.

In Striesen wird eine dichte Bebauung (BBG), erhöhtes Vorkommen von Bäumen (ÜG), jedoch geringes Vorkommen von Grünflächen (VDG) ausgewiesen. Dieser Stadtteil ist von einem Wechsel von Einzel- und Reihenhausbauung und Blockrand- bzw. Zeilenbebauung gekennzeichnet. Charakteristisch ist daher der Wechsel zwischen dichten Innenhofbegrünungen mit Bäumen und zahlreichen Gärten. Damit kann die hohe Dichte der Blockrandbebauung zum Teil kompensiert werden. Einen positiven Einfluss auf seine Umgebung und damit auch auf Striesen hat der Große Garten, welcher aufgrund seiner Ausdehnung ein Entlastungsbereich darstellt. Die Johannstadt und die Pirnaische Vorstadt sind von ihren Bautypen her sehr durchmischt. Dies zeigt sich sowohl im Bebauungsgrad als auch im Versiegelungsgrad und dem Gesamtvegetationsgrad.

7.3.3 Statistische Analyse

In der statistischen Analyse wird überprüft, ob sich die Eigenschaften der Biotope eines Typs anhand der quantitativen Parameter grundsätzlich ausdrücken lassen und wie stark diese Eigenschaften von Biotop zu Biotop schwanken.

Die Untersuchungen ergaben, dass die Mittelwerte der quantitativen Parameter die im Rahmen der Stadtbiotopkartierung vergebenen Eigenschaften sehr gut wiedergeben. Dennoch unterliegen diese Eigenschaften starken Schwankungen, was sich in der Standardabweichung der quantitativen Parameter ausdrückt und im Histogramm genauer visualisiert wurde. Die Ergebnisse deuten auf die Vielfalt der städtischen Biotope hin und verleihen der Bereitstellung der quantitativen Parameter für jedes einzelne Biotop eine hohe Bedeutung. Die Ergebnisse der statistischen Analyse werden im Folgenden an den am häufigsten im Untersuchungsgebiet vorkommenden Biototypen demonstriert.

Tabelle 7.4: Mittelwert μ und Standardabweichung σ der quantitativen Parameter für ausgewählte Biotoptypen

Biotoptyp (Anzahl)	gewichteter Versiegelungs- grad [%]		Bebauungs- grad [%]		Überschir- mungsgrad [%]		Vegetations- deckungs- grad [%]		Gesamt- vegetations- grad [%]	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
BA Einzel- und Reihen- hausbebauung (496)	38.3	18.9	12.4	11.4	44.0	18.1	18.0	10.3	59.4	19.0
BB Blockrand- und Zeilenbebauung (353)	52.1	19.8	25.0	12.4	32.9	14.3	21.7	11.1	48.9	18.6
BC Großform- und Hochhausbebauung (64)	58.1	17.6	23.9	13.7	25.3	11.7	29.1	11.6	45.6	16.7
CA Gewerbe- flächen (212)	57.7	20.3	15.8	14.9	24.2	17.3	13.9	9.1	35.0	19.8
CB Industrie- flächen (32)	61.9	14.3	17.5	14.4	17.5	10.9	8.5	4.3	23.8	12.0
EA Grünflächen mit geschl. Baumbestand (31)	6.4	14.4	0.0	0.1	84.3	15.0	9.6	8.0	93.3	13.5
EB Grünflächen mit w. Anteil an Gehölzen (116)	17.1	17.8	2.0	9.0	52.5	22.9	31.7	19.0	82.0	18.5
EC Scher- und Zierrasen (146)	16.2	18.7	1.8	4.6	27.9	22.7	55.8	20.9	81.9	19.2
EK Kleingarten- anlagen (127)	18.5	13.7	1.7	3.6	49.4	19.6	30.6	12.2	79.4	14.5

Die Einzel- und Reihenhausbebauung (BA) wird in der Stadtbiotopkartierung unter den Wohnbebauungstypen generell als am wertvollsten eingeschätzt. Grund dafür sind die kleinen Gebäude, die geringe Versiegelung und zahlreiche strukturierte Gärten. Diese Eigenschaften lassen sich statistisch anhand der quantitativen Parameter bestätigen. Der Versiegelungsgrad ist mit durchschnittlich 38% von allen bebauten Biotoptypen am geringsten und der Bebauungsgrad beträgt nur 12%. Der Gesamtvegetationsgrad ist mit 59% unter den bebauten Biotoptypen am höchsten, wobei die überschirmende Vegetation (ÜG) den größten Anteil hat. Diese Werte streuen dennoch sehr stark. In Abbildung 7.3a ist die Verteilung von drei Parametern dargestellt. Demnach ist der Bebauungsgrad ein relativ konstanter Parameter, während der Versiegelungsgrad und der Gesamtvegetationsgrad in den einzelnen Biotopen sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können.

Die Blockrand- und Zeilenbebauung (BB) ist gegenüber BA durch eine stärkere Bebauung und Versiegelung gekennzeichnet. Die Ausstattung mit Vegetation hängt dabei wesentlich von der Innenhofbegrünung der Blockrandbebauung ab. Die quantitativen Parameter bestätigen diese Merkmale. Die Versiegelung wird mit 52% und die Bebauung mit dem höchsten Grad von 25% eingeschätzt. Der Gesamtvegetationsgrad beträgt 49%, was auf relativen Vegetationsreichtum schließen lässt. Das Verhältnis von überschirmender und deckender Vegetation ist wesentlich ausgeglichener als bei BA. Bei Betrachtung der Verteilung der Parameter (Abb. 7.3b) zeigt sich, dass der Biotoptyp BB bezüglich der Bebauung sehr homogen ist. Die Versiegelung und die Vegetation dagegen variieren von Biotop zu Biotop sehr stark.

Im Biotoptyp der Großform- und Hochhausbebauung (BC) dominieren vor allem die hohen und großen Gebäude und die intensiv gepflegten Rasenflächen. Die quantitativen Parameter ähneln stark denen der Blockrand- und Zeilenbebauung. Trotz hoher Versiegelung (58%) und Bebauung (24%) findet sich in BC noch ein hoher Anteil an Vegetation (46%), insbesondere der deckenden

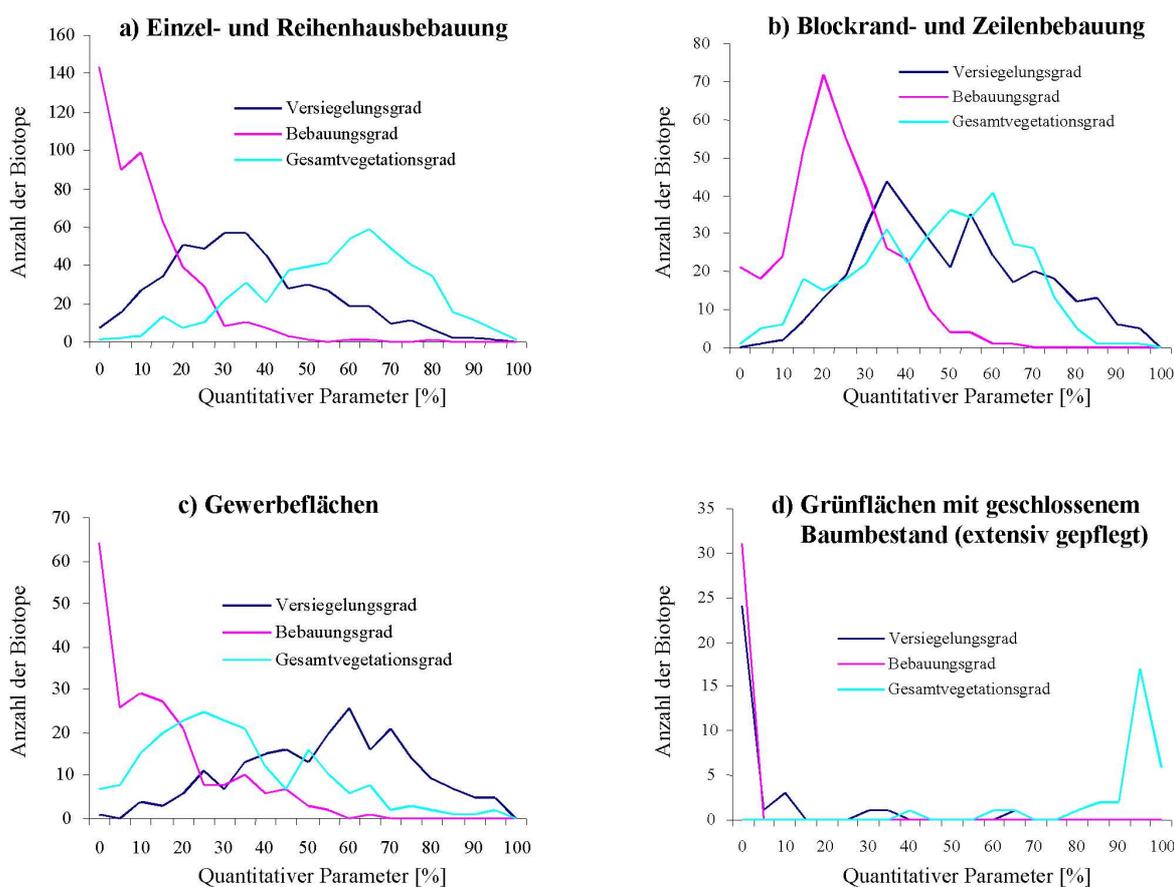


Abbildung 7.3: Verteilung des Versiegelungsgrades, des Bebauungsgrades und des Gesamtvegetationsgrades innerhalb ausgewählter Biotoptypen

Vegetation (VDG 29%), die den Anteil der intensiv gepflegten Grünflächen widerspiegelt. Daher sollte der im Vergleich zu den anderen Biotoptypen sehr hohe Gesamtvegetationsgrad bezüglich der ökologischen Bewertung nicht überschätzt werden.

Die Biotoptypen der Gewerbe- (CA) und Industrieflächen (CB) sind in der Stadtbiotopkartierung ökologisch von geringer Bedeutung, wofür die hohe Versiegelung und Bebauung verantwortlich ist. Die quantitativen Parameter bestätigen diese Eigenschaften. CA hat einen Versiegelungsgrad von 58% und CB von 62%. Die Verteilung des Versiegelungsgrades deutet auf die heterogen gestalteten Biotope der Gewerbeflächen hin (Abb. 7.3c). Die Vegetation ist bei beiden Biotoptypen wesentlich geringer als bei den Wohnbebauungstypen ausgebildet. Dennoch findet sich besonders in den Gewerbegebieten (CA) ein höherer ÜG von 24%. Im geringen VDG von 14% und dem GVG von 35% zeigt sich jedoch der geringe Anteil der Vegetation gegenüber den Wohnbebauungstypen. Der Biotoptyp CB ist durch einen noch geringeren GVG von 24% und vor allem durch den geringen VDG von 9% gekennzeichnet.

Der Biotoptyp EA beinhaltet Grünflächen mit geschlossenem Baumbestand. Dies drückt sich im hohen ÜG von 84% aus. Versiegelungsgrad und Bebauungsgrad sind erwartungsgemäß sehr gering. Die Biotope des Typs EA sind zudem sehr ähnlich ausgestattet (Abb. 7.3c und Abb. 7.4a). Der Biotoptyp EB repräsentiert Grünflächen mit wechselndem Anteil von Gehölzen. Die quantitativen Parameter bestätigen diese Eigenschaft mit einem wesentlich ausgeglicheneren

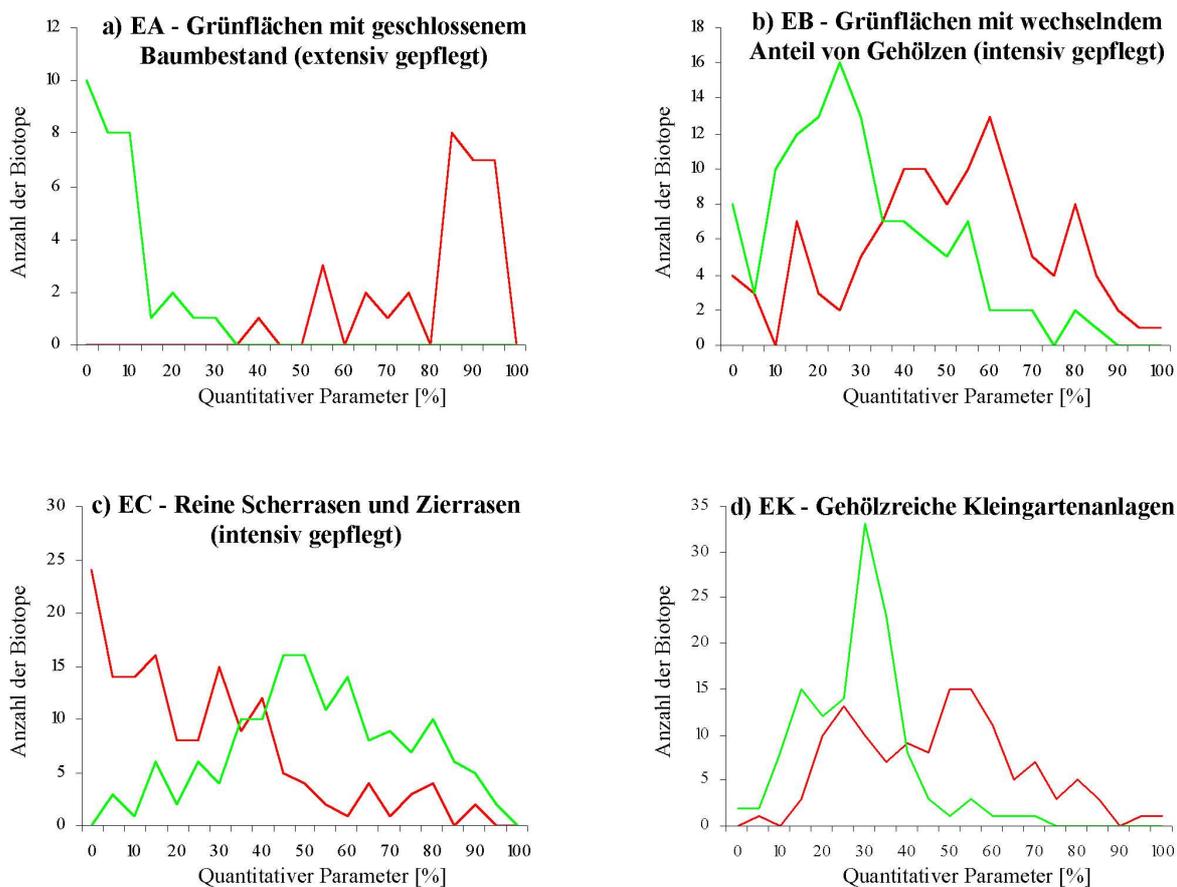


Abbildung 7.4: Verteilung des Überschirmungsgrades (rote Linie) und des Vegetationsdeckungsgrades (grüne Linie) innerhalb ausgewählter Biotoptypen

Verhältnis von hochstämmiger (ÜG 53%) und niedriger Vegetation (VDG 32%). Diese Eigenschaft wird auch bei Betrachtung der Verteilung der Parameter deutlich (Abb. 7.4b).

Die Bezeichnung des Biotoptyps EC (Reine Scher- und Zierrasen) deutet auf eine homogene Erscheinung hin. Dies kann durch den ÜG (28%) und den VDG (56%) nicht bestätigt werden. Auch die Verteilung dieser Parameter zeigt heterogene Tendenzen (Abb. 7.4c). Kontrollen dieser Biotope mit Hilfe von Ortholuftbildern ergaben, dass es sich tatsächlich meist um mit wenigen Bäumen bestandene Rasenflächen handelt. In diesem Biotoptyp repräsentiert sich die Vegetation demnach strukturierter als angenommen. Die Kleingartenanlagen EK sind durch einen ÜG von 49% und einen VDG von 31% gekennzeichnet. Nach der Verteilung dieser Parameter ist der Anteil der deckenden Vegetation relativ stabil innerhalb des Biotoptyps. Die überschirmende Vegetation ist dagegen von Schwankungen gekennzeichnet (Abb. 7.4d).

Die Standardabweichung zeigt besonders innerhalb der bebauten Biotoptypen teilweise sehr hohe Streuungen der Parameter. Dies war zu erwarten, da die Biotoptypen nicht nach ihren Strukturmerkmalen analysiert wurden. Daher wurden in der folgenden statistischen Analyse einige Biotoptypen getrennt nach ihren Strukturmerkmalen betrachtet, welche die unterschiedliche Ausstattung und Struktur der Biotope charakterisieren. Für die Biotoptypen der Einzel- und Reihenhausbebauung (BA) und der Blockrand- und Zeilenbebauung (BB), die über eine sehr hohe Standardabweichung verfügen, wird eine getrennte statistische Analyse für die Struk-

turnerkmale (SM) „c“ und „d“ durchgeführt. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Tabelle 7.5 zusammengestellt.

Tabelle 7.5: Quantitative Parameter für zwei Beispielbiototypen jeweils für die Strukturmerkmale (SM) c und d - Mittelwert μ und Standardabweichung σ

Biototyp	SM (Anzahl)	gewichteter Versiegelungs- grad [%]		Bebauungs- grad [%]		Überschir- mungsgrad [%]		Vegetations- deckungs- grad [%]		Gesamt- vegetations- grad [%]	
		μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Einzel- und Reihen- hausbebauung	c (238)	35.0	15.4	11.3	8.6	47.2	14.5	18.2	9.1	63.3	15.3
	d (133)	49.0	20.0	16.2	14.7	32.3	17.7	19.9	12.7	48.2	20.0
Blockrand - und Zeilenbebauung	c (124)	45.9	18.3	22.3	11.9	39.8	12.9	21.0	9.9	55.6	16.3
	d (194)	53.4	18.0	26.5	11.8	29.7	12.4	23.1	11.6	47.2	16.9

Das Strukturmerkmal „c“ beschreibt laut Biotopkartierschlüssel (Tabelle A.1) Flächen mit „durchschnittlichem Anteil von Laubgehölzen“ und „größeren Zierrasenflächen“. Dagegen werden Flächen „ohne ausgeprägten Baumbestand und vorherrschenden intensiv gepflegten Rasenflächen“ mit dem Strukturmerkmal „d“ charakterisiert. Tatsächlich sind die Mittelwerte des ÜG, welcher die Baumvorkommen charakterisiert, sowohl bei BA als auch bei BB für das SM „c“ wesentlich höher als beim SM „d“. Die Mittelwerte des VDG (Charakterisierung der Grünflächen) sind allerdings relativ ähnlich bei beiden Biototypen. Damit wird deutlich, dass auch die Biotope innerhalb dieser Gruppe sehr heterogen ausgestaltet sind.

7.4 Anwendungsbeispiele

In diesem Abschnitt werden zwei Beispiele zur problemorientierten Analyse der städtischen Biotope demonstriert. Dabei werden die fernerkundlich erhobenen quantitativen Parameter verwendet. In Abschnitt 7.4.1 wird der Zustand des Dresdner Industriegebietes im Norden des Untersuchungsgebietes charakterisiert. Anschließend werden in Abschnitt 7.4.2 besonders belastete Biotope untersucht.

7.4.1 Charakterisierung des Dresdner Industriegebietes

Das Dresdner Industriegebiet setzt sich aus einer Vielzahl gewerblich und industriell genutzter Flächen zusammen. Es liegt nördlich der Elbe und schließt sich westlich dem Prießnitzgrund und der Dresdner Heide an. Der Prießnitzgrund beinhaltet mehrere sehr sensible Biotope für Pflanzen und Tiere, wie z.B. Auenwälder und Bäche. Die Dresdner Heide ist ein großes zusammenhängendes Waldgebiet, das ähnlich dem Prießnitzgrund Rückzugsräume für Pflanzen und Tiere bereitstellt und für den Menschen wichtige Funktionen zur Verbesserung des Stadtklimas besitzt.

Es ist daher besonders wichtig, die Beeinflussung des industriell genutzten Dresdner Industriegebietes auf die ökologisch wertvollen angrenzenden Gebiete zu beurteilen. Dies erfolgt durch die Erfassung des Zustandes des Industriegebietes, wozu sowohl Informationen aus Kartierungen, wie z.B. der Biotopkartierung, genutzt werden, als auch detaillierte ökologische Aufnahmen vor Ort durchgeführt werden. Die auf der Basis der hyperspektralen HyMap-Daten erfassten quantitativen Parameter können diese Zustandsbeschreibung und die anschließende Bewertung

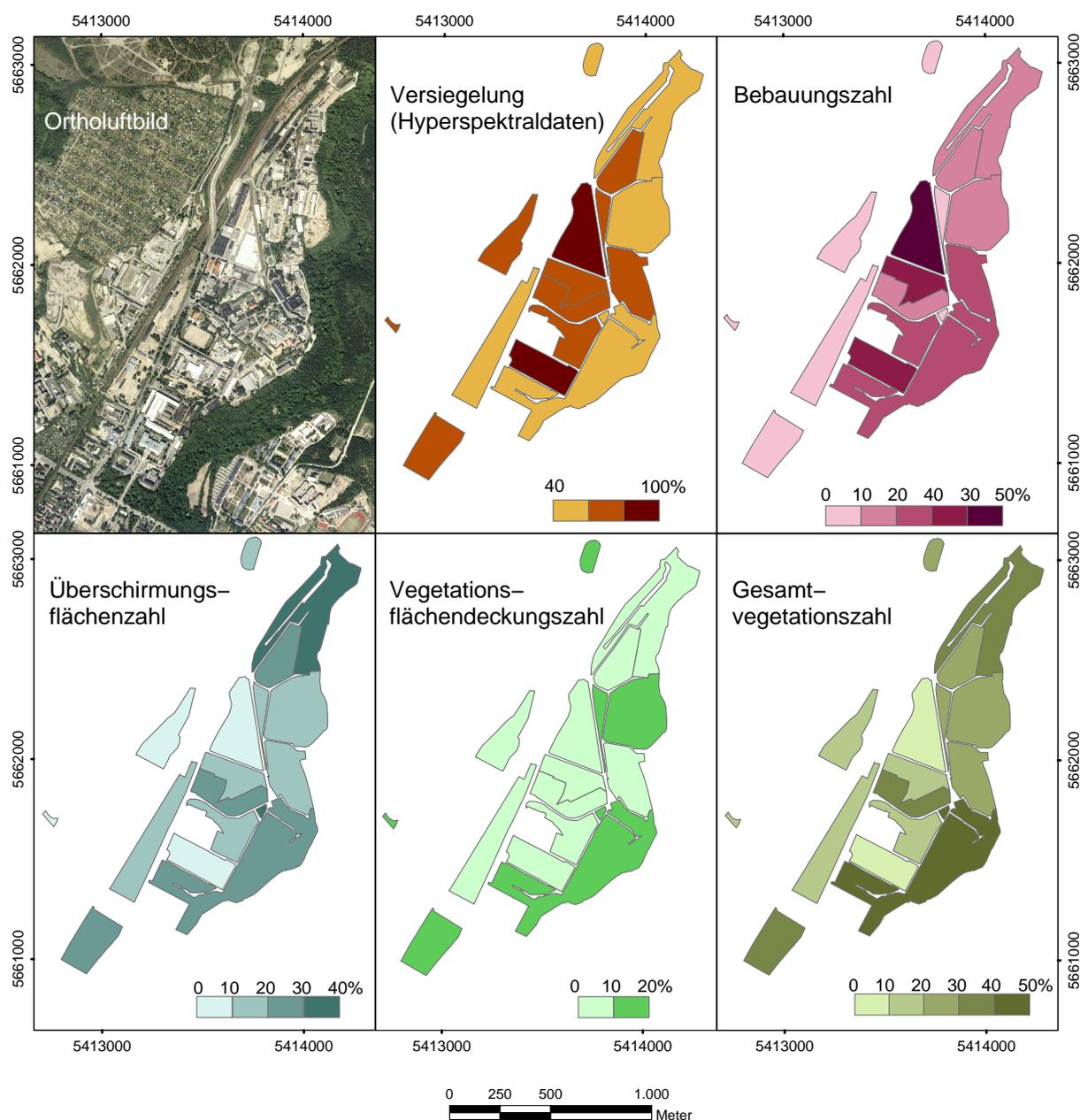


Abbildung 7.5: Quantitative Parameter zur Zustandsbeschreibung des Dresdner Industriegebietes

wesentlich unterstützen. Dies wird an der Charakterisierung des Dresdner Industriegebietes unter Verwendung der dafür bereitstehenden quantitativen Parameter demonstriert.

Abbildung 7.5 zeigt das Industriegebiet im Ortholuftbild. Im Rahmen der Stadtbiotopkartierung wurden 14 der 16 dazugehörigen Biotopie als sehr stark versiegelt (80-100%) erfasst. Die quantitativen Parameter in Abbildung 7.5 zeigen ein differenzierteres Bild. Demnach sind gerade die östlichen Randbiotopie mit 50-70% weniger stark versiegelt als die zentralen Biotopie, welche einen ungewichteten Versiegelungsgrad von durchschnittlich 80% zeigen. Ähnlich verhält es sich mit der Bebauung, die in den Kernbereichen zwischen 30-50% liegt, während der Randbereich Werte von ca. 10-20% aufweist.

Die Vegetation ist in diesen Bereichen stark dezimiert. Trotzdem zeigt auch diese einen Gradienten in Richtung der östlichen Biotope. Die Gesamtvegetationszahlen liegen dabei zwischen 20 und 40%. Die Vegetation setzt sich zu einem großen Teil aus der überschirmenden Vegetation (Bäume und Sträucher) zusammen, dabei zeigt das nordöstlichste Biotop den höchsten Überschirmungsgrad mit 31%.

Generell stellt das Industriegebiet durch die hohe Versiegelung und das geringe Vegetationsvorkommen eine Belastung für angrenzende ökologisch sensiblere Biotope dar. Die geringere Versiegelung im östlichen Bereich kann unterschiedlich auf den ökologisch sensiblen Prießnitzgrund wirken. Zum einen kann die erhöhte Fähigkeit, Niederschlagswasser aufzunehmen, ausgleichend auf Abwasserspitzen für das Feuchtgebiet wirken. Gleichzeitig besteht jedoch die Gefahr, dass industrielle Abwässer oder Rückstände schneller ins Grundwasser gelangen. Der erhöhte Anteil an Vegetation kann ebenfalls ausgleichende Wirkung haben. Gerade alte und nicht mehr genutzte Industrieflächen bieten wichtige Räume für z.B. Brachvegetation. Für derartige Rückschlüsse sind weiterführende Informationen notwendig. Aufbauend auf den räumlich erfassten Parametern können Recherchen zu Art und Intensität der industriellen Nutzung und zu Zeigerflora bzw. -fauna in potentiell interessanten Gebieten zielgerichtet durchgeführt werden.

Dieses Beispiel zeigt, dass die mit Hyperspektraldaten erhobenen quantitativen Parameter gerade für die großflächige Betrachtung von Gebieten geeignet sind. Trotz ihrer Einfachheit können sie differenzierte Informationen über den Zustand von Biotopen liefern und erlauben erste Rückschlüsse auf räumliche Zusammenhänge.

7.4.2 Abschätzung stark belasteter Biotope

In dieser Untersuchung wurden Biotope betrachtet, die durch ungünstige Lebensbedingungen charakterisiert sind. Diese Biotope wurden unter Verwendung des Versiegelungsgrades und der Gesamtvegetationszahl bestimmt. Die Auswahl beinhaltete alle Biotope, deren Versiegelungsgrad (ungewichtet) 70% nicht unterschreitet und deren Gesamtvegetationszahl 20% nicht übersteigt. Zusätzlich wurden nur Biotope ab einer Flächengröße von 1000m² berücksichtigt. Damit konnten eventuelle Fehler vermieden werden, die aus der geometrischen Verschiebung der HyMap-Daten zur Stadtbiotopkartierung resultieren. Desweiteren wurden Fehlidentifizierungen, die auf die räumliche Auflösung der HyMap-Daten zurückzuführen sind, ausgeschlossen.

In Tabelle 7.6 sind Art und Anzahl der Biotoptypen aufgelistet, die diese Bedingungen erfüllen. Abbildung 7.6 zeigt ihre Lage im Untersuchungsgebiet. Bei den aufgelisteten Biotopen handelt es sich größtenteils um solche, die in der Stadtbiotopkartierung ebenfalls als stark versiegelt und vegetationsarm eingestuft wurden. Dies betrifft vor allem die Biotope im Dresdner Industriegebiet, Wohn- und Gewerbegebiete in der Neustadt, das Gewerbegebiet südöstlich des Landschaftsparks „Großer Garten“ und vereinzelt auftretende Biotope. Besonders zahlreich vertreten sind Biotope der Blockrand- und Zeilenbebauung, Gewerbeflächen sowie Biotope der Parkplätze und Garagen.

Dennoch wurden auch Biotope selektiert, die in der Stadtbiotopkartierung als nicht belastet eingeschätzt werden. Dazu zählen beispielsweise ein Biotop der Einzel- und Reihenhausbebauung (BA) mit dem Strukturmerkmal b, eine Laubbaumreihe (LE) und zwei Biotope der Ruderal- und Staudenfluren (RA und RB). Die Ursachen ihrer Auswahl werden im Folgenden genauer untersucht.

Das Biotop BA² ist in Abbildung 7.7a im Ortholufbild dargestellt. Es zeigt eine starke Versiegelung (82%). Auf der Fläche des Biotops wurden auf der Basis der HyMap-Daten 6% Beton, 55%

²ID: 6902

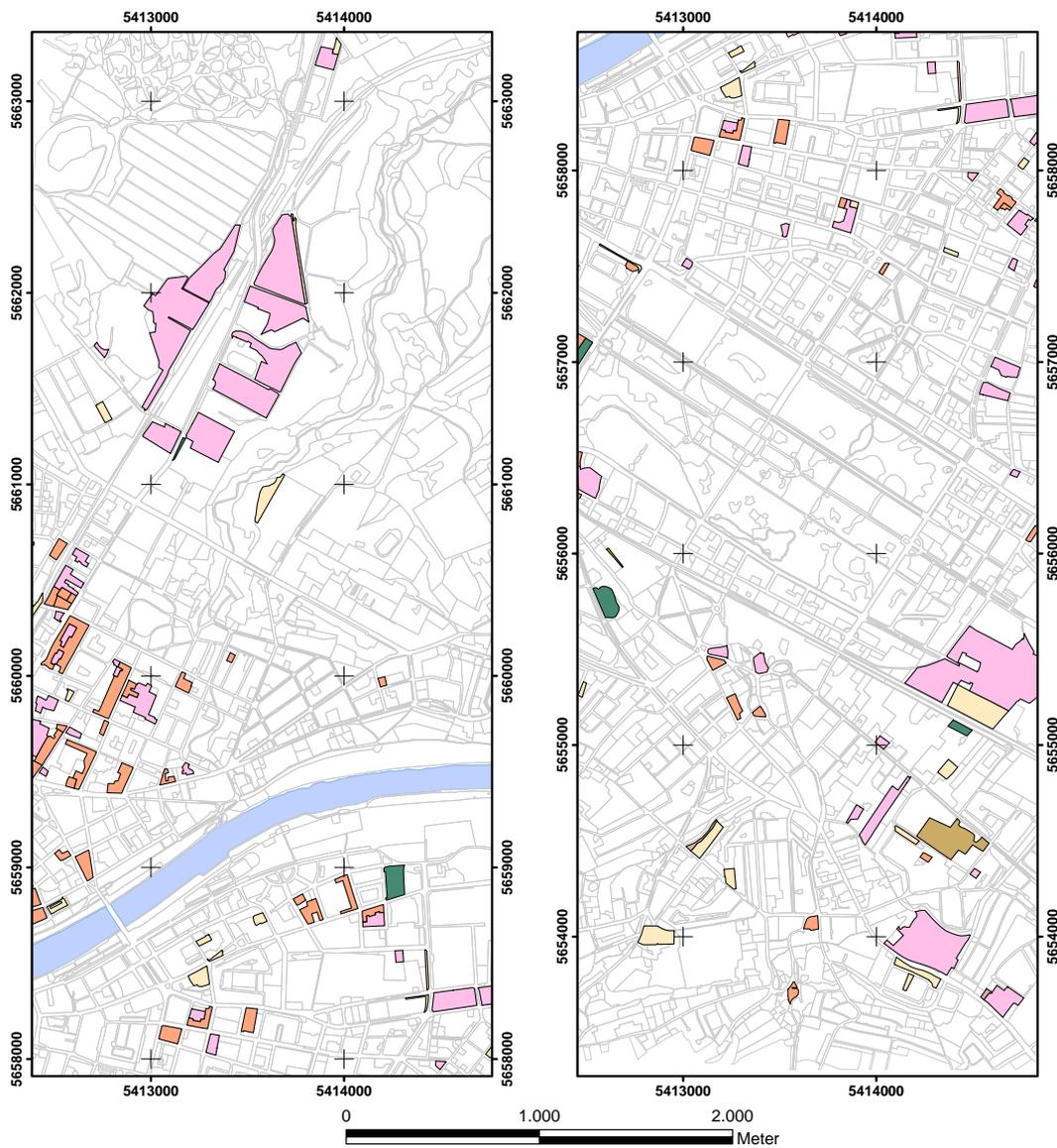


Abbildung 7.6: Stark versiegelte und vegetationsarme Biotope

Asphalt und nur 11% Bäume und 3% Rasen identifiziert. Daher ist die Vergabe des günstigen Strukturmerkmals b, welches das Biotop mit durchschnittlichem Anteil an Laubgehölzen und größeren Zierrasenflächen beschreibt, zu überdenken.

Tabelle 7.6: Auswahl stark versiegelter und vegetationsarmer Biotope; ungewichteter Versiegelungsgrad (HyMap) > 70%, Gesamtvegetationsgrad < 20% und Flächengröße > 1000m²

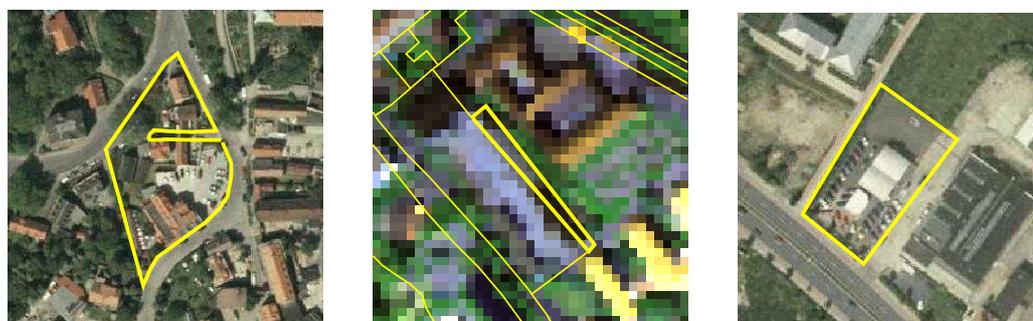
Biotoptyp	Code	Anzahl gesamt	nach Strukturmerkmal (SM)			
			(b) ^a	(c) ^b	(d) ^c	(e) ^d
Einzel- und Reihenhausbebauung	BA	11	1	1	7	2
Blockrand- und Zeilenbebauung	BB	26		2	13	11
Großform- und Hochhausbebauung	BC	5			2	3
Flächen öffentlicher und halböffentlicher Einrichtungen	BE	6		1	2	3
Kerngebiete und Citybebauung	BG	2			1	1
Gewerbeflächen	CA	38		2	4	32
Industrieflächen	CB	15			4	11
Bahnanlagen	DA	2				
Parkplätze und Garagen	DG	25				
Sonstige Verkehrsanlagen	DN	3				
Baustellen	DO	1				
Grünflächen mit wechselndem Anteil von Laubgehölzen	EB	1				
Vegetationsfreie und -arme Flächen der Grünanlagen	EF	4				
Erwerbsgartenbau	HF	1				
Laubbaumreihe	LE	1				
Ruderal- und Staudenfluren trockenwarmer Standorte	RA	1				
Ruderal- und Staudenfluren mittlerer und frischer Standorte	RB	1				

^ab - Gärten und Anlagen mit hohem Laubgehölzanteil (tw. Kronenschluss); auch jüngere Laubgehölze und Koniferen sowie einige Zierrasen

^bc - Gärten und Anlagen mit durchschnittl. Anteil von Laubgehölzen; größere Zierrasenflächen und einfache Struktur

^cd - strukturarme kleine Gärten und Anlagen ohne ausgeprägten Baumbestand; Koniferen und Rasenflächen vorherrschend; intensiv gepflegte Anlagen

^de - vegetationsarme und vegetationslose Flächen; völlig überbaute Bereiche



a) Einzel- und Reihenhausbebauung (Strukturmerkmal b)

b) Laubbaumreihe

c) Ruderal- und Staudenfluren

Abbildung 7.7: Ausgewählte Biotope der Stadtbiotopkartierung Dresden; dargestellt im Orthoflußbild (a), (c) und in den HyMap-Daten (b)

Die Laubbaumreihe (Biotop LE³) wurde fälschlicherweise selektiert. In Abbildung 7.7b ist ihre Lage im Bezug zu den HyMap-Daten dargestellt. Infolge des geometrischen Versatzes der Daten zur Stadtbiotopkartierung liegt das Biotop auf den versiegelten Flächen, die an ein Gebäude grenzen. Obwohl für diese Analyse die kleinen Biotope bereits ausgeschlossen wurden, sind vor allem langgestreckte schmale Biotope von den Auswirkungen des lokalen geometrischen Versatzes

³ID: 5374

betroffen.

Die Selektion des Biotopes der Ruderal- und Staudenfluren (RA⁴) ist auf eine Flächenänderung zurückzuführen. Wie die Überlagerung mit dem Ortholuftbild zeigt (Abb. 7.7c), ist das Biotop nahezu vollständig versiegelt. Auf der Basis der HyMap-Daten wurden auf der Fläche des Biotops 5% Aludach, 70% Asphalt, 9% Baum am westlichen Rand des Biotops und 5% Wiese identifiziert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die problemorientierte Selektion nach quantitativen Parametern nicht nur eine Inventur stark belasteter Biotope, sondern auch eine Überprüfung ihrer Definition ermöglicht. An zwei Beispielen wurde gezeigt, dass die quantitativen Parameter in der Lage sind, den Zustand der Biotope zu beschreiben. Auf der Basis dieser quantitativen Parameter im Vergleich mit den Merkmalen, die im Rahmen der Stadtbiotopkartierung vergeben wurden, konnten Flächenänderungen detektiert werden.

⁴ID: 6924

Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein automatischer Ansatz zur flächendeckenden Erfassung städtischer Oberflächenmaterialien entwickelt (Kapitel 5). Die Oberflächenidentifizierung bildete die Grundlage für die Ableitung quantitativer Informationen zur Zustandsbeschreibung städtischer Biotope. Die Bedeutung der quantitativen Informationen und Einsatzmöglichkeiten für die ökologische Stadtplanung wurden demonstriert (Kapitel 7). Der entscheidende Faktor für den Einsatz des vorgestellten Ansatzes in der ökologischen Stadtplanung ist die Qualität der materialorientierten Oberflächenidentifizierung. Diese wurde auf der Basis hyperspektraler HyMap-Daten durchgeführt, deren räumliche, spektrale und bildgeometrische Eigenschaften die Genauigkeit der Oberflächenkartierung bestimmen.

Im Abschnitt 8.1 wird das Potential der hyperspektralen HyMap-Daten im Hinblick auf eine flächendeckende materialorientierte Oberflächenerfassung diskutiert. Abschnitt 8.2 befasst sich mit der Diskussion der Genauigkeit der Oberflächenidentifizierung. Im Abschnitt 8.3 werden Einsatzmöglichkeiten der fernerkundlichen Ergebnisse in der ökologischen Stadtplanung diskutiert.

8.1 Eignung der HyMap-Daten und Methoden

Räumliche Auflösung

Mit der räumlichen Auflösung des HyMap-Sensors von 6m wurde eine Vielzahl kleinflächiger städtischer Objekte, wie Gebäude, Straßen und Vegetationsflächen in den Daten abgebildet. In Kombination mit der hohen spektralen Auflösung der Daten ermöglichte dies die Erfassung der Objekte anhand ihrer materialspezifischen Reflexionseigenschaften. Der hohe Mischpixelanteil von ca. 55% erschwerte jedoch die direkte Bestimmung der Oberflächenmaterialien. Sehr wirkungsvoll erwies sich daher die getrennte Identifizierung von spektral reinen Pixeln (*Seedlings*-Klassifizierung), welche die räumlichen und thematischen Ausgangspunkte für die Identifizierung der an der Mischung beteiligten Oberflächenmaterialien (Endmember) bildeten. Im Ergebnis wurden die städtischen Oberflächenmaterialien mit dem verwendeten Klassifizierungs- und Entmischungsalgorithmus flächendeckend in guter Qualität erfasst, wobei ausschließlich Informationen aus den HyMap-Daten zum Einsatz kamen. Multispektrale Daten können zwar über höhere räumliche Auflösungen verfügen, sind aber im Gegensatz zu hyperspektralen Daten bei der Auswertung auf zusätzliche Informationen (Expertenwissen) angewiesen. Grund dafür ist die geringe spektrale Auslösung multispektraler Systeme.

Trotz der hohen räumlichen Auflösung bestanden Schwierigkeiten in der Erkennung kleiner Objekte (Abschnitt 6.4.2). Dies ist hauptsächlich auf zwei Tatsachen zurückzuführen. Die Materialien der kleinen Objekte konnten nicht in den Trainingsdaten erfasst werden. Wenn sie

nicht durch andere größere Objekte repräsentiert sind, ist die Wahrscheinlichkeit der Entmischung mit falschen Oberflächenmaterialien (Endmembers) hoch. Dies betrifft insbesondere die auf Gehwegen verbauten Materialien Beton und Kopfsteinpflaster. Erschwerend wirkt sich bei diesen Materialien die häufige Überdeckung durch Baumkronen (Straßenbäume) aus. Darüberhinaus konnten die kleinen Objekte nicht durch *Seedlings* repräsentiert werden, womit sich die Wahrscheinlichkeit der fehlerhaften Entmischung weiter erhöhte.

Aufgrund der Grenzen der räumlichen Auflösung und der hohen spektralen Variabilität erwies sich die manuelle Endmembersuche als schwierig und zeitaufwendig (Abschnitt 5.2). Die Endmembers wurden daher in einem iterativen Prozess bestimmt, der sich aus der Endmemberbestimmung und der Kontrolle der erzeugten Ergebnisse (Identifizierungsalgorithmus) zusammensetzt. Die Automatisierung dieses Prozesses würde den Algorithmus zur Identifizierung erheblich erleichtern und den Weg zur vollautomatischen Erfassung der städtischen Oberflächenmaterialien aus hyperspektralen Daten ebnet.

Diese Betrachtungen zeigen, dass die räumliche Auflösung ein entscheidendes Kriterium für die Qualität der fernerkundlichen Ergebnisse und der darauf aufbauenden stadtökologischen Analyse ist. Beim Einsatz räumlich höher aufgelöster Daten ist daher eine deutliche Steigerung der Qualität zu erwarten. Ursachen sind der reduzierte Mischpixelanteil und die Möglichkeit der genaueren Bestimmung der Trainingsdaten. Die neuesten Untersuchungen ergaben eine optimale Auflösung von 2-3m. Der Mischpixelanteil verringert sich mit dieser Auflösung deutlich. Auf der Basis solcher HyMap-Daten ist bereits eine automatische Endmember-Bestimmung für viele Materialien und ihre spektralen Variationen gelungen (Segl *et al.*, 2003a).

Spektraler Informationsgehalt

Die Untersuchungen in Kapitel 4 zeigen, dass die materialspezifischen Reflexionseigenschaften in den Feld- und Labormessungen auch vom HyMap-Sensor abgebildet wurden. Dies erlaubte die Unterscheidung einer Vielzahl städtischer Materialien. In den HyMap-Daten konnten 90 spektrale Klassen definiert werden, die sowohl städtische Oberflächenmaterialien als auch ihre spektralen Variationen und Schatten repräsentieren. Die Ableitung robuster spektraler Merkmale für die automatische Identifizierung war ebenfalls aufgrund des hohen spektralen Informationsgehaltes möglich (Abschnitt 4.5).

Eine wichtige Voraussetzung für eine stadtökologisch motivierte Analyse der fernerkundlichen Oberflächenkartierung war die Erfassung der Materialien nach ihren Versickerungsfähigkeiten und ihren unterschiedlichen Funktionen (Abschnitt 2.5). Problematisch war in diesem Zusammenhang die Differenzierung zwischen Dach- und Freiflächenmaterialien, die aus dem gleichen Material bestehen (Abschnitt 4.4). Ihre Unterscheidung ist jedoch aus stadtökologischen Gesichtspunkten von hoher Bedeutung. Um dieses Problem zu lösen, wurden die Dach- und Freiflächenmaterialien im Rahmen der *Seedlings*-Klassifizierung durch den Einsatz einer Gebäudemasken getrennt identifiziert. Die Ergebnisse der thematischen Genauigkeitsanalyse (Abschnitt 6.4.2) zeigen, dass damit eine Differenzierung der spektral sehr ähnlichen Dach- und Freiflächenmaterialien erreicht werden konnte.

Die Qualität der Gebäudemasken hatte einen entscheidenden Einfluss bei der Identifizierung der spektral reinen Pixel der Dachmaterialien. Zur Erzeugung der Gebäudemasken wurden zwei verschiedene Methoden geprüft. Bei der ersten Methode wurden die Gebäude anhand der spezifischen Reflexionseigenschaften ihrer Dachmaterialien aus den HyMap-Daten extrahiert. Das Problem der spektralen Ähnlichkeit der Dach- und Freiflächenmaterialien wurde durch die zusätzliche Berücksichtigung ihrer Formmerkmale gelöst. Zum Vergleich stand die zweite Methode, bei der die Gebäudemasken aus einer vektorialen Gebäudekartierung erzeugt wurde. Die Integra-

tion externer Daten erwies sich aufgrund mangelnder geometrischer Übereinstimmung beider Datensätze und der ungenügenden Aktualität der externen Gebäudedaten als nicht praktikabel. Diese Probleme können bei der Verwendung der spektralen Gebäudemasken ausgeschlossen werden. Dagegen konnten hier aufgrund der hohen spektralen Variabilität der Dachmaterialien nicht alle Gebäude erfasst werden.

Dunkle Materialien sind trotz der hohen spektralen Auflösung der HyMap-Daten schwer zu identifizieren. Aufgrund ihrer sehr niedrigen Albedo sind die spektralen Charakteristika in Form von Absorptionsbanden nur schwach ausgeprägt. Dies betrifft Materialien wie dunkles Bitumen, Teer und alte Ziegeldächer. Eine wesentliche Verbesserung ist mit dem Einsatz weiterer Kanäle im thermalen Wellenlängenbereich zu erwarten. Materialien, die nur sehr wenig Strahlung reflektieren, haben in der Regel hohe Emissionswerte. In der Folge ergeben sich bessere Differenzierungsmöglichkeiten für diese Materialien. Weitere Vorteile dürften sich bei der Unterscheidung von Dach- und Freiflächenmaterialien ergeben. Dies ist auf die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen innerhalb eines Tages zurückzuführen. Dächer können in thermalen Daten aufgrund ihrer höheren Temperatur von den kühleren Freiflächenmaterialien getrennt werden (Segl *et al.*, 2003b). In diesem Zusammenhang stellt der geplante hyperspektrale Sensor ARES eine interessante Alternative zum HyMap-System dar (Wilson & Cocks, 2003; Kaufmann, 2002). Dieser wird zusätzlich zu den 128 Kanälen im reflektiven Wellenlängenbereich über 32 thermale Kanäle verfügen.

Bei der Vegetation wurden Laub- und Nadelgehölze, Grünflächen unterschiedlicher Pflegeintensität, vegetationsbestandene Äcker und Brachen unterschieden. Diese Differenzierung spiegelt die Haupterscheinungen der Vegetation in den bebauten Gebieten wider. Die Differenzierung der niedrigen Vegetation repräsentiert im Wesentlichen den Stand der Pflegemaßnahmen (z.B. Mahd). Eine weitere Differenzierung der hochstämmigen Vegetation nach Baumarten war nicht möglich, da es zu wenig großflächig homogene Bestände im Untersuchungsgebiet gab, die eine Erfassung in spektral reiner Form ermöglichen. Als schwierig erwies sich die Identifizierung des Schattens von Bäumen, der auf vegetationslose und vegetationsbestandene Freiflächen (z.B. Rasen) fällt. Dabei kommt es besonders beim Rasen zu spektralen Verwechslungen mit Nadelgehölzen.

Eine mögliche Lösung dieses Problems besteht in der Berücksichtigung der Höhe dieser fehlidentifizierten Flächen. In diesem Zusammenhang gewinnen digitale Stadtmodelle an Bedeutung. Neueste Entwicklungen haben gezeigt, dass HRSC-Daten für die Ableitung hoch aufgelöster Stadtmodelle geeignet sind und bereits erfolgreich zur Analyse der Vegetation und zur Erfassung von Gebäuden in städtischen Gebieten eingesetzt wurden (Scholten *et al.*, 2003; Lehmann, 2003; Mueller & Segl, 2002).

Bildgeometrie

Für die stadtoökologische Auswertung wurden die fernerkundlichen Ergebnisse in die bestehende Stadtbiotopkartierung integriert. Nach der dazu notwendigen geometrischen Korrektur (Abschnitt 3.3.3) verblieben lokal starke Verzerrungen. Der Grund dafür lag in den ungenauen Positions- (GPS) und Winkelmessungen während des Fluges. Damit waren vor allem der genauen Materialerfassung kleiner Objekte bzw. Biotope Grenzen gesetzt. In Zukunft sind bessere Ergebnisse aufgrund genauerer Technologien zur Winkelmessung zu erwarten. Ab 2004 wird ein neues europäisches Satellitennavigationssystem (GNSS-2: GALILEO) in Ergänzung und Erweiterung zum amerikanischen GPS-System arbeiten. In diesem Zusammenhang sind in der Positionsbestimmung hohe Genauigkeiten im Meterbereich zu erwarten. Das für zivile Zwecke entwickelte System verspricht einen zuverlässigen Empfang besonders in Städten und in Gebieten hoher geografischer Breite (Europäische Kommission, 2003).

Die Vermeidung der Probleme, die sich aus den starken lokalen Verzerrungen der HyMap-Daten ergeben, ist durch den Einsatz satellitengetragener hyperspektraler Aufnahmesysteme möglich. Die im Gegensatz zu flugzeuggetragenen Systemen stabile Flugbahn kann die geometrische Korrektur der Daten sowohl vereinfachen als auch verbessern. Dennoch sind bisher keine Satellitensysteme mit einer ausreichenden räumlichen Auflösung operationell im Einsatz. Das derzeit auf der Plattform *Earth Observing 1* befindliche hyperspektrale Aufnahmesystem Hyperion verfügt zwar über 120 Kanäle im reflektiven Wellenlängenbereich, die eine spektrale Auflösung von 10nm haben (Storment, 2003). Dennoch eignen sich diese Daten aufgrund der räumlichen Auflösung von 30m nicht für eine detaillierte stadtökologische Analyse.

8.2 Genauigkeit der Oberflächenidentifizierung

In der stadtökologischen Auswertung wurden die fernerkundlichen Ergebnisse, die mit Hilfe der spektralen Gebäudemasken (Abschnitt 5.1.1) erstellt wurden, verwendet. Im Folgenden wird zuerst die Methode zur Bewertung der Genauigkeit der Ergebnisse diskutiert. Daran schließt sich die Analyse der Genauigkeit der zur stadtökologischen Auswertung verwendeten Oberflächenidentifizierung an.

Standardisierte Genauigkeitsanalysen erwiesen sich als wenig aussagekräftig (Abschnitt 6.1). Daher wurde ein eigener objektorientierter Ansatz im Rahmen eines Geo-Informationssystems entwickelt (Abschnitt 6.2). Damit konnten praxisorientierte und aussagekräftige Genauigkeitsmaße für Entmischungsergebnisse abgeleitet werden. Sie helfen zum einen dem fernerkundlichen Auswerter, die angewandten Methoden zur Datenanalyse zu überprüfen und zu optimieren. Zum anderen bieten sie dem Nutzer der fernerkundlichen Ergebnisse eine Grundlage zur Abschätzung der Genauigkeit weiterführender Verarbeitungsschritte.

Einen Nachteil stellt der hohe Aufwand bei der Erstellung der Referenzdaten dar. Dieser konnte teilweise reduziert werden, indem nicht, wie bei fernerkundlichen Genauigkeitsanalysen üblich, zufällig ausgewählte Objekte berücksichtigt wurden, sondern zusammenhängende Gebiete mit einer Vielzahl von Objekten. Die Bestimmung der Referenzgebiete ist demnach nutzerabhängig.

Die objektorientierte Genauigkeitsanalyse wurde an Beispielflächen besonders dicht bebauter und kleinflächig gestalteter städtischer Bereiche durchgeführt. Das Niveau der Genauigkeitsanalyse ist daher als hoch einzuschätzen, da große Objekte im Untersuchungsgebiet, wie z.B. Parkanlagen, Wälder, oder große Freiflächen nicht berücksichtigt wurden. Die visuelle Kontrolle zeigte in diesen Gebieten sehr hohe Genauigkeiten. Aus diesen Gründen repräsentieren die Ergebnisse der objektorientierten Genauigkeitsanalyse nicht das gesamte Untersuchungsgebiet, sondern die problematischen Bereiche in der Stadt. Auf diese Weise wurden wesentliche Erkenntnisse zur Verbesserung des Identifizierungsalgorithmus und zum Potential der HyMap-Daten gewonnen. Bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebietes ist von einer höheren Genauigkeit auszugehen.

Die Treffergenauigkeit aller richtig identifizierten Objekte der Referenzflächen ist mit 57% auf der Ebene der Oberflächentypen (Abb. 2.10) nicht zufriedenstellend. Dies entspricht dennoch einer Fläche von 78%, auf welcher der korrekte Oberflächentyp identifiziert wurde. Auf der Ebene der Oberflächenmaterialien beträgt die Treffergenauigkeit 48% und der Anteil der richtig identifizierten Flächen 72%. Diese Ergebnisse zeigen, dass besonders kleine Objekte, die nicht in der spektralen *Seedlings*-Klassifizierung erfasst wurden, nicht korrekt identifiziert werden konnten. Hier ist eine wesentliche Verbesserung durch die Verwendung räumlich höher aufgelöster Daten zu erwarten.

Die Ebene der Oberflächentypen war die Grundlage für die Ableitung der quantitativen Parameter (Tab. 6.4). Aufgrund der hohen Treffergenauigkeiten der Dachmaterialien und der hochstämmigen Vegetation sind besonders der Bebauungsgrad und der Überschirmungsgrad als zuverlässig einzuschätzen. Die Genauigkeiten der versiegelten Freiflächen und der niedrigen Vegetation zeigen Defizite. In der Folge fallen der Versiegelungsgrad und der Vegetationsdeckungsgrad etwas zu gering aus. Neben den oben diskutierten Gründen sind hier vor allem die Überdeckungen der entsprechenden Oberflächenmaterialien mit Bäumen und Schatten verantwortlich, die typisch für fernerkundliche Daten urbaner Gebiete sind. Die verdeckten Flächen können somit nicht in die stadtoökologische Auswertung einfließen. Ein ähnliches Problem ergibt sich durch Schatten. Hier sind vor allem die an Gebäude angrenzenden Freiflächenmaterialien von der Überdeckung betroffen.

Die Erfassung der verdeckten Oberflächenmaterialien durch Daten außerhalb der Vegetationsperiode oder zu anderen Tageszeiten ist für die Abschätzung des Einflusses der Überdeckungen durch Vegetation sinnvoll. Bisher gehen diese Flächen als Vegetationsflächen ein, obwohl beispielsweise ein Strassenbaum eine versiegelte Fläche bedeckt. Als Ergebnis dieser Abschätzung bietet sich die Einführung eines Korrekturfaktors an.

8.3 Einsatz in der ökologischen Stadtplanung

Mit den HyMap-Daten konnten flächendeckend und automatisch quantitative Informationen zur Ausstattung und Struktur der städtischen Biotope abgeleitet werden. Damit stellen die Ergebnisse eine sinnvolle Ergänzung zu den in der Stadtbiotopkartierung enthaltenen beschreibenden Merkmalen dar. Ihre digitale Verfügbarkeit ermöglichte die automatische Einbindung der fernerkundlichen Ergebnisse in das GIS der Stadtbiotopkartierung unter Verwendung geeigneter Methoden (Abschnitt 7.1.1). Damit können die quantitativen Informationen optimal für stadtoökologische Analysen genutzt werden.

Die stadtoökologische Auswertung zeigt, dass städtische Biotope eines Typs und ähnlicher Strukturmerkmale sehr heterogen ausgestattet sind. Damit wird deutlich, dass die Vielfältigkeit eines Biotoptyps mit verbalen Beschreibungen nicht ausreichend erfasst werden kann. Dies unterstreicht die Bedeutung der quantitativen Erhebung der materiellen Ausstattung und der Parameter zur Zustandsbeschreibung der einzelnen Biotope.

Die quantitativen Daten stellen damit zusätzliche Informationen für das Grünflächenamt Dresden dar (Abschnitt 7.2), die für verschiedene Zwecke genutzt werden können. Zum einen ist eine breitere Datenbasis für die ökologische Bewertung der Biotope geschaffen, die den sehr wichtigen und abschließenden Teil der Stadtbiotopkartierung darstellt. Dabei sollen beispielsweise das Naturschutzpotential und das Standort- und Strukturpotential in Stufen bewertet und zu einem Biotopwert zusammengefasst werden. Ein erhebliches Problem stellt dabei die Definition von Wertstufen und Schwellenwerten für die Klassifizierung der Wertgrößen dar. Die quantitativen Parameter können in diesem Zusammenhang als Zusatzinformationen in die Bewertung eingehen und die Definition von Wertstufen und Schwellenwerten aufgrund ihrer stufenlosen Verfügbarkeit erleichtern.

Das Potential für stadtklimatologische Untersuchungen wurde bereits in einer am GFZ Potsdam in der Sektion 1.4 durchgeführten Diplomarbeit gezeigt (Förster, 2002). Die Erfassung der städtischen Oberflächenmaterialien mit hyperspektralen HyMap-Daten ermöglichte die Ableitung und Analyse stadtklimatologisch relevanter Parameter. Die Ergebnisse können für die

Bewertung von stadtklimatologischen Planungsszenarien und die Formulierung von Qualitätsstandards eingesetzt werden.

Die Aussagekraft der relativ einfachen quantitativen Parameter darf nicht überschätzt werden (Krause, 1989). Dennoch lassen sich mit ihrer Hilfe über die Oberflächenkartierung hinausgehende, räumlich differenzierte Erkenntnisse gewinnen. Aus der kartografischen Darstellung der Merkmale sind Belastungs- und Entlastungsbereiche in der Stadt ableitbar und Zusammenhänge zwischen diesen Bereichen erkennbar. Diese räumlichen Analysen wurden für das Untersuchungsgebiet beispielhaft demonstriert (Abschnitt 7.3.2).

Aufgrund der räumlichen Auflösung der HyMap-Daten sind der Erfassung und statistischen Analyse der Oberflächenmaterialien bezüglich der Biotop Grenzen gesetzt. Dies betrifft insbesondere kleine und schmale Biotop, die nur von wenigen bzw. keinem Pixel vollständig abgedeckt sind. Eine hohe Genauigkeit der für diese Biotop erfassten Oberflächenmaterialien kann aus zwei Gründen nicht garantiert werden. Zum einen sind diese Oberflächen in den HyMap-Daten als spektrale Mischsignaturen erfasst, was die Möglichkeit einer korrekten Oberflächenidentifizierung reduziert. Zum anderen wirken sich Fehler, die aufgrund lokaler geometrischer Versätze zwischen der Stadtbiotopkartierung und den HyMap-Bilddaten entstehen, hier besonders aus.

Ein wichtiger zukünftiger Anwendungsbereich besteht im Einsatz der weitgehend automatisch erhobenen Oberflächenmaterialien als Indikatoren für eine Überwachung der Veränderungen von Biotop. Bereits 1993 existierten für 160 Städte flächendeckende Biotopkartierungen. Heute ist anzunehmen, dass noch mehr Städte über eine derartige Bestandsaufnahme verfügen. Was ihnen fehlt, sind effektive Aktualisierungsstrategien, mit denen sich urbane Gebiete schnell und kostengünstig bewerten lassen. Gerade die regelmäßige Erfassung der Quantitäten der städtischen Oberflächenmaterialien und der daraus abgeleiteten Parameter zur Zustandsbeschreibung der Biotop können wirkungsvolle Indikatoren für Veränderungen sein, ohne dass eine Änderung der Struktur oder der Nutzung der Fläche vorliegen muss. So kann beispielsweise erfasst werden, wie ein Sportplatz, der vorher eine offene Bodenfläche darstellte, nun asphaltiert wurde. Dies ist eine entscheidende Flächenveränderung, da hiermit eine unversiegelte in eine vollversiegelte Fläche umgewandelt wurde. Meist ist die Veränderung der städtischen Oberflächenmaterialien auch mit der Veränderung der Lebensräume und -bedingungen für Flora und Fauna gekoppelt. Solche Veränderungen können von Experten überprüft werden. Damit wäre eine Voraussetzung geschaffen, die sehr detailliert aufgenommene Biotopkartierung adäquat fortzuführen, ohne den gesamten städtischen Raum neu zu kartieren.

A

Anhang

Tabelle A.1: Biotoptypenschlüssel der Stadtbiotopkartierung Dresden

<p>B <u>Biotoptypen der Wohnbebauung und gemischten Bauflächen</u></p> <p>BA Flächen der Einzel- und Reihenhausbebauung (vorwiegend Wohnfunktion)</p> <p>BB Flächen der Blockrand- und Zeilenbebauung (vorwiegend Wohnfunktion)</p> <p>BC Flächen der Großform- und Hochhausbebauung (vorwiegend Wohnfunktion)</p> <p>BD Landwirtschaftliche Hof- und Gebäudeflächen</p> <p>BE Flächen öffentlicher und halböffentlicher Einrichtungen (soweit luftbildsichtbar bzw. den Kartengrundlagen zu entnehmen)</p> <p>BF Flächen sonstiger Bebauung (Schloss, Kloster, Ruine etc.)</p> <p>BG Flächen der Kerngebiete und Citybebauung mit meist heterogener Nutzung (Gewerbe, Wohnen, Verwaltung etc.)</p> <p>C <u>Biotoptypen für Industrie-, Gewerbe- und Sonderflächen</u></p> <p>CA Gewerbeflächen (z.B. Tankstellen, Handwerksbetriebe, Verbrauchermärkte etc.; evtl. untergeordnet auch Wohnfunktion)</p> <p>CB Industrieflächen (großflächige, produzierende, emittierende Anlagen)</p> <p>CC Ver- und Entsorgungsflächen</p> <p>CD Militärische Anlagen (deren Gebäude- und Anlagenteile, Vegetation im Bereich der Übungsgelände wird entsprechend der weiteren Kartiereinheiten erfasst)</p> <p>CE Hafenanlagen (Schleusen, Hallen, Lagerplätze etc.)</p> <p>CF Funk- und Sendeanlagen</p> <p>Strukturmerkmale der Biotoptypengruppen "B" und "C" Vegetations- und Nutzungsstruktur der unbebauten Grundstückflächen:</p> <p>a reich strukturierte Gärten und Anlagen mit hohem Anteil meist alter und verholzter Laubgehölze; Koniferen und Zierrasen nur untergeordnet; großflächig mit parkähnlichem Charakter; meist alte Villengärten;</p> <p>b Gärten und Anlagen mit hohem Laubgehölzanteil (teilweise Kronenschluss); auch jüngere Laubgehölze und Koniferen sowie einige Zierrasen;</p> <p>c Gärten und Anlagen mit durchschnittlichem Anteil von Laubgehölzen; größere Zierrasenflächen und einfache Struktur</p> <p>d strukturarme kleine Gärten und Anlagen ohne ausgeprägtem Baumbestand; Koniferen und Rasenflächen vorherrschend; intensiv gepflegte Anlagen;</p> <p>e vegetationsarme und vegetationslose Flächen; völlig überbaute Bereiche</p> <p>f Nutzgärten, vorwiegend Gartenflächen mit Anbaufunktion (Gemüsebeete etc.); kein bzw. gering ausgeprägter Gehölzbestand, vereinzelt Obstgehölze;</p> <p>g Nutzgärten mit ausgeprägtem Gehölzbestand, in der Regel hohe Anzahl von Obstgehölzen; Bodennutzung nur untergeordnet mit Anbaufunktion, vorwiegend aus krautiger Vegetation zusammengesetzt;</p> <p>Versiegelungsgrad:</p> <p>V1 00 – 20 %</p> <p>V2 20 – 40 %</p> <p>V3 40 – 60 %</p> <p>V4 60 – 80 %</p> <p>V5 80 – 100 %</p>	<p>D <u>Biotoptypen der Verkehrsanlagen und –flächen</u></p> <p>DA Biotoptypen der Bahnanlagen, Gleisanlagen und Bahndämme mit meist hoher Versiegelung und Verdichtung (keine Straßenbahngleise im Bereich von Straßenverkehrsflächen)</p> <p>DB Bahnhöfe, Wirtschaftsgebäude, Betriebsgelände mit starker Oberflächenversiegelung</p> <p>DC Biotoptypen der Straßenverkehrsflächen, vollständig versiegelt</p> <p>DE Wege (Acker-, Waldwege etc.) versiegelt bzw. stark verdichtet</p> <p>DF Wege (Acker-, Waldwege etc.) unversiegelt</p> <p>DG Parkplätze und großflächige Garagenanlagen, stark bis vollständig versiegelt</p> <p>DK Flug- und Landeplätze, bebaute Bereiche incl. Gebäude und Hallen sowie gärtnerisch gepflegte Anlagen</p> <p>DM Bootshäuser und Bootsanlegeplätze</p> <p>DN sonstige Verkehrsanlagen (Marktplätze, öffentliche Plätze etc.)</p> <p>DO Baustellen</p> <p>Gehölze im Bereich der Verkehrsanlagen werden im Rahmen der Kartiereinheit "I." (Gehölze) erfasst, sobald sie von markanter Größe (> Flächenfalle) und zeichnerisch darstellbar sind (Entscheidung durch den Interpreten). Zu diesen Gehölzen zählen z.B. größere Baumreihen an Straßen, größere Böschungspflanzungen an und auf Parkplätzen etc. Sind diese Gehölzbestände zeichnerisch nicht darstellbar, so werden sie den angrenzenden bebauten Flächen zugeordnet und gehen in die Klassifizierung der Strukturmerkmale (a, b, c...) ein.</p> <p>E <u>Biotoptypen der Grünflächen und Erholungsanlagen</u> <i>Grün- und Parkanlagen, Sport- und Spielplätze:</i></p> <p>EA Grünflächen mit geschlossenem Baumbestand und weitgehend Kronenschluss; meist wertvoller alter Laubbaumbestand, extensiv bzw. in Teilbereichen extensiv gepflegt</p> <p>EB Grünflächen mit wechselndem Anteil von Gehölzen (zeitweise Kronenschluss), Scherrasen und sonstige Anlagen (Strauchpflanzungen, Blumenbeete, Wege,...); meist intensive Pflege</p> <p>EC Reine Scherrasen- und Zierrasenflächen, auch Sportrasen, ohne bzw. weitgehend ohne Gehölze, intensive Pflege im gesamten Bereich</p> <p>ED Spielplätze</p> <p>EE Blumenbeete, Bankette und Zierstrauchpflanzungen, großflächig und als Reinbestand (> Flächenfalle)</p> <p>EF vegetationsfreie und –arme Flächen der Grünanlagen (Tennisplätze, Schotter- und Sandplätze, größere Wegesysteme etc.)</p> <p><i>Friedhöfe:</i></p> <p>EG alte Friedhöfe, strukturreiche Parkfriedhöfe mit dichtem Altbaumbestand</p> <p>EG jüngere Friedhöfe und Neuanlagen; alte Laubgehölze untergeordnet</p> <p>EJ Waldfriedhöfe</p> <p><i>Kleingartenanlagen:</i></p> <p>EK gehölzreiche, alte Kleingartenanlagen mit ausgeprägtem Obstbaumbestand, auch Siedlergärten bzw. größere Einzelgärten</p>
---	---

- EL gehölzarme, junge Kleingartenanlagen, überwiegend Zierfunktion, auch Ferienhausbebauung
EM Campingplätze und sonstige kommerzielle Freizeitanlagen

Strukturmerkmale der Grünflächen
++ besonders wertvoller Baumbestand

Versiegelungsgrad (unversiegelte Flächen erscheinen ohne Angabe):

- V1 00 – 20 %
V2 20 – 40 %
V3 40 – 60 %
V4 60 – 80 %
V5 80 – 100 %

- F Biotoptypen der Gewässer und deren Uferzonen
FA Biotoptypen der Flüsse
FB Biotoptypen der Bäche
FC Biotoptypen der Gräben
FD Biotoptypen der Seen und Abgrabungsseen
FE Biotoptypen der Teiche, Staugewässer, Weiher und Tümpel
FF Biotoptypen der Altarme und Altwasser
FG Biotoptypen der Quellen (punktuelle Quellen, soweit luftbildsichtbar, Quellfluren siehe "S")

Strukturmerkmale der Gewässer und Uferzonen "F".
(Angabe der luftbildsichtbaren Strukturmerkmale)

Ausbauzustand und Morphologie

- st Steilufer
fl Flachufer
we wechselnde Uferneigung
na naturnah, kaum ausgebaut
mb mäßig ausgebaut
sk stark ausgebaut, naturfern
er Erosionsbereiche (Abbruch, Auskolkung)
ak Akkumulationsbereiche (Anlandung)
sw Schwelle, Wehr, Schlabsurz
sc Steinschüttung
vb Verlandungsbereich

Vegetation:

- sb Schwimmblattgesellschaften
ro Röhricht (Schilf, Rohrglanzgrasröhrichte etc.)
bi Binsen, Seggen
ho Hochstauden
ra Rasenböschung
ug Ufergehölz, standortgerecht
un Ufergehölz, nicht standortgerecht
vl vegetationslose oder -arme Uferzonen

- G Biotoptypen des Grünlandes
GA artenarmes Intensivgrünland, Grünlandeinsaat
GB Wirtschaftsgrünland mesophiler und frischer Standorte
GC Wirtschaftsgrünland feuchter und nasser Standorte
GD Grünlandbrachen, aufgelassene Grünlandstandorte
GE Magergrünland

Strukturmerkmale der Grünlandbiotoptypen

- w Grünland beweidet
i intensive Nutzung
e extensive Nutzung
b baumbestanden
f mit vereinzelt feuchten Bereichen
v verbuscht, verbuschend

ho Hochstauden

- H Ackerland und sonstige landwirtschaftliche Nutzflächen

- HA Acker (Getreide, Hackfrucht, Gemüsekulturen etc. sowie zur Zeit des Bildfluges offene Flächen)
HB Obstkulturen, intensiv bewirtschaftet (Nieder- und Mittelstammkulturen, Spalier- und Beerenobst)
HF Erwerbsgartenbau (Gärtnerereien etc.; meist Kulturen unter Glas und hoher Versiegelung; ggf. mit Angabe des Versiegelungsgrades)
HG Grabeland, Gärten im Außenbereich
HW Weinberg, Weinanbau

Strukturmerkmale der Ackerflächen

- fe feuchte, vernässte Teilflächen
kr krautreiche Gesamfläche
ba baumbestanden

- L Kleingehölze, Gebüsche

- LA Gebüsch, Buschwerk, Vorwaldgebüsch
LB Gebüsch, Buschwerk, Vorwaldgebüsche trockener Standorte
LC Gebüsch, Buschwerk, Vorwaldgebüsche feuchter Standorte
LD Hecke, Strauchreihe
LE Laubbaumreihe einreihig, auch Teil einer Allee
LF Nadelbaumreihe
LG Kopfbaumreihe (falls luftbildsichtbar)
LH Baumgruppe, Feldgehölz aus Laubgehölzen
LK Baumgruppe, Feldgehölz aus Nadelgehölzen
LL Baumgruppe, Feldgehölz aus Laub- und Nadelgehölzen
LM Gehölzpflanzung, Böschungspflanzungen (vor allem Strauchpflanzungen an Verkehrsflächen, sonstige i.d.R. nicht standortgerechte Gehölzpflanzungen etc.)
LS Streuobstwiese, Streuobstbestände
LT Streuobstbrache
O Markanter Einzelbaum (nur im Außenbereich)

Strukturmerkmale der Gehölze

- to Hecke, Strauchreihe, Gebüsch mit Überhältern (Bäume)
+ Hecke, Strauchreihe, Gebüsch, artenreich
d Hecke, Strauchreihe, Gebüsch, dichter Bewuchs
l Hecke, Strauchreihe, Gebüsch, lockerer Bewuchs
Strukturmerkmale "+", "d", "l" werden vergeben, sobald die betreffenden Eigenschaften besonders ausgeprägt erscheinen.

- M Biotoptypen der Aufschüttungen und Abgrabungen

- MA Kies-, Sandgruben (und sonstiges Lockergestein)
MB Steinbrüche
MC Mülldeponie, geordnet
MD Bauschuttdeponie, wilde Deponie (ungeordnet)
ME Sandaufschüttungen, sonstige Aufschüttungen

- ab außer Betrieb
rn renaturiert
vf verfüllt

- R Biotoptypen der Ruderal- und Staudenfluren sowie Brachflächen

- RA Ruderal- und Staudenfluren trockenwarmer Standorte
RB Ruderal- und Staudenfluren mittlerer, frischer Standorte
RC Ruderal- und Staudenfluren feuchter Standorte

Strukturmerkmale der Ruderal- und Staudenfluren

Ehemalige Nutzung, Herkunft der Fläche (keine Angaben, falls nicht erkennbar)

- B Wildbebauung/gemischte Bauflächen
- C Gewerbe/Industrie
- D Verkehrsanlage bzw. Fläche
- E Grünanlage
- H Ackerbrachen und sonstige Segetalfluren
- M Aufschüttungen und Abgrabungen
- (v) Fläche mit beginnender (untergeordneter) Gehölzsukzession
- v ältere Brache mit fortgeschrittener Verbuschung
- b Fläche mit Einzelbäumen

keine Angabe = jüngeres Stadium mit vorherrschenden Stauden, Hochstauden und Gräsern ohne Verbuschung; bei sehr weit fortgeschrittener Sukzession werden zusammenhängende Gebüsche bzw. Vorwaldgebüsche entsprechend der Karteneinheit "L" erfasst.

S Vegetation naturnaher Feucht- und Nassstandorte

- SA Röhrichte, Röhrichtsümpfe
- SB Seggen- und Binsensümpfe
- SC Feuchte – Nasse Hochstaudenfluren
- SD Flachmoore
- SE Quellfluren (soweit luftbildsichtbar)

- v verbuscht
- b baumbestanden

T Trockenrasen, Heiden

- TA Trockene Heiden (Zwergstrauch- und Wacholderheide, sowie Besenginsterheiden)
- TB Kalktrockenrasen und Kalkhalbtrockenrasen
- TC Sand- und Silikattrockenrasen und –halbtrockenrasen
- TD Borstgrasrasen

- v verbuscht
- b baumbestanden

V Vegetationsfreie und –arme Standorte (naturnah)

- VA Felswand
- VD Sand, Lehm, Kiesflächen (unverdichtet)
- VE Stein- und Blockhaufen, Lesesteinhaufen etc.
- VF offenen Binnendüne

W Biotoptypen der Wälder

- WA Biotoptypen der Laubwälder (Rein- und Mischbestände)
- WB Biotoptypen der Mischwälder (aus Laub- und Nadelgehölzen)
- WC Biotoptypen der Nadelwälder (Nadel- und Nadelmischbestände)
- WD Biotoptypen der Auewälder (Hart- und Weichholzaue, Bachauewälder)
- WE Biotoptypen der Bruch- und Sumpfwälder
- WF Biotoptypen der Schattenhang- und Schluchtenwälder
- WG Biotoptypen der Wälder auf trockenwarmen, flachgründigen Standorten (Eschentrockenwälder, wärmeliebende Eichenmischwälder)
- WH Aufforstung (Baumart nicht erkennbar), auch Forstbaumschulen
- WK Kahlschlag, Schlagfluren
- WL Lichtung (krautige Vegetation)
- WW ausgeprägter Waldsaum
- WO Wildwiese, Wildacker

Strukturmerkmale der Wälder

Liste der Baumarten und –gattungen der Wälder

- B Birke
- Bu Buche
- Ei Eiche
- Er Erle
- Es Esche
- Fi Fichte
- Ki Kiefer
- Lä Lärche
- Pa Pappel
- Ro Robinie
- WeWeide
- Sl sonstige Laubgehölze, Edelaubhölzer (v.a. Ahorn, Linde, Hainbuche)
- Sn sonstige Nadelgehölze (z.B. Douglasie)

Altersklassen/Bestandsstruktur

- tn Naturverjüngung/Kultur
- ta Dickicht
- tb Stangenholz
- tc geringes bis mittleres Baumholz
- td starkes Baumholz
- te Altholz
- tg stark ungleichaltrig gestuft
- to Totholz

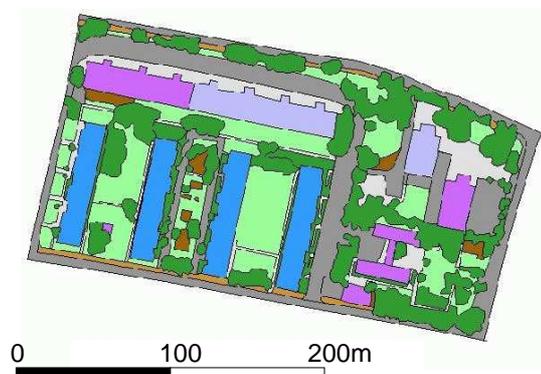
Die Angabe der Baumarten und –gattungen sowie der Altersklassen geschieht unter folgenden Prämissen:

1. Bei Reinbeständen einer Baumart wird nur diese angegeben
2. Bei Mischbeständen werden Hauptart(en) angegeben und die Nebenbaumarten in Klammern () aufgeführt
3. Es werden maximal 3 Baumarten aufgeführt.
4. Es werden nur die Baumarten aufgeführt, die luftbildsichtbar sind. So können z.B. Gehölze im Unterwuchs bei geschlossener Kronenschicht nicht angegeben werden.
5. Analog erfolgt die Angabe der Altersklassen. Es können nur die Altersklassen der luftbildsichtbaren Gehölze bestimmt werden.
6. Die Abgrenzung der naturnahen Waldgesellschaften (WD, WE, WF, WG) zu den forstwirtschaftlich geprägten Wäldern ist weitestgehend anhand der CIR-Luftbilder zu leisten. In Grenzfällen (kleinräumige Ausprägung etc.) wird eine Zuweisung nach der Zusammensetzung aus Laub- und Nadelgehölzen (WA, WB, WC) getroffen.

Legende der Manuelle Klassifizierung

	Ziegel		Beton
	Dachbeton		Asphalt
	Dachschiefer		Kopfsteinpflaster
	Metall		Splitt
	Dachbitumen		Laubbaum
	PVC		Rasen
	Polyethylen		Sand u. Kies
	Plexiglas		

Referenzgebiet 1



Referenzgebiet 2

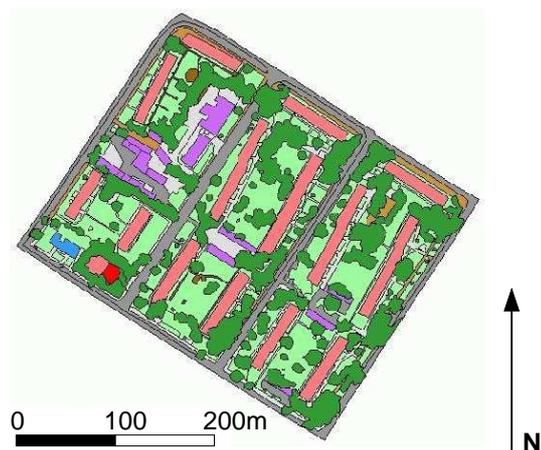


Abbildung A.1: Manuelle Klassifizierung von fünf flächendeckend erfaßten Referenzgebieten für die objektorientierte Genauigkeitsanalyse; Teil I

Referenzgebiet 3



Referenzgebiet 4



Referenzgebiet 5



Abbildung A.2: Manuelle Klassifizierung von 5 flächendeckend erfaßten Referenzgebieten für die objekt-orientierte Genauigkeitsanalyse; Teil II

Tabelle A.2: Ergebnisse der Gesamtflächenstatistik für alle Referenzgebiete

	Manuelle Klassifizierung	Entmischung mit spektraler Gebäudemasker	Entmischung mit externer Gebäudemasker
Ziegel	1.8	2.3	3.4
Betondachstein	2.5	2.6	1.9
Schiefer	0.2	0.0	0.5
Alu	1.7	1.3	2.1
Zink	1.4	0.8	1.0
Bitumen	12.9	11.1	14.3
PVC	2.3	2.9	2.9
Polyethylen	2.4	1.0	2.3
Plexiglas	3.7	3.3	3.3
Andere Dachmaterialien	0.1	0.0	0.1
Beton	7.9	1.3	1.0
Asphalt	19.7	21.7	18.3
Andere vollv. Materialien	0.0	0.2	0.1
Kopfsteinpflaster	4.5	4.6	3.9
Betonpflaster	0.0	0.6	0.8
Splitt	0.8	1.3	1.3
Andere teilversiegelte Materialien	0.0	0.1	0.1
Laubgehölze	19.2	14.3	13.8
Nadelgehölze	0.0	6.6	5.8
Rasen	16.0	13.0	12.8
Wiese	0.1	0.5	0.5
Brache	0.0	0.6	0.6
Sand	2.9	4.5	4.1
Boden	0.0	0.3	0.4
Schatten	0.0	4.6	4.5
zurückgewiesen	0.0	0.4	0.2
Summe	100.0	100.0	100.0

Referenzdaten SP-Ergebnis (Entmischungsergebnis mit spektraler Gebäudemasse)																								
	Ziegel	Betondachstein	Schiefer	Aluminium	Zink	Bitumen	PVC	Polyethylen	Plexiglas	Andere Dachmaterialien	Beton	Asphalt	Andere vollv. Materialien	Kopfsteinpflaster	Betonpflaster	Splitt	Andere teilv. Materialien	Laubgehölze	Nadelgehölze	Rasen	Wiese	Brache	Sand	Schatten
Ziegel	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Betondachstein	0,0	93,3	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	5,4	0,0	0,0	5,0	0,0
Schiefer	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aluminium	0,0	0,0	0,0	80,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	1,1	0,0	0,0	5,0	0,0
Zink	0,0	0,0	0,0	0,0	71,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bitumen	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	71,1	0,0	0,0	0,0	0,0	14,8	8,6	0,0	5,9	0,0	0,0	50,0	4,4	0,0	6,1	0,0	0,0	10,0	0,0
PVC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	2,5	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Polyethylen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	69,2	0,0	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Plexiglas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Andere Dachmaterialien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Beton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	4,9	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Asphalt	0,0	0,0	100,0	0,0	28,6	14,4	0,0	0,0	0,0	0,0	33,3	67,9	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	10,7	0,0	11,1	33,3	0,0	5,0	0,0
Andere vollv. Materialien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kopfsteinpflaster	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0
Betonpflaster	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Splitt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	100,0	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Andere teilv. Materialien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Laubgehölze	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	16,0	4,9	0,0	8,8	0,0	0,0	0,0	52,0	0,0	12,5	33,3	0,0	15,0	0,0
Nadelgehölze	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	4,9	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	7,1	0,0	9,6	0,0	0,0	5,0	0,0
Rasen	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	3,7	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	13,1	0,0	46,8	33,3	0,0	15,0	0,0
Wiese	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brache	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Sand	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	1,2	0,0	11,8	0,0	0,0	50,0	2,0	0,0	2,5	0,0	0,0	30,0	0,0
Schatten	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	2,5	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,4	0,0	0,0	5,0	0,0
Anzahl der Objekte	3	15	3	5	7	90	7	13	1	0	81	81	0	34	0	1	2	252	0	280	3	0	20	0
Treffergenauigkeit [%]	100,0	93,3	0,0	80,0	71,4	71,1	100,0	69,2	100,0		4,9	67,9		0,0		100,0	0,0	52,0		46,8	0,0		30,0	

Abbildung A.3: Trefferstatistik - Vergleich der Referenzdaten mit dem SP-Ergebnis (Entmischung unter Verwendung der spektralen Gebäudemasse)

EX-Ergebnis (Entmischungsergebnis mit externer Gebäudemasse)	Referenzdaten																						
	Ziegel	Betondachstein	Schiefer	Aluminium	Zink	Bitumen	PVC	Polyethylen	Plexiglas	Beton	Asphalt	Andere vollv. Materialien	Kopfsteinpflaster	Betonpflaster	Splitt	Andere teilv. Materialien	Laubgehölze	Nadelgehölze	Rasen	Wiese	Brache	Sand	Schatten
Ziegel	66,7	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Betondachstein	33,3	66,7	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	7,7	0,0	4,9	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,4	0,0	0,0	10,0	0,0
Schiefer	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	1,2	1,2	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aluminium	0,0	0,0	0,0	60,0	0,0	2,2	0,0	7,7	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Zink	0,0	0,0	0,0	0,0	57,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bitumen	0,0	20,0	66,7	20,0	14,3	72,2	14,3	7,7	0,0	16,0	3,7	0,0	14,7	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0
PVC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	71,4	0,0	0,0	2,5	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Polyethylen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,2	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Plexiglas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Beton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,3	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Asphalt	0,0	0,0	33,3	0,0	14,3	13,3	0,0	0,0	0,0	28,4	65,4	0,0	29,4	0,0	0,0	0,0	12,7	0,0	10,0	33,3	0,0	15,0	0,0
Andere vollv. Materialien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kopfsteinpflaster	0,0	0,0	0,0	0,0	14,3	1,1	0,0	0,0	0,0	7,4	6,2	0,0	14,7	0,0	0,0	50,0	2,0	0,0	3,2	0,0	0,0	10,0	0,0
Betonpflaster	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Splitt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1,1	0,0	0,0	10,0	0,0
Andere teilv. Materialien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Laubgehölze	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	7,7	0,0	12,3	4,9	0,0	11,8	0,0	0,0	0,0	50,8	0,0	12,5	33,3	0,0	10,0	0,0
Nadelgehölze	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	4,9	4,9	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	6,3	0,0	13,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Rasen	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	6,2	3,7	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	11,1	0,0	43,9	33,3	0,0	15,0	0,0
Wiese	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brache	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	0,4	0,0	0,0	5,0	0,0
Sand	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	1,2	0,0	11,8	0,0	100,0	0,0	2,4	0,0	1,8	0,0	0,0	20,0	0,0
Schatten	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	3,7	3,7	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	2,1	0,0	0,0	5,0	0,0
Anzahl der Objekte	3	15	3	5	7	90	7	13	1	81	81	0	34	0	1	2	252	0	280	3	0	20	0
Treffergenauigkeit [%]	66,7	66,7	0,0	60,0	57,1	72,2	71,4	46,2	100,0	0,0	65,4		14,7		0,0	0,0	50,8		43,9	0,0		20,0	

Abbildung A.4: Trefferstatistik - Vergleich der Referenzdaten mit dem EX-Ergebnis (Entmischung unter Verwendung der externen Gebäudemasse)

B

Karten

Karte [B.1](#): Untersuchungsgebiet in Dresden und ausgewählte Stadtteile

Karte [B.2](#): Stadtbiotopkartierung Dresden

Karte [B.3](#): Hyperspektrale HyMap-Daten

Karte [B.4](#): Ergebnis der fernerkundlichen Oberflächenidentifizierung

Karte [B.5](#): Versiegelungsgrade im Vergleich

Karte [B.6](#): Gewichteter Versiegelungsgrad

Karte [B.7](#): Bebauungsgrad

Karte [B.8](#): Vegetationsdeckungsgrad

Karte [B.9](#): Überschirmungsgrad

Karte [B.10](#): Gesamtvegetationsgrad

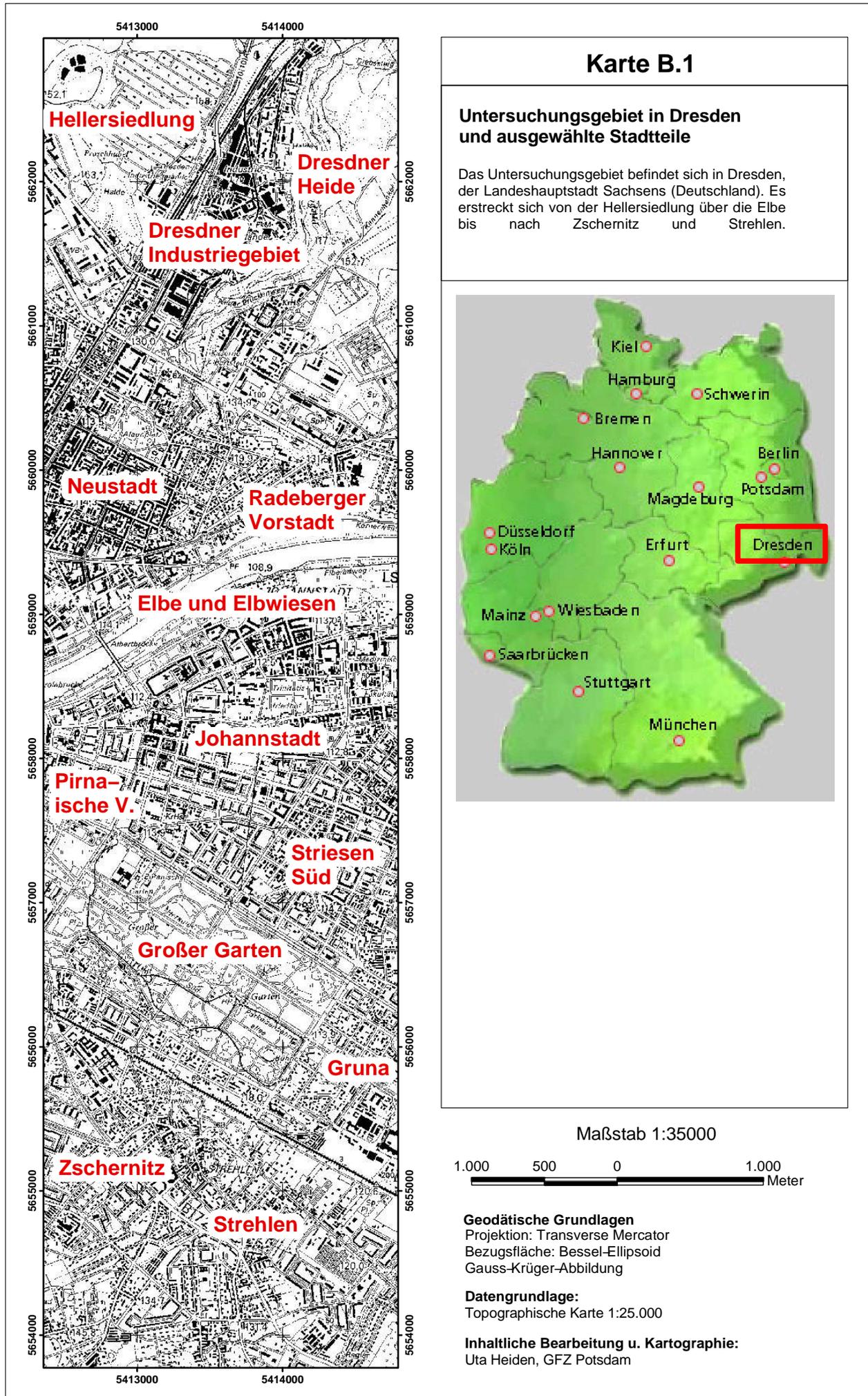


Abbildung B.1: Topographische Karte des Untersuchungsgebietes

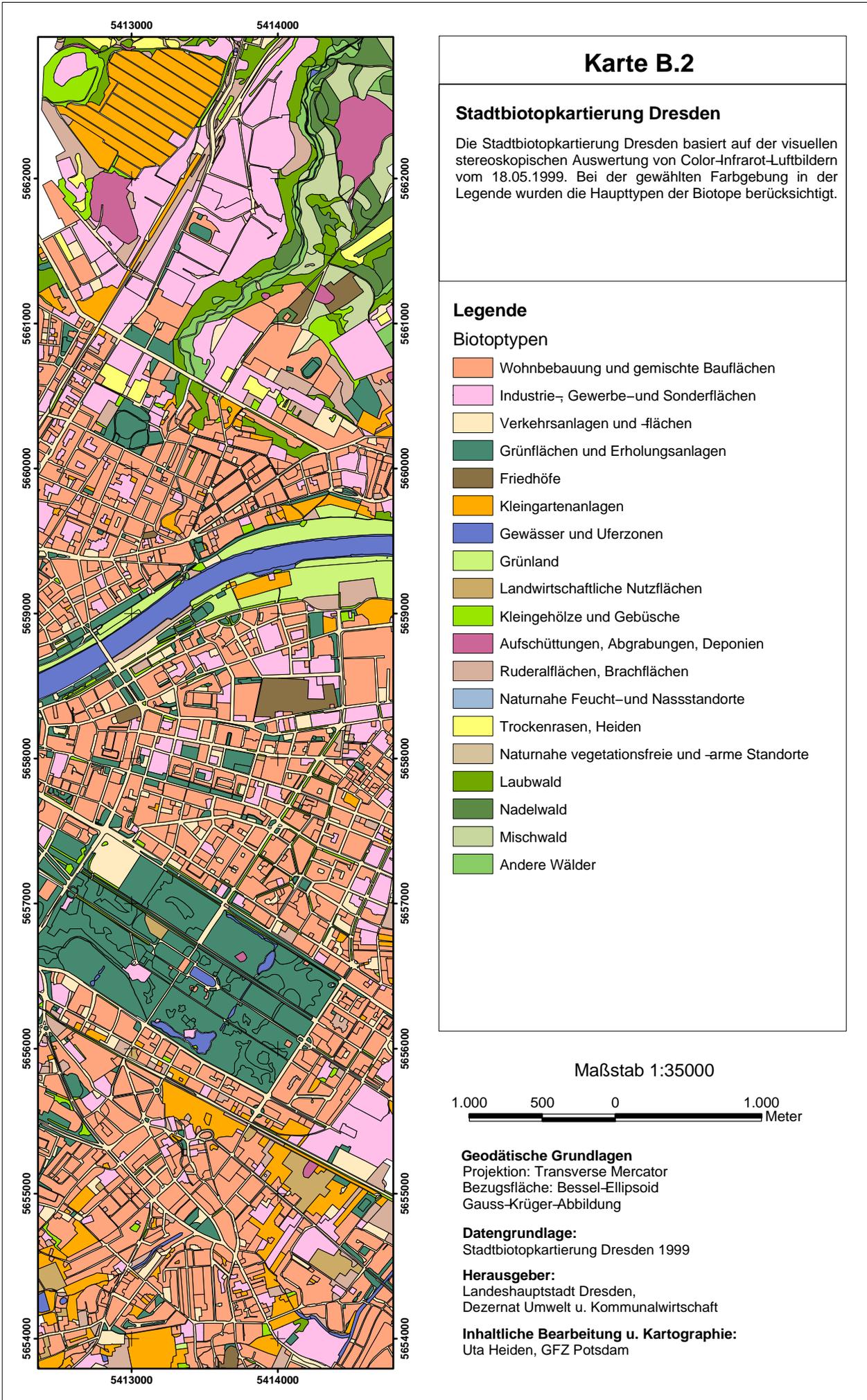


Abbildung B.2: Stadtbiotopkartierung Dresden

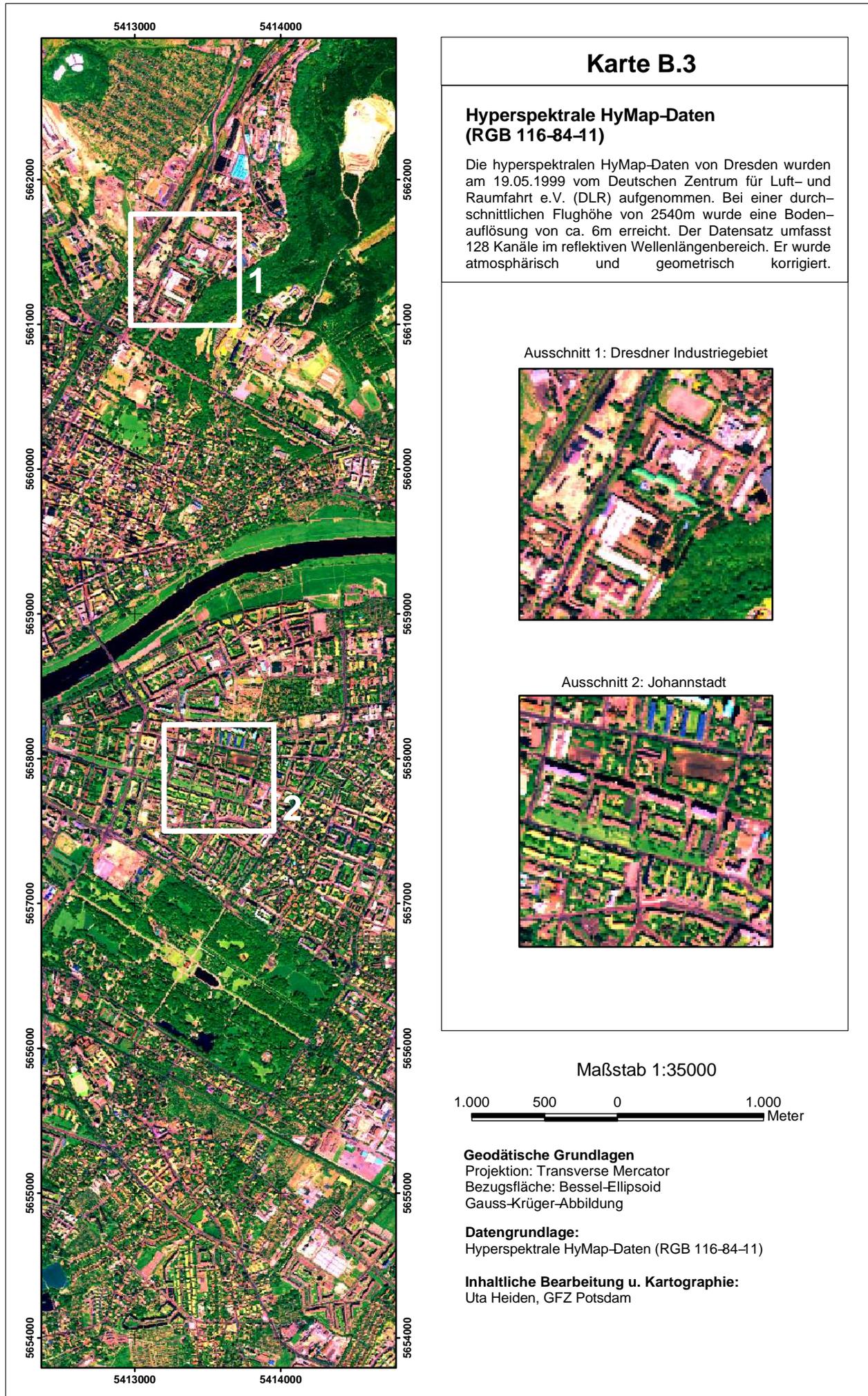


Abbildung B.3: Hyperspektrale HyMap-Daten

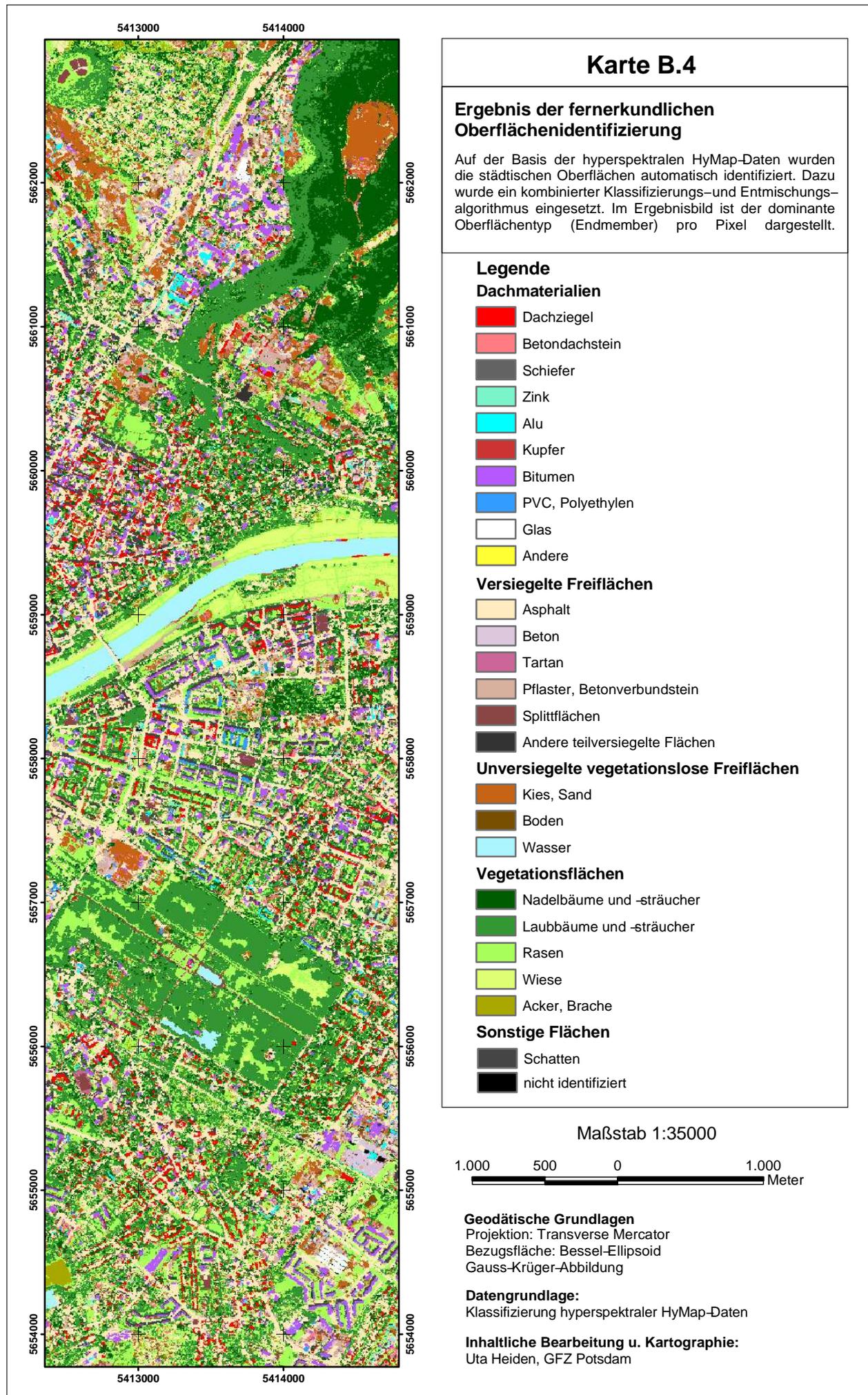


Abbildung B.4: Entmischungsergebnisse (dominierender Endmember)

Karte B.5

Versiegelungsgrade im Vergleich

Der Versiegelungsgrad der Stadtbiotopkartierung wird auf einer fünfstufigen Skala visuell auf der Grundlage von CIR-Luftbildern geschätzt. Im Vergleich dazu steht der ungewichtete Versiegelungsgrad, welcher auf der Basis der fernerkundlich erfassten Oberflächenmaterialien errechnet wurde.

Geodätische Grundlagen

Projektion: Transverse Mercator
Bezugsfläche: Bessel-Ellipsoid
Gauss-Krüger-Abbildung

Datengrundlage:

Stadtbiotopkartierung Dresden 1999

Herausgeber:

Landeshauptstadt Dresden,
Dezernat Umwelt u. Kommunalwirtschaft

Inhaltliche Bearbeitung u. Kartographie:

Uta Heiden, GFZ Potsdam

VG – Stadtbiotopkartierung

VG – HyMap

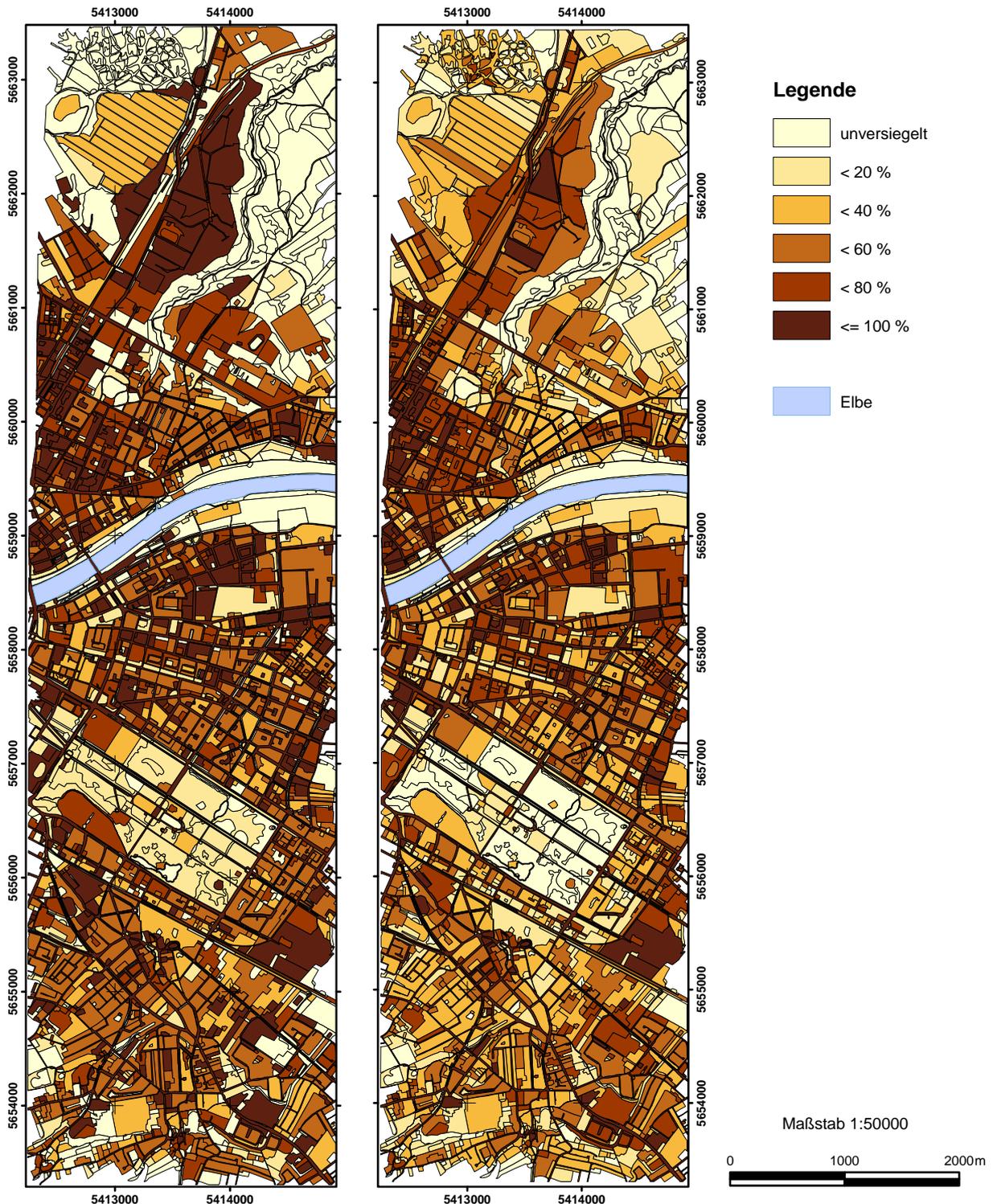


Abbildung B.5: Versiegelungsgrade im Vergleich

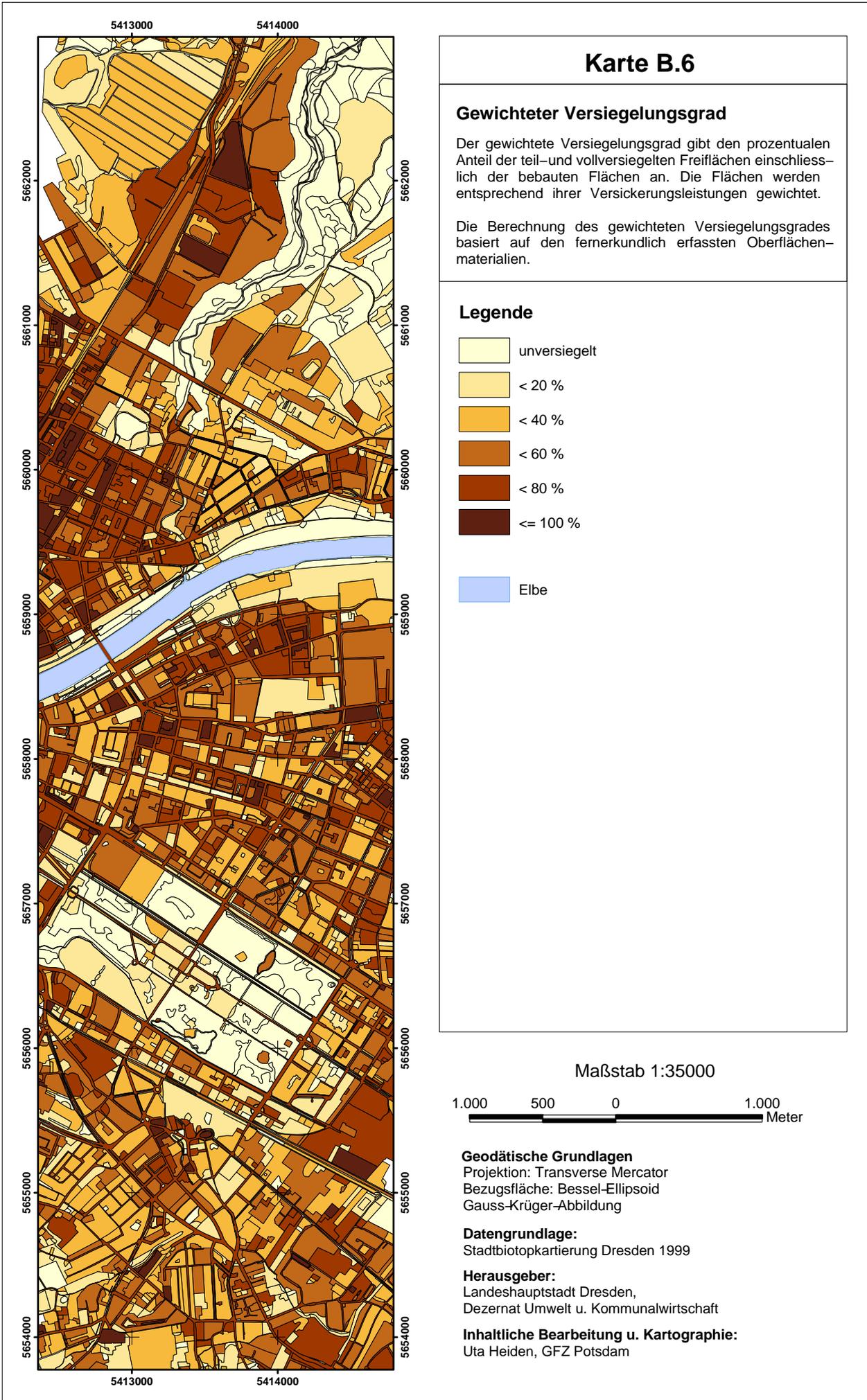


Abbildung B.6: Gewichteter Versiegelungsgrad

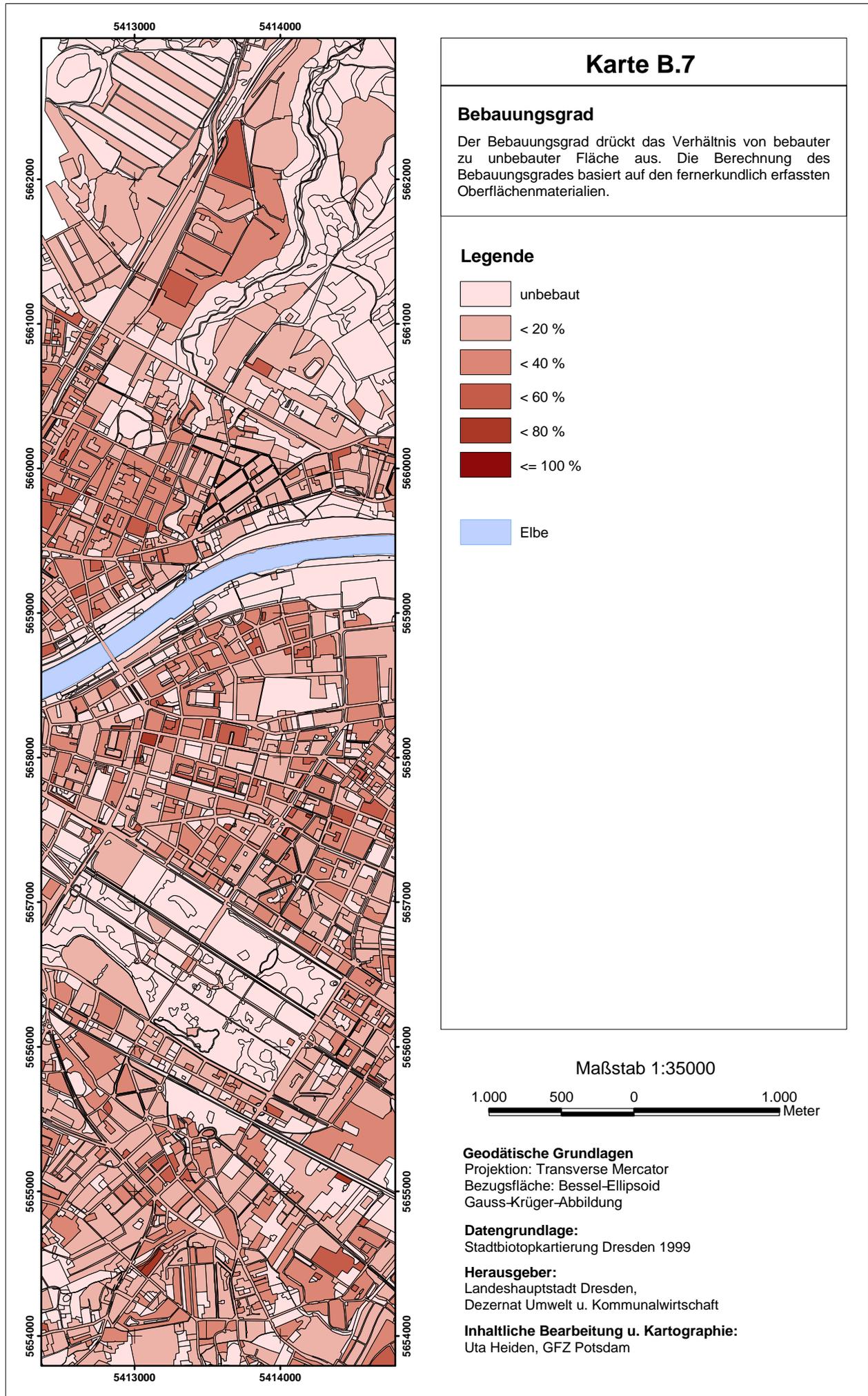


Abbildung B.7: Bebauungsgrad

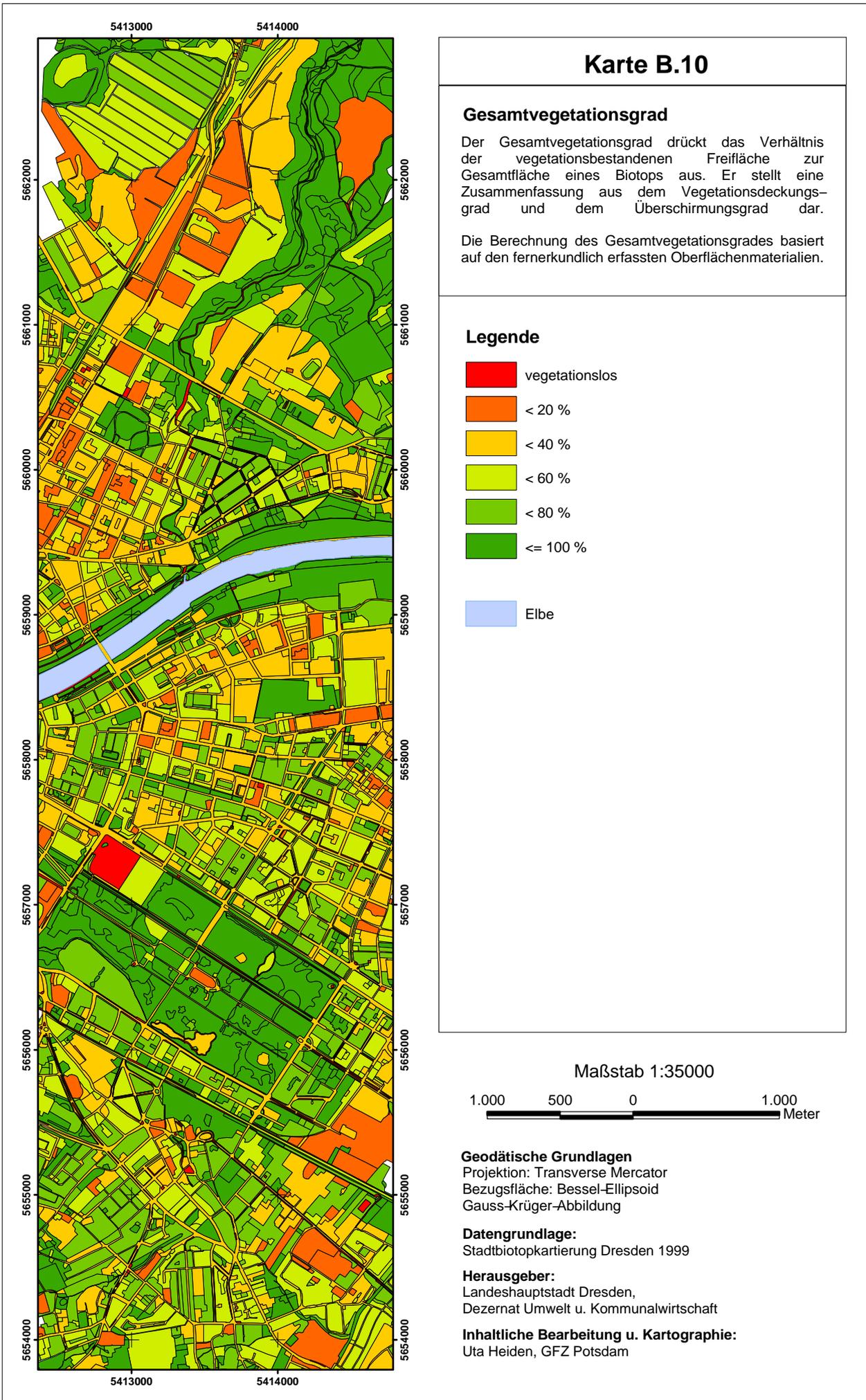


Abbildung B.10: Gesamtvegetationsgrad

Literaturverzeichnis

- Arbeitskreis CIR-Bildflug (1995). Systematik der Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung (Kartieranleitung); Standard-Biotoptypen und Nutzungstypen für die CIR-Luftbild-gestützte Biotoptypen und Nutzungstypenkartierung für die Bundesrepublik Deutschland. Technischer Bericht, Bundesamt für Naturschutz.
- Aronoff, S. (1982). Classification accuracy: A user approach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **48**, 1299–1307.
- ATV-DVWK-A-138 (2002). Arbeitsblatt 138. Technischer Bericht, Fachverbände „Abwasser- und abfalltechnische Vereinigung“ und „Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall“ (ATV-DVWK).
- Bähr, H.P., Quint, F. & Stilla, U. (1995). Modellbasierte Verfahren der Luftbildanalyse zur Kartenfortführung. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, **6**, 224–234.
- Bastian, O. & Schreiber, K.F., Hrsg. (1999). *Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft*. Gustav Fischer.
- Ben-Dor, E., Levin, N. & Saaroni, H. (1998). Utilization of imaging spectroscopy in urban areas: A case study over Tel-Aviv, Israel using the CASI sensor. 1. *EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy in Zürich*, 473–479.
- Bhaskaran, S. & Datt, B. (2000). Sub-pixel analysis of urban surface materials. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium in Honolulu*.
- Bierhals, E. (1988). CIR-Luftbilder für die flächendeckende Biotopkartierung. *Informationsdienst Niedersachsen* 5, **8**, 77–104.
- Bill, R. & Fritsch, D., Hrsg. (1991). *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*. Wichmann.
- Breuste, J., Keidel, T., Meinel, G., Münchow, B., Netzband, M. & Schramm, M. (1996). Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen. Technischer Bericht, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH.
- Campbell, J.B. (1996). *Introduction to remote sensing*. Taylor and Francis, London.
- Chabrillat, S., Goetz, A., Krosley, L. & Olsen, H.W. (2002). Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, **82**, 431–445.
- Clark, R.N. (1999). *Remote sensing for the earth science: Manual of remote sensing*, Kap. 1, 3–52. John Wiley and Sons Inc.
- Clark, R.N. & Roush, T.L. (1984). Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 6329–6340.

- Cloutis, E.A. (1996). Hyperspectral geological remote sensing: Evaluation of analytical techniques. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 2215–2242.
- Cocks, T., Jenssen, R., Stewart, A., Wilson, I. & Shields, T. (1998). The HyMapTM airborne hyperspectral sensor: The system, calibration and performance. In *Proceedings of the 1th EARSel Workshop in Zürich*, 37–42.
- Congalton, R.G., Oderwald, R.G. & Mead, R.A. (1983). Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **49**, 1671–1678.
- Couloigner, I. & Ranchin, T. (2000). Mapping of urban areas: A multiresolution modeling approach for semi-automatic extraction of streets. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **66**, 867–874.
- Dave, J.V. (1980). Effect of atmospheric conditions on remote sensing of a surface non-homogeneity. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **46**, 1173–1180.
- Dubuisson-Jolly, M.P. & Gupta, A. (2000). Color and texture fusion: Application to aerial image segmentation and GIS updating. *Image and Vision Computing*, **18**, 823–832.
- Eibl, B., Bach, H. & Mauser, W. (1996). Classification of a Landsat-TM image with the spectral mixture analysis under the application of field spectroscopy. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **31**, 226–231.
- ESRI (1994a). *Cell-based modelling with GRID*. Environmental Systems Research Institute, Inc., 7. Aufl.
- ESRI (1994b). *Understanding GIS - The ARC/INFO method*. Environmental Systems Research Institute, Inc., 7. Aufl.
- Europäische Kommission (2003). GALILEO - Europäisches Satellitennavigationssystem. URL: http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_de.htm, Zugriff: 06/2003.
- Förster, S. (2002). Ableitung und Analyse stadtklimatologisch relevanter Parameter auf der Basis von hyperspektralen Flugzeugscannerdaten am Beispiel der Stadt Potsdam. Technischer Bericht, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Gao, B.C. & Goetz, A.F.H. (1995). Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, **52**, 155–162.
- Grün, A., Baltsavias, E.P. & Henricsson, O., Hrsg. (1997). *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*. Basel, Switzerland.
- Grünflächenamt Dresden (1998). Landschaftsplan - Teil 1; Erläuterungsbericht, Bestandserfassung und -bewertung. Technischer Bericht, Landeshauptstadt Dresden, Dezernat Umwelt und Kommunalwirtschaft.
- Halounova, L. (1994). Application of remote sensing in classification of urban area surfaces for rainfall runoff modelling. *Hydroinformatics Proceedings, Delft, Netherlands*, **1**, 69–74.
- Hapke, B. (1993). *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. Cambridge University Press.

- Heber, B. & Lehmann, I. (1993). Stadtstrukturelle Orientierungswerte für die Bodenversiegelung in Wohngebieten. Technischer Bericht, Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. Dresden.
- Hiese, W., Hrsg. (1999). *Baustoffkenntnis*. Werner Verlag.
- Hilditch, C.J. (1969). *Machine Intelligence*, Vol. 4, Kap. 22: Linear skeletons from square cupboards, 403–420. Elsevier.
- Hook, S.J. (1998). ASTER spectral library. URL: <http://speclib.jpl.nasa.gov>, Zugriff: 07/2001.
- Huguenin, R.L., Karaska, M.A., Blaricom, D.V. & Jensen, J.R. (1997). Subpixel classification of bald cypress and tupelo gum trees in Thematic Mapper imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **63**, 717–725.
- Hunt, G.R. (1977). Spectral signature of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, **42**, 505–513.
- Hunt, G.R. & Salisbury, J.W. (1970). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals. *Modern Geology*, **1**, 283–300.
- Jensen, J., Cowen, D., Halls, J., Narumalani, S., Schmidt, N., Davis, B. & Burgess, B. (1994). Improved urban infrastructure mapping and forecasting for Bellsouth using remote sensing and GIS technology. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **60**, 339–346.
- Ji, M. & Jensen, J.R. (1999). Effectiveness of subpixel analysis in detecting and quantifying urban imperviousness from Landsat Thematic Mapper imagery. *Geocarto International*, **14**, 31–39.
- Kaufmann, H. (2002). ARES - Ein neuer Hyperspektralsensor für die Umweltbeobachtung. 19. DFD-Nutzerseminar (Oberpfaffenhofen 2002), veröffentlicht auf CD.
- Kenneweg, H. (1996). Biotopkartierung mit CIR-Luftbildern in den neuen Bundesländern. *AFZ-DerWald*, **2**, 84–85.
- Kondratyev, K.Y. & Filatov, N.N. (1999). *Limnology and remote sensing - a contemporary approach*. Springer and Praxis Publishing Chichester, UK.
- Kraus, K. & Schneider, W. (1988). *Fernerkundung*. Ferd. Dümmlers Verlag Bonn.
- Krause, K.H. (1989). Zur Erfassung der Oberflächen für eine stadtökologische Zustandsbeschreibung. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften*, **14**, 124–130.
- Kressler, F. & Steinocher, K. (1996). Change detection in urban areas using satellite images and spectral mixture analysis. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **31**, 379–383.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., Lefkoff, A.B., Young, J.M., Kierein-Young, K.S., Cocks, T.D., Jansen, R. & Cocks, P.A. (2000). HyMap: An Australian hyperspectral sensor solving global problems - results from USA HyMap data acquisitions. In *Proceedings of the 10th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference in Adelaide, Australia, published on CD-ROM*.

- Lawrence, W.T., Williams, D.L., Ranson, K.J., Irons, J.R. & Walthall, C.L. (1994). Comparative analysis of data acquired by three narrow-band airborne spectroradiometers over subboreal vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **47**, 204–215.
- Lehmann, F. (2003). The potential of digital stereo camera data for the data interpretation and analyses of hyperspectral data. In *Proceedings of the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Oberpfaffenhofen, Germany*.
- Leone, A.P. & Sommer, S. (2000). Multivariate analysis of laboratory spectra for the assessment of soil development and soil degradation in the Southern Apennines (Italy). *Remote Sensing of Environment*, **72**, 346–359.
- Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W. (1994). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley and Sons, Inc.
- Lo, C.P. (1997). Application of Landsat TM data for quality of life assessment in urban environment. *Computers, Environment and Urban Systems*, **21**, 259–276.
- Mather, P.M. (1999). *Computer processing of remotely-sensed images. An introduction*. John Wiley and Sons, Inc.
- Meinel, G. & Netzband, M. (1997). Erarbeitung von Übersichtskarten zur Versiegelungsintensität. Forschungsabschlußbericht. Technischer Bericht, Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
- Meinel, G., Neubert, M. & Reder, J. (2001). The potential use of very high resolution satellite data for urban areas - first experiences with IKONOS data, their classification and application in urban planning and environmental monitoring. In *2nd International Symposium of Remote Sensing of Urban Areas in Regensburg, Germany, published on CD-ROM*.
- Mueller, M. & Segl, K. (2001). House detection in IKONOS data using region and edge based segmentation. In *SPIE, International Society for Optical Engineering*, 500–507.
- Mueller, M. & Segl, K. (2002). Fuzzy information fusion for the extraction of urban features based on HRSC data. In *SPIE, 9th Symposium on Remote Sensing - Image and Signal Processing for Remote Sensing VIII*, Vol. 4885, 152–161.
- Ormsby, J.P. (1992). Evaluation of natural and man-made features using Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, **13**, 303–318.
- Pearce, J.C. (1977). A study of the effect of the atmosphere on Thematic Mapper observations. *NASA Contract*, **NAS5-23639**.
- Pieters, C.M. & Englert, P.A.J. (1993). *Remote geochemical analysis: Elemental and mineralogical composition*. Cambridge University Press.
- Pohl, W. (1991). Werte für die Landschafts- und Bauleitplanung, Bodenfunktionszahl - Grünvolumenzahl. *NNA-Mitteilungen*, **4**, 2–6.
- Richter, R. (1996). A spatially adaptive atmospheric correction algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 1201–1214.

- Ringle, K. & Sties, M. (1997). Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung der Oberflächenbeschreibung besiedelter Gebiete für die Modellierung des Schmutzwassereintrags in das Abwasserkanalnetz. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31, 589–593.
- Roessner, S., Segl, K., Heiden, U. & Kaufmann, H. (2001). Automated differentiation of urban surfaces based on airborne hyperspectral imagery. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 1525–1532.
- Rose, H. (1991). Der KÖP-Wert in der ökologisch orientierten Stadtplanung. Zur Bewertung umweltrelevanter Faktoren im Rahmen der kommunalen Umweltverträglichkeitsprüfung. *Mannheimer Geographische Arbeiten*, **33**.
- Sanders, L.C., Schott, J.R. & Raqueño, R. (2001). A VNIR/SWIR atmospheric correction algorithm for hyperspectral imagery with adjacency effect. *Remote Sensing of Environment*, **78**, 252–263.
- Sandtner, M. (1998). Die Erfassung von städtischen Oberflächen mittels EDV-gestützter Luftbildauswertung. *Geographica Helvetica*.
- Scholten, F., Gwinner, K., Tauch, R. & Boulgakova, O. (2003). HRSC-AX - High resolution orthoimages and digital surface models for urban regions. In *Proceedings of the 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas in Berlin*.
- Schowengerdt, R.A., Hrsg. (1997). *Remote sensing - Models and methods for image processing*. Academic Press.
- Schröter, W., Lautenschläger, K.H., Bibrack, H. & Schnabel, A., Hrsg. (1985). *Chemie. Nachschlagewörter für Grundlagenfächer*. VEB Fachbuchverlag Leipzig.
- Segl, K. & Kaufmann, H. (2001). Detection of small objects from high resolution panchromatic satellite imagery based on supervised image segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 2080–2083.
- Segl, K. & Roessner, S. (1999). Pixeloriented selection of endmember combinations for linear stochastic spectral unmixing applied to urban environments. In *SPIE Proceedings, Denver, USA*, 327–338.
- Segl, K., Heiden, U., Mueller, M. & Kaufmann, H. (2003a). Endmember detection in urban environments using hyperspectral HyMap data. In *Proceedings of the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Oberpfaffenhofen, Germany*.
- Segl, K., Roessner, S., Heiden, U. & Kaufmann, H. (2003b). Fusion of spectral and shape features for identification of urban surface cover types using reflective and thermal hyperspectral data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **58**, 99–112.
- Sties, M. (1997). Auswertung von Flugzeugscanner-Bilddaten für die Kartierung von Oberflächenstrukturen besiedelter Gebiete. *Regensburger Geographische Schriften*, **28**, 75–83.
- Stormont, J. (2003). Earth Observing 1 (EO-1) Remote Sensing Satellite. <http://eo1.usgs.gov>, Zugriff: 04/2003.

- Stuckens, J., Coppin, P.R. & Bauer, M.E. (2000). Integrating contextual information with per-pixel classification for improved land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, **71**, 282–296.
- Sukopp, H., Blume, R.W.H.P., Eikmann, T., Fritsche, U., Gebhard, U., Hampicke, U., Klausnitzer, B., Kuttler, W., Lichtenberger, E., Mackensen, R., Renger, M., Schuhmacher, H. & Simon, K.H. (1998). *Stadtökologie*. Gustav Fischer Verlag Stuttgart.
- Tatem, A.J., Lewis, H.G., Atkinson, P.M. & Nixon, M.S. (2001). Multiple-class land-cover mapping at the sub-pixel scale using a hopfield neural network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **3**, 184–190.
- Thiemann, S. & Kaufmann, H. (2002). Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data - A multitemporal approach. *Remote Sensing of Environment*, **81**, 228–237.
- USGS (2003). USGS Spectroscopy Lab - Spectral Library. <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>, Zugriff: 01/2003.
- Walter-Shea, E.A. & Norman, J.M. (1991). *Photon-vegetation interactions*, Kap. 8, 230–251. Springer Verlag.
- Wharton, S.W. (1987). A spectral-knowledge-based approach for urban land-cover discrimination. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, **3**, 272–282.
- Wilson, I.J. & Cocks, T.D. (2003). Development of the airborne reflective emissive spectrometer (ARES) - a progress report. In *Proceedings of the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Oberpfaffenhofen, Germany*.

Dank

Die vorliegende Dissertation entstand am GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) in der Sektion 1.4 - Fernerkundung. Mein besonderer Dank gilt daher dem Leiter der Sektion, Prof. Dr. Hermann Kaufmann, der mir sowohl die Durchführung dieser Arbeit als auch die Präsentation meiner Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen ermöglichte. Desweiteren danke ich ihm für die Begutachtung der Arbeit.

Prof. Dr. Hartmut Kenneweg von der Technischen Universität Berlin danke ich für seine Initiative, die Dissertation fachlich zu begleiten. Desweiteren sei ihm für die Übernahme des Erstgutachtens gedankt.

Das Grünflächenamt Dresden stellte für die Dissertation freundlicherweise die Stadtbiotopkartierung von Dresden, CIR-Luftbilder und Ortholuftbilder zur Verfügung. Im Besonderen möchte ich Sebastian Schmidt vom Grünflächenamt Dresden danken, der mir jederzeit hilfreiche und wichtige Anregungen aus der stadtplanerischen Praxis gab.

Dem DLR Oberpfaffenhofen sei für die Bereitstellung der HyMap-Daten und für die Möglichkeit zur geometrischen und atmosphärischen Korrektur der Daten gedankt. Mein herzlicher Dank gilt dabei Andreas Müller, Dr. Rolf Richter und Andrea Haushold.

Dr. Sigrid Roessner möchte ich meinen besonderen Dank aussprechen. Durch sie bin ich von der Thematik der hyperspektralen Fernerkundung in Städten in teilweise sehr lebhafter Form begeistert und jederzeit unterstützt worden. Dr. Karl Segl danke ich für die Entwicklung des Identifizierungsalgorithmus und der vielen anderen „kleineren“ Programme. Als sehr unterstützend habe ich die entspannenden Gespräche von hoch und fernab gelegenen Regionen dieser Erde und die vielen sportlichen Aktivitäten zwischendurch wie Liegestütze und Türrahmenklimmzüge empfunden.

Herzlichen Dank an meine Kollegen der Sektion 1.4, die mit ihrer Hilfs- und Diskussionsbereitschaft sowie der freundschaftlichen Atmosphäre wesentlich zum Gelingen der Arbeit beitrugen. Ich danke Martin Schodlok für die Unterstützung bei der Feldkampagne in Dresden und wünsche ihm alle Kraft für das Gelingen seiner Arbeit. Ebenfalls möchte ich mich bei Saskia Förster bedanken, die mich durch Fragen bezüglich ihrer Diplomarbeit immer wieder auf frische Gedanken brachte.

Ich möchte mich bei allen Korrekturlesern und anderen Beteiligten für die aufgebrauchte Zeit und Nerven bedanken: Tilo Schnur für die Durchsicht aller Kapitel und für die zahlreichen Diskussionsabende, Cornelia Weinreich für die professionelle Rechtschreib- und Grammatikkontrolle, Gunnar Prade für das Aufspüren logischer Fehler, meinem Bruder Erik für die Korrektur der vielen kleinen Fehler und die spontanen Feldbegehungen und Haiko Tschörner für die unkomplizierte Bereitstellung der Dachmaterialien.

Ich danke meinen Eltern für ihre vielseitige Unterstützung auf dem gesamten Wege meiner schulischen und universitären Ausbildung. Tilo danke ich für die erholsame und schöne Zeit abseits der Rechentechnik.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die von mir eingereichte Dissertation zum Thema

„Analyse hyperspektraler Flugzeugscannerdaten zur ökologischen Charakterisierung städtischer Biotope“

selbständig und nur unter Benutzung der in der Arbeit angegebenen Literatur und sonstigen Quellen angefertigt wurde.

Potsdam, 20.12.2003

Lebenslauf

Name: Uta Heiden
Geburtsdatum: 10.08.1973
Geburtsort: Cottbus (Brandenburg)
Nationalität: Deutsch
Familienstand: ledig
E-Mail: heiden@gfz-potsdam.de
utaheiden@gmx.de

Schulen:	1980-1990	Polytechnische Oberschule in Cottbus
	1990-1992	Erweiterte Oberschule in Cottbus
	1992	Abschluss: Abitur
Studium:	1992-1999	Studium der Geoökologie an der Universität Potsdam, Nebenfach Naturschutz
	1999	Abschluss: Diplom-Geoökologin
Anstellungen	2000-2003	Doktorandin am GeoForschungsZentrum Potsdam, Sektion Fernerkundung
	seit 2004	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am GeoForschungs- Zentrum Potsdam, Sektion Fernerkundung