

**Fernerkundung und GIS zur Erfassung, Modellierung und
Visualisierung orientalischer Stadtstrukturen:
Das Beispiel Sanaa (Jemen)**

**Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)**

**in der Wissenschaftsdisziplin
Fernerkundung, Kartographie und Geoinformatik**

**eingereicht an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Potsdam**

**von
Abdlhamed Jamil**

Berlin, Juni 2010

Gedruckt mit freundlicher Unterstützung der Universität Potsdam.

Bibliografische Information der *Deutschen Nationalbibliothek*

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-86664-890-6

Zugl.: Potsdam, Univ., Diss., 2010

Dissertation, Universität Potsdam - Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen, usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

This document is protected by copyright law.

No part of this document may be reproduced in any form by any means without prior written authorization of the publisher.

Alle Rechte vorbehalten | all rights reserved

© Mensch und Buch Verlag

2010 Choriner Str. 85 - 10119 Berlin

verlag@menschundbuch.de – www.menschundbuch.de

Online veröffentlicht auf dem

Publikationsserver der Universität Potsdam:

URL <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2011/5020/>

URN <urn:nbn:de:kobv:517-opus-50200>

<http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus-50200>

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	X
Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole.....	XI
Danksagung.....	XIII
1 Einführung	1
2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	3
2.1 Zielsetzung.....	3
2.2 Aufbau.....	5
2.3 Konventionen	5
3 Forschungsstand der Fernerkundung urbaner Strukturen in ariden Räumen und Stadtmodellierung	6
4 Grundlagen der optischen Fernerkundung.....	10
4.1 Elektromagnetisches Spektrum und Arbeitsbereiche optischer Fernerkundung	10
4.2 Das QuickBird-Satellitensystem	11
4.3 Spektralverhalten ausgewählter Oberflächen arider Räume	13
4.4 Zusammenfassung	18
5 Datengrundlagen	19
5.1 Untersuchungsgebiet	19
5.1.1 Sanaa: Abriss der historischen, demographischen und wirtschaftlichen Entwicklung	20
5.1.2 Struktur der Stadt Sanaa	22
5.2 Datengrundlagen	30
5.3 Soft- und Hardwaresysteme	33
5.4 Zusammenfassung	33

6	Methoden und Verfahren	34
6.1	Bildverarbeitungsverfahren.....	34
6.1.1	Geometrische Rektifizierung.....	34
6.1.2	Atmosphärische Korrektur	35
6.1.3	Bildverbesserungsmethoden	36
6.2	Klassifikation des Untersuchungsgebietes	36
6.2.1	Klasseneinteilung	36
6.2.2	Pixelbezogene Klassifikation	42
6.2.2.1	Pixelbezogene Klassifikation auf Bildebene	42
6.2.2.2	Pixelbezogene Klassifikation auf Klassenebene	44
6.2.3	Objektbasierte Klassifikation.....	45
6.2.3.1	Segmentierung	45
6.2.3.2	Klassifikation.....	47
6.2.4	Nachbearbeitung der Klassifikationsergebnisse	48
6.2.5	Validierung der Klassifikationsergebnisse	51
6.3	Erfassung der Stadtstruktur durch Zusatzinformationen.....	54
6.3.1	Aufbereitung der topographischen Daten	54
6.3.2	Texturorientierte Verfahren.....	54
6.3.3	Kantenorientierte Verfahren.....	55
6.3.4	Gebäudegrundrisskarte	57
6.3.5	Erstellen des Digitalen Geländemodells (DGM)	57
6.3.6	Vegetationsdedektion	57
6.4	Regeln für die Ableitung eines funktionalen Stadtmodells	58
6.5	Verfahren zur Erfassung der Struktur einer orientalischen Stadt und ihre Darstellung in 2D/3D-Stadtkarten	59
6.6	Visuelle Bildinterpretation	61
6.7	Zusammenfassung	63
7	Zusammenstellung und Validierung der Auswertungsergebnisse.....	65
7.1	Ergebnisse der Bildverarbeitung.....	65
7.1.1	Ergebnisse der Bildverbesserungsmethoden	65
7.1.2	Ergebnisse der texturorientierten Verfahren	67
7.1.3	Ergebnisse der kantenorientierten Verfahren	72
7.1.4	Ergebnisse der Vegetationsdetektion	75
7.1.5	Ergebnisse der Klassifikationsverfahren und ihre Validierung	76
7.1.5.1	Klasse <i>Vegetation</i>	76
7.1.5.2	Klasse <i>Straßen</i>	79
7.1.5.3	Klasse <i>Gebäude</i>	83
7.1.5.4	Klasse <i>Brachflächen</i>	86
7.1.6	Anwendung der Entscheidungsregeln	87
7.1.7	Visuelle Auswertung des von den Klassifikationsergebnissen erstellten 2D-Stadtmodells.....	88

7.2	Ergebnisse der visuellen Interpretation der Satellitenbilddaten	90
7.2.1	Kenndaten der Interpretation	90
7.2.2	Visuelle Auswertung	91
7.2.2.1	Großbereich A: Altstadt, Kernbereich	91
7.2.2.2	Großbereich B: ehemalige Garten- und Vorstadtquartiere	95
7.2.2.3	Großbereich C: Stadterweiterungen nach 1970	97
7.3	Visuelle Auswertung des fusionierten 2D-Stadtmodells.....	102
7.4	Ergebnisse der 3D-Visualisierung	106
7.4.1	3D-Visualisierung der digitalisierten der Objekte	106
7.4.2	3D-Visualisierung der Klassifikationsergebnisse	107
7.4.3	Fusion der 3D-Visualisierungen.....	107
7.5	Vergleich des Satellitenbildkarten von Sanaa mit dem Modell der orientalischen Stadt	109
7.6	Zusammenfassung	110
8	Bewertung und Ausblick	112
8.1	Bewertung	112
8.1.1	Ergebnisse aus den objekt- und pixelbezogenen Klassifikations- verfahren	112
8.1.2	Vergleichende Analyse der erstellten Satellitenbildkarten	113
8.1.3	3D-Visualisierung	115
8.1.4	Zusammenfassung	116
8.2	Ausblick	117
9	Zusammenfassung.....	118
	Abstract.....	120
	الخلاصه.....	122
	Quellenverzeichnis.....	125
	Anhang	136
	Anhang I: Validationsergebnisse der Konfusionsmatrizen der pixelbezogenen Klassifikationen auf Bild- und Klassenebene.....	136
	Anhang II: Ergebnisse der Flächenberechnung der pixelbezogenen Klassifikationsverfahren im Vergleich	138
	Anhang III: Zusammenstellung der Vorschläge zur Transkription arabischer Namen und Begriffe	139

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1-1:	Schematische Darstellung des Ablaufs zur Entwicklung eines generischen Verfahrens, das der Erfassung, Verarbeitung, Auswertung und kartographischen Visualisierung des urbanen Raumes der jemenitischen Hauptstadt Sanaa aus operationellen Fernerkundungsdaten, dient. Entwurf: A. Jamil; E. Borg 2009.....	4
Abb.4.1-1:	Das elektromagnetische Spektrum mit der atmosphärischen Durchlässigkeit und den Arbeitsbereichen verschiedener Sensoren. Quelle: Albertz (2007).....	11
Abb. 4.3-1:	Spektralverhalten vegetationsloser Böden mit hohem (B) und geringem organischen Materialanteil (A). Quelle: Stoner (1981).....	14
Abb.4.3-2:	Spektrale Reflektion von Sand in Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes nach Hoffer (1969) aus Sieber (1986).....	15
Abb. 4.3-3:	Das typische spektrale Reflexionsvermögen von Vegetation und Boden. Quelle: Swain & Davis (1978).....	16
Abb. 4.3-4:	Spektrale Reflexion verschiedener natürlicher Oberflächen im Bereich von 400-900 nm, entsprechend der Sensibilität eines panchromatischen Luftbildes. Quelle: Schwidewsky & Ackermann (1976).....	17
Abb. 5.1-1:	Satellitenbildaufnahme vom Landsat ETM 2000 vom Untersuchungsgebiet in der Stadt Sanaa. Quelle: USGS (2000).....	19
Abb. 5.1.2-1:	Modell der islamischen Stadtstruktur von Ehlers. Quelle: Heineberg (2006).....	24
Abb. 5.1.2-2:	QuickBird Aufnahme (2004) vom Untersuchungsgebiet in Sanaa, Bereich A – Altstadt (umrandet mit oranger Kontur), Bereich B – ehemalige Garten- und Vorstadtquartiere (umrandet mit roter Kontur), Bereich C – Umgebung von A und B, Nummern markieren Objekte. Eigene Darstellung.....	25
Abb. 5.1.2-3:	QuickBird Aufnahme (2004) von Bereich B des Untersuchungsgebietes (umrandet mit roter Kontur entlang der ehemaligen Stadtmauer), rote Nummern markieren Objekte (beschrieben im Text). Eigene Darstellung.....	26
Abb. 5.1.2-4:	Idealschema der islamisch– orientalischen Stadt nach Dettmann (1969). Quelle: Heineberg (2006).....	28
Abb. 5.1.2-5:	QuickBird Aufnahme (2004) von Bereich A des Untersuchungsgebietes (umrandet mit oranger Kontur, entlang der ehemaligen Stadtmauer), Zahlen markieren Objekte, die im Text genannt werden. Eigene Darstellung.....	29
Abb. 5.2-1:	Angabe der maximalen, minimalen und durchschnittlichen Lufttemperaturen der Stadt Sanaa für jeden Monat des Jahres 2004. Quelle: Klimadaten von CAMA (2004), Graphik eigene Darstellung.....	31

Abb. 5.2-2:	Angabe der Luftfeuchtigkeit (in Prozent) und der Regenmenge (in mm) für die Stadt Sanaa für jeden Monat des Jahres 2004. Quelle: CAMA (2004). Graphik eigene Darstellung.....	31
Abb. 6.2.1-1:	Bildausschnitt von QuickBird Aufnahme (2005, 0,6 cm Auflsg.). Die Buchstaben und Zahlen markieren Orte, in deren Nähe Objekte zu finden sind, die zu den in Tabelle 6.2.1-1 definierten Klassen gehören.....	39
Abb. 6.2.1-2:	Bildausschnitt von QuickBird Aufnahme (2005, 0,6 cm Auflsg.). Die Buchstaben und Zahlen markieren Orte, in deren Nähe Objekte zu finden sind, die zu den in Tabelle 6.2.1 -1 definierten Klassen gehören.....	39
Abb. 6.2.1-3:	Bild A - C: Kennzeichnung der verschiedenen Dachmaterialien, siehe Tabelle 6.2.1-1.; Bild D: Satellitenbildausschnitt als Zuordnung zu Bild B. Quellen: Bild A: Lampe, Bild B: Urbanalyst, Bild C: Arthus-Bertrand, Y. Eigene Darstellung.....	40
Abb. 6.2.1-4:	Straßenstrukturen und Baumaterialien: A) Kanal aus Asphalt genutzt als Straße; B) Kanal führt Wasser; C) mehrspurige Asphaltstraße D) Pflasterstraße in der Altstadt. Quellen: Bild A von Mofadhl Y., Bild B von Ajlan A., Bild C von Alsindi F., Bild D von urbanalyst.....	40
Abb. 6.2.1-5:	Vegetationsarten: A) Bäume, B) und C) Ackerflächen, D) Wiese/Park; Quellen: Bild A von Alsindi F. Bild B und C von Urbanalyst, D: von Muhammed Saleh.....	41
Abb. 6.2.1-6:	Abb. 6.2.1-6: Brachflächen: A) Hügel am Stadtrand; B) Bauland; C) Friedhof; D) Sportplatz Quellen: Bild A von Alhashdi, Bild B von Urbanalyst, Bild C von Alqafary. M., Bild D von Alkabus.....	41
Abb. 6.2.2.1-1:	Ausschnitt vom Satellitenbild des Untersuchungsgebietes mit den eingegrenzten Testflächen.....	44
Abb. 6.2.3.1-1:	Komponenten der eCognition-Software: Ebenenweise aufeinander aufbauende Segmentgeometrie (links) und Hierarchie und Semantik der Segmente am Bsp. des Satellitendatensatzes von Sanaa. Eigene Darstellung.....	46
Abb. 6.2.4-1:	Schematische Darstellungen zum Verfahrensablauf der Nachbearbeitung der pixelorientierten Klassifikationsergebnisse. Eigene Darstellung.....	50
Abb. 6.5-1:	Flussdiagramm zur Verarbeitungslinie der 3D-Visualisierung. Eigene Darstellung.....	60
Abb. 7.1.1-1:	Kontrastverbesserung von multispektralen Falschfarbenbilder.....	65
Abb. 7.1.1-2:	QuickBird-Satellitenbildaufnahme vor und nach der Anwendung eines Hochpassfilters (Fenstergröße 3 x 3 Pixel).....	66

Abb. 7.1.1-3: QuickBird-Satellitenbildaufnahme im multispektralen und panchromatischen Kanal und nach der IHS – Transformation.....	66
Abb. 7.1.2-1: Co-occurrence Matrix: <i>Mean</i> (layer 1), <i>Variance</i> (layer 3), <i>Correlation</i> (layer 4) – Bild links, <i>Mean</i> (layer 1), <i>Variance</i> (layer 4), <i>Correlation</i> (layer 2) – Bildmitte, Originalbild mit Echtfarbkankombination – Bild rechts, Programm ENVI.....	67
Abb. 7.1.2-2: Co-occurrence Matrix: <i>Mean</i> (layer 4), <i>Contrast</i> (layer 3 und 1) – Bild rechts; Satellitenbildaufnahme in Echtfarbkankombination, Programm ENVI.....	68
Abb. 7.1.2-3: Satellitenbildaufnahme links, Anwendung des Texturoperators <i>Variance</i> , Bild rechts.....	68
Abb. 7.1.2-4: Satellitenbildaufnahme rechts, bearbeitet mit <i>Variance</i> – Bild links.....	69
Abb. 7.1.2-5: Satellitenbildaufnahme links, bearbeitet mit <i>Variance</i> - Bild rechts.....	69
Abb. 7.1.2-6: Satellitenbildaufnahme bearbeitet mit <i>Skewness</i> – Bild links, im Vergleich dazu Bild rechts - bearbeitet mit <i>Variance</i>	70
Abb. 7.1.2-7: Satellitenbildaufnahme bearbeitet mit <i>Skewness</i> – Bild links, im Vergleich dazu Bild rechts - bearbeitet mit <i>Variance</i>	70
Abb. 7.1.2-8: Satellitenbildaufnahme links, bearbeitet mit <i>Skewness</i> – Mitte, im Vergleich dazu Bild rechts - bearbeitet mit <i>Variance</i>	71
Abb. 7.1.2-9: Satellitenbildaufnahme links, bearbeitet mit <i>Mean Euclidean Distance</i> – Mitte, im Vergleich dazu Bild rechts - bearbeitet mit <i>Variance</i>	71
Abb. 7.1.3-1: QuickBird-Satellitenbild, Ausschnitt von Altstadt in Sanaa, bearbeitet mit Roberts-Operator, auf einem Kanal, <i>Image Add Back</i> null – Bild links, <i>Image Add Back</i> 20 – Bild Mitte, <i>Image Add Back</i> 40 – Bild rechts.....	72
Abb. 7.1.3-2: QuickBird-Satellitenbild, Ausschnitt von Altstadt in Sanaa, bearbeitet mit Roberts-Operator, in allen vier Kanälen, <i>Image Add Back</i> null – Bild links, <i>Image Add Back</i> 20 – Bild Mitte, <i>Image Add Back</i> 40 – Bild rechts.....	73
Abb. 7.1.3-2: QuickBird-Satellitenbild, Ausschnitt von Altstadt in Sanaa, bearbeitet mit Roberts-Operator, in allen vier Kanälen, <i>Image Add Back</i> null – Bild links, <i>Image Add Back</i> 20 – Bild Mitte, <i>Image Add Back</i> 40 – Bild rechts.....	74
Abb. 7.1.3-4: QuickBird-Satellitenbild, Ausschnitt von Altstadt in Sanaa, bearbeitet mit Laplace-Operator, in allen vier Kanälen, <i>Image Add Back</i> null – Bild links, <i>Image Add Back</i> 20 – Bild Mitte, <i>Image Add Back</i> 40 – Bild rechts.....	74
Abb. 7.1.4-1: Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Klassifikationsverfahren mit der Vegetationsdetektion.....	75

Abb.: 7.1.5.1-1: QuickBird Aufnahme von Sanaa bearbeitet mit Laplace-Operator, <i>Image Add Back 40</i> , Vergleich der Klasse <i>Vegetation</i> bei den pixelbezogenen Klassifikationen auf Klassenebene (Bild links) und auf Bildebene (Bild rechts).....	77
Abb. 7.1.5.1-2: Vergleich der Klasse <i>Vegetation</i> auf dem Satellitenbild (Bild links) und bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild rechts).....	77
Abb.: 7.1.5.1-3: Vergleich der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene der QuickBird- Aufnahme vor und nach der Nachbearbeitung.....	78
Abb. 7.1.5.1-4: Vergleich der Klasse <i>Vegetation</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild rechts).....	78
Abb. 7.1.5.1-5: Vergleich der Klasse <i>Vegetation</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild rechts).....	79
Abb. 7.1.5.2-1: Vergleich der Klasse <i>Straßen</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene (Bild rechts) und auf dem Originalsatellitenbild (Bild links).....	80
Abb. 7.1.5.2-2: Vergleich der Klasse <i>Straßen</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild rechts) und auf dem Originalsatellitenbild (Bild links).....	80
Abb. 7.1.5.2-3: Vergleich der Ergebnisse aus der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene vor (Bild links) und nach der Nachbearbeitung (Bild rechts).....	81
Abb. 7.1.5.2-4: Vergleich der Klasse <i>Straßen</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (nachbearbeitet), (Bild links) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild rechts).....	81
Abb. 7.1.5.2-5: Vergleich der Klasse <i>Straßen</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation, auf Bildebene nachbearbeitet (Bild Mitte) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild rechts).....	82
Abb. 7.1.5.2-6: Ablauf des Generalisierungsprozesses der Klasse <i>Straßen</i> von der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene.....	82
Abb. 7.1.5.3-1: Vergleich der Klasse <i>Gebäude</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und auf Klassenebene (Bild rechts), beide vor der Nachbearbeitung.....	84
Abb.7.1.5.3-2: Vergleich der Klasse <i>Gebäude</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und auf Klassenebene (Bild rechts), beide vor der Nachbearbeitung.....	84
Abb. 7.1.5.3-3: Vergleich der Klasse <i>Gebäude</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und auf Klassenebene (Bild rechts), beide vor der Nachbearbeitung.....	85

Abb. 7.1.5.3-4: Vergleich der Klasse <i>Gebäude</i> bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene, nachbearbeitet (Bild rechts) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild links).....	85
Abb. 7.1.5.3-5: Vergleich der Klasse <i>Gebäude</i> bei der objektorientierten Klassifikation, nachbearbeitet (Bild rechts) und zum Originalsatellitenbild (Bild links).....	85
Abb. 7.1.5.4-1: Vergleich eines Friedhofs bei den pixelorientierten Klassifikationsverfahren, nachbearbeitet (Bild Mitte – Bildebene), (Bild rechts – Klassenebene) (im Hintergrund ist das Fenster in schwarzer Farbe und nicht wie in den anderen Abbildungen das Originalsatellitenbild) mit dem Originalsatellitenbild (Bild links).....	86
Abb. 7.1.5.4-2: Vergleich von Sportplätzen bei den pixelorientierten Klassifikationsverfahren, nachbearbeitet (Bild Mitte – Bildebene), (Bild rechts – Klassenebene) mit dem Originalbild (Bild links).....	87
Abb. 7.1.7-1: Satellitenbildkarte erstellt aus den pixelbezogenen Klassifikations-Ergebnissen auf Klassenebene.....	89
Abb. 7.2.2.1-1: Satellitenbildkarte von Großbereich A – Altstadt von Sanaa. Erstellt durch visuelle Interpretation der QuickBird-Satellitenbilddaten von 2005, Auflösung 0,6m.....	94
Abb. 7.2.2.2-1: Satellitenbildkarte von Großbereich B: ehemalige Garten- und Vorstadtquartiere von Sanaa. Erstellt durch visuelle Interpretation der QuickBird-Satellitenbilddaten von 2005, Auflösung 0,6m.....	96
Abb. 7.2.2.3-1: Satellitenbildkarte vom Untersuchungsgebiet in Sanaa. Erstellt durch visuelle Interpretation der QuickBird-Satellitenbilddaten von 2005, Auflösung 0,6m.....	101
Abb. 7.3-1: Satellitenbildkarte von Bereich A von Sanaa. Erstellt durch die Fusion der pixelbezogenen Klassifikationsergebnisse auf Klassenebene und der Ergebnisse der visuellen Interpretation der Satellitenbilddaten.....	103
Abb. 7.3-2: Satellitenbildkarte von Bereich B von Sanaa. Erstellt durch die Fusion der pixelbezogenen Klassifikationsergebnisse auf Klassenebene und der Ergebnisse der visuellen Interpretation der Satellitenbildkarte.....	104
Abb. 7.3-3: Satellitenbildkarte vom Untersuchungsgebiet in Sanaa, von der Universität Sanaa, ein Ausschnitt von Bereich C und die Einordnung in die Gesamtkarte. Erstellt durch die Fusion der pixelbezogenen Klassifikationsergebnisse auf Klassenebene und der Ergebnisse der visuellen Interpretation der Satellitenbildkarte.....	105
Abb. 7.4-1: Schematische Darstellung der erzeugten 3D-Visualisierungen.....	106
Abb. 7.4.1-1: 3D-Visualisierung der Altstadt von Sanaa. Erstellt durch Digitalisierung der Objekte.....	107
Abb.: 7.4.2-1: 3D-Visualisierung der Altstadt von Sanaa. Erstellt von den Ergebnissen der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene.....	108

Abb. 7.4.3-1:	3D-Visualisierung der Altstadt von Sanaa. Erstellt aus der Fusion der 3D-Visualisierung der Digitalisierung und der 3D-Visualisierung der Klassifikationsergebnisse.....	108
Abb. 7.5-1:	Vergleich der 3D-Visualisierung von Sanaa mit dem Modell der orientalischen Stadt von Dettmann (1969). Eigene Darstellung.....	110
Abb. II.1:	Flächenberechnung der Klassen der pixelbezogenen Klassifikationsverfahren auf Bildebene und auf Klassenebene nach der Nachbearbeitung.....	133

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.3-1:	Auflistung der von der Transkription nach ADEGN gemachten Ausnahmen.....	5
Tab. 4.2-1:	Charakterisierung des QuickBird Satellitensensors. Quelle: Digitalglobe.....	12
Tab. 4.2-2:	Eigenschaften der Standard-Datenprodukte von QuickBird. Quelle: Digitalglobe.....	12
Tab. 5.2-1:	Gebäudeanzahl mit verschiedenen Dachmaterialien. Quelle: CSO (2004).....	31
Tab. 5.2-2:	genutzte Karten und Luftbilder vom Untersuchungsgebiet in Sanaa.....	32
Tab. 6.2.1-1:	Einteilung der Objekte des Satellitenbildes in vier verschiedene Klassen und Unterklassen, ihre Charakterisierungen und Zuordnungen zu einer Abbildung und zu der Satellitenbilddaufnahme.....	38
Tab. 6.2.3.1-1:	Parametereinstellungen für die Segmentierung mit eCognition.....	47
Tab. 6.3.3-1:	Übersicht der verwendeten Kantenfilter.....	56
Tab. 6.6-1:	Untergliederung der zu interpretierenden Großbereiche.....	63
Tab. I.1:	Fehlermatrix der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene vor der Nachbearbeitung.....	131
Tab. I.2:	Fehlermatrix der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene nach der Nachbearbeitung.....	131
Tab. I.3:	KAPPA-Koeffizienten der pixelbezogenen Klassifikationen.....	132
Tab. I.4:	Nutzer (UA)- und Gesamtgenauigkeiten (OA) der pixelbezogenen Klassifikationen.....	132
Tab. I.5:	Herstellergenauigkeiten (PU) der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene.....	132
Tab. II.1:	Flächenberechnung der pixelbezogenen Klassifikationen auf Bild- und Klassenebene nach der Nachbearbeitung.....	133
Tab. III-1:	Zusammenstellung der Vorschläge zur Transkription arabischer Begriffe und Namen. Eigene Darstellung.....	134

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ADEGN	Arabic Division of Experts on Geographical Names
AGGN	Arab Conference on Geographical Names
ca.	circa
CAMA	Civil Aviation and Meteorological Authority
CBD	Central Business District
CE	Circular Error
CSO	CENTRAL STATISTICAL ORGANISATION
d.h.	das heißt
DHM	Digitales Höhenmodell
DGM	Digitales Geländemodell
DMG	Deutsche Morgenländische Gesellschaft
DVR	Demokratische Volksrepublik Jemen
3D	dreidimensional
2D	zweidimensional
EJPD	Eidgenössisches Justiz- und Polizeidepartement
ERDAS	Earth Resources Data Analysis System
ETM	Enhanced Thematic Mapper
et. al.	und andere
GCP	Ground Control Point
GIS	Geographisches Informationssystem
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GMT	Greenwich Mean Time
ha	Hektar
HRV	High-Resolution Visible
IHS	Intensity - Hue – Saturation
IPA	International Police Association
IRS	Indian Remote Sensing
i. D.	im Durchschnitt
KK	Kappa-Koeffizient
Landsat	Land (Remote Sensing) Satellite
LOAS	League Of Arab States
LOD	Level of Detail
LUT	Look Up Table
max.	maximum
mind.	mindestens
min.	minimum
MS	Multispektral
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Differenced Vegetation Index
NIR	Nahes Infrarot
NN	Nearest Neighbour
Nr.	Nummer
NT	Neue Transkription
OR	Overall Accuracy
RGB	Rot, Grün, Blau
PA	Producer Accuracy
pan	panchromatisch

Pixel	picture element
SP	Scale Parameter
SPOT	Systeme Probatoire d'Observation de la Terre
SE	Strukturierendes Element
TIFF	Tagged Image File Format
TIN	Triangulated Irregular Network
z. B.	zum Beispiel
UA	User Accuracy
u.a.	unter anderem
UTM	Universal Transverse Mercator
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UN/DESA	United Nations/Department of Economic and Social Affairs
USGS	United States Geological Survey
u. U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
WGS 84	World Geodetic System 1984
YAR	Jemenitische Arabische Republik

Physikalische, mathematische und informationstechnische Einheiten

Bit	Binary Digit
°C	Grad Celsius
cm	Zentimeter
GHz	Gigahertz
km	Kilometer
km/s	Kilometer pro Sekunde
km/h	Kilometer pro Stunde
km ²	Quadratkilometer
λ	Lambda = Wellenlänge
m	Meter
m ²	Quadratmeter
MHz	Megahertz
mm	Millimeter
μm	Mikrometer
nm	Nanometer
%	Prozent
&	und
°	Grad
\leq	gleich, kleiner als
Ø	durchschnittlich

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben, recht herzlich bedanken.

Allen voran danke ich der Universität Sanaa für die Ermöglichung dieser Dissertation und der jahrelangen finanziellen Unterstützung.

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Geographie der Universität Potsdam, Abteilung Geoinformatik, Fernerkundung und Kartographie. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Hartmut Asche für seine engagierte Betreuung meiner Arbeit, den wertvollen Hinweisen bei der Bearbeitung, für das entgegengebrachte Vertrauen und die motivierenden Gespräche. Ebenso bedanke ich mich bei meinem Betreuer am DLR Dr. Eric Borg für die konstruktiven Kritiken und die anregenden Diskussionen sowie für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Auch Prof. Dr. Herrmann Kaufmann und seiner Gruppe vom GFZ Potsdam sei mein Dank ausgesprochen. Namentlich erwähnen möchte ich Dr. Uli Wetzels und Dr. Karl Segl. Auch allen anderen Kolleginnen und Kollegen, die mich auf meinem Weg begleitet und unterstützt haben, möchte ich hiermit danken. Dazu zählen u. a. Dr. Hannes Taubenböck vom DLR in der Helmholtzgemeinschaft und Dr. Bernd Fichtelmann vom DLR in Neustrelitz.

Abschließend möchte ich mich auch bei meiner Familie hier in Deutschland und in Jemen für ihre liebevolle seelische und moralische Unterstützung, sowie bei meiner Frau für die Korrekturarbeiten bedanken.

1. Einführung

Mit dem Anstieg der Weltbevölkerungszahl von 2,5 Milliarden im Jahr 1950 auf über 6,5 Milliarden im Jahr 2005 und auf geschätzte 8,2 Milliarden im Jahr 2030 (UNDP, 2006), verändern sich auch die jeweiligen Anteile der Land- und Stadtbevölkerung. Lebten 1950 nur 29 Prozent der Weltbevölkerung in Städten ist es gegenwärtig schon etwa die Hälfte. Für 2030 wird sich der Anteil nach Schätzungen des UN/DESA¹ (Bundeszentrale für politische Bildung, 2006) auf etwa 59 Prozent weiter erhöhen.

Der globale Trend hin zur Verstädterung ist auch in Jemen feststellbar. Nach Angaben des Jemenitischen Statistischen Jahrbuches 2006 (CSO, 2007) leben etwa 30 Prozent der Bevölkerung in Städten, verglichen mit 23 Prozent im Jahr 1994.

Im gleichen Zeitraum verdoppelte sich nahezu die Bevölkerung der jemenitischen Hauptstadt Sanaa von 1.003.627 auf 1.947.139. Die Hauptgründe für die stetige Zunahme der Stadtbevölkerung sind zum einen die hohe Geburtenrate von 5,2 Prozent (UNDP, 2009) und zum anderen der Zuzug von Menschen ländlicher Gebiete. In der Folge wuchs die bebaute Fläche Sanaas in der Zeit von 1989 bis 2007 um fast 30 km². Dies entspricht einem Wachstum von 85 Prozent innerhalb 18 Jahren. Dieser dramatische Anstieg bringt eine Vielzahl an sozialen, wirtschaftlichen und umweltbezogenen Auswirkungen mit sich (Zeug & Eckert, 2009), die es zu erfassen, dokumentieren und analysieren gilt.

Sanaa zählt zu den ältesten Städten der Erde. Von der UNESCO wurde die jemenitische Hauptstadt aufgrund ihrer einzigartigen Architektur – den weltbekannten Lehmhochhäusern der Altstadt – 1988 zum Weltkulturerbe erklärt. Sie gehört zu den Städten des orientalischen Kulturkreises, die seit dem 7. Jahrhundert durch die Religion des Islam und ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durch die Einflüsse europäischer Länder geprägt wurden. Städte dieses Kulturkreises weisen bestimmte charakteristische Strukturen auf, die in Stadtmodellen zu erfassen und zu veranschaulichen versucht wird. Ein bekanntes und häufig genutztes Modell ist das von Dettmann (1969), das er im Rahmen seiner Dissertation über Damaskus/Syrien entwickelt hat. Die in seinem Idealschema enthaltenden Elemente charakterisieren den Altstadtbereich in den Ländern Nordafrikas und Vorderasiens (Heineberg, 2006). Die durch westlich-moderne Einflüsse geprägte orientalische Stadt wird in den von Seger (um 1970 am Beispiel Teherans/Iran entwickelt) und in dem darauf aufbauen-

¹ United Nations/Department of Economic and Social Affairs

den Modell von Ehlers (1993 in Fortführung eigener Vorstellungen entwickelt) dargestellt. Nach Meyer (2003) ist der Idealtypus „orientalische Stadt“ nur noch in Rudimenten in den Altstädten anzutreffen. Des Weiteren ist er der Meinung, dass sie im Gesamtgefüge der Stadt nur noch eine untergeordnete Rolle spielen.

Eine Methode, die Stadtstrukturen von Sanaa zu erfassen und zu visualisieren, stellt die Verarbeitung von Fernerkundungsdaten dar. Die Fernerkundung ist ein Mittel zur Dokumentation, Erkundung und Monitoring urbaner Räume und Strukturen. Besondere Bedeutung hat sie dort, wo solche Informationen aus terrestrischen Kartierungen, Flächennutzungs- und Entwicklungsplänen nicht entnommen werden können, da diese nicht bzw. nicht in der erforderlichen Qualität existieren. Dies ist z.B. in Sanaa der Fall.

Aufgrund stadtspezifisch raumbezogener Bedingungen, wie dichte Bebauung und heterogene Flächennutzung, wurden bislang hauptsächlich Luftbilder eingesetzt, da diese über eine sehr hohe räumliche Auflösung verfügen. Mit dem Vertrieb räumlich sehr hoch auflösender Satellitendaten, wie beispielsweise QuickBird, Ikonos u.a., kommen zunehmend auch Satellitendaten zum Einsatz. Im Unterschied zur Luftbildfernerkundung ermöglicht die operationelle Fernerkundung die Erfassung der Stadtstruktur auf rasche, effiziente und wirtschaftliche Weise. Die Vorteile der Satellitenbilddaten liegen in ihrer hohen Aktualität, der schnellen Verfügbarkeit, der flächendeckenden Erfassung großer Gebiete und der Beobachtung der Erde in mehreren Spektralbereichen. Die Weiterverarbeitung der Daten in GIS ermöglicht den Aufbau einer Geodatenbank sowie die themen- und anlassspezifische Erzeugung von Realnutzungs- und Planungskarten, Stadtmodellen, etc.

2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist im Überschneidungsbereich zwischen den geoinformatischen Teilgebieten Fernerkundung, Geoinformationssysteme und Geovisualisierung sowie Stadtgeographie angesiedelt. Der Schwerpunkt der Studie liegt auf der Entwicklung und Anwendung geoinformatischer Methoden zur Erfassung und Dokumentation urbaner Raumstrukturen in Trockenräumen am Beispiel der Stadt Sanaa.

2.1 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung eines generischen Verfahrens zur Erfassung, Verarbeitung, Auswertung und kartographischen Visualisierung des urbanen Raumes der jemenitischen Hauptstadt Sanaa aus operativen Fernerkundungsdaten. Das Verfahren soll auf Standardverfahren und Systemen der raumbezogenen Informationsverarbeitung basieren und in seinen wesentlichen Prozessschritten automatisiert werden können. Der Erfassungs-, Verarbeitungs- und Visualisierungsprozess soll so ausgelegt sein, dass er für die Erfassung und Dokumentation vergleichbarer urbaner Räume des altweltlichen Trockengürtels grundsätzlich übertragbar ist.

Für die Bearbeitung der komplexen Thematik wird die Zielsetzung in folgende Teilschritte operationalisiert (vgl. Abb. 2.1-1):

1. Datenquellenauswahl und Datenerfassung
2. Vorverarbeitung der Satellitendaten
3. Objekt- und Pixelbezogene Klassifikationsverfahren und ihre Validierung
4. Aufbereitung der topographischen Daten und Nutzung zur Generierung zusätzlicher Informationen
5. Visueller Vergleich der Ergebnisse und Ergebnisauswahl anhand definierter Entscheidungsregeln zur Erstellung der Satellitenbildkarte
6. Visuelle Interpretation des unklassifizierten Satellitenbildes, Einsetzen von Symbolen für Objekte und Digitalisieren von Straßen und Flächen
7. Vergleichende Analyse der aus der digitalen Bildverarbeitung und der aus der visuellen Interpretation erstellen Satellitenbildkarte und anschließende Fusion
8. 3D-Visualisierung

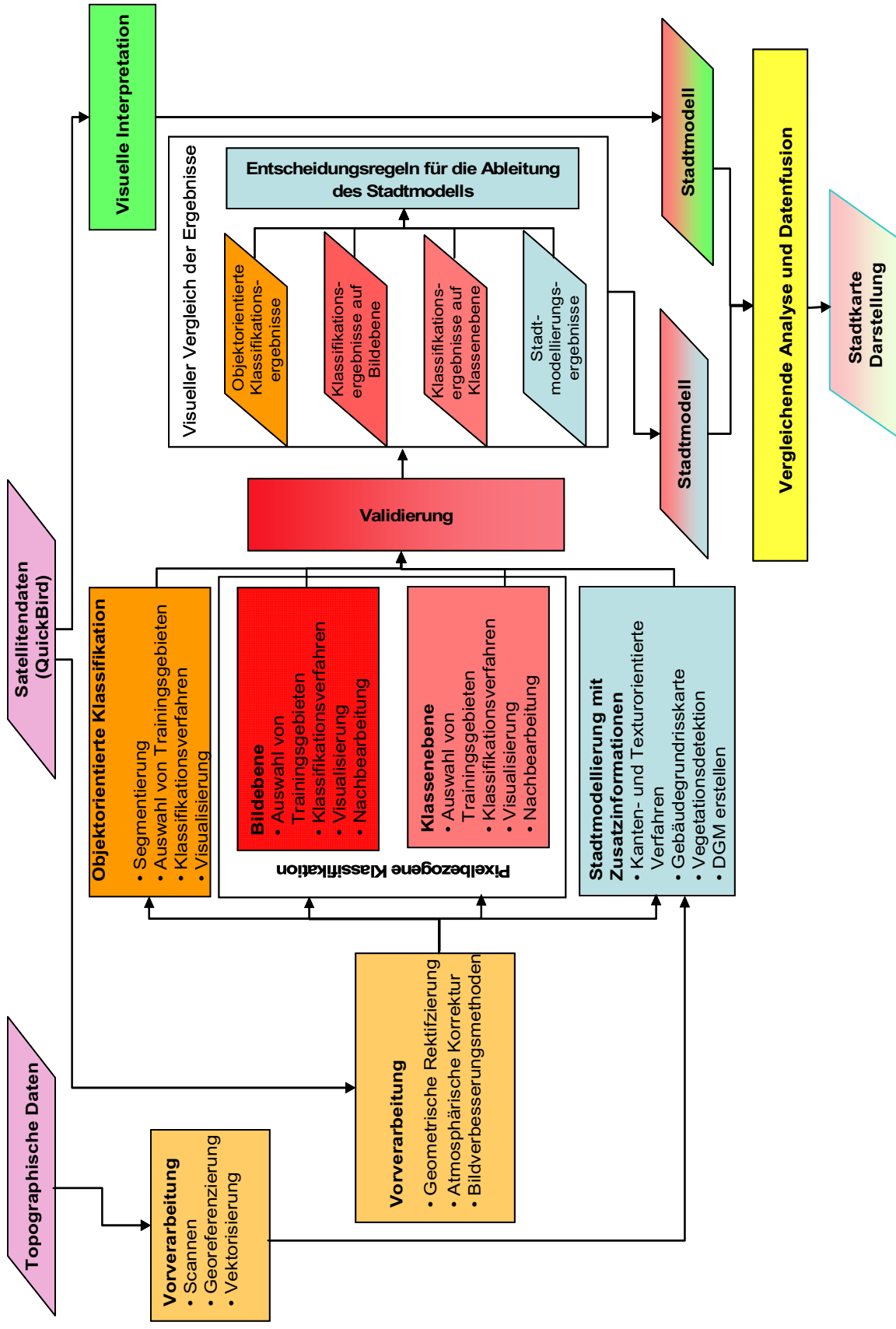


Abb. 2.1-1: Schematische Darstellung des Ablaufs zur Entwicklung eines generischen Verfahrens, das der Erfassung, Verarbeitung, Auswertung und kartographischen Visualisierung des urbanen Raumes der jemenitischen Hauptstadt Sanaa aus operationellen Fernerkundungsdaten dient. (Entwurf: A. Jamil, E. Borg 2009).

2.2 Aufbau

Der Aufbau der Arbeit vollzieht die Zerlegung des Themas in operationelle Prozesse nach. Den Schwerpunkt bilden die Kapitel über die fernerkundlichen und anderen Datengrundlagen (Kap. 5), die Methoden und Verfahren der digitalen Bildverarbeitung und visuellen Bildanalyse (Kap. 6) sowie die Zusammenstellung und Diskussion der Ergebnisse (Kap. 7). Diesem Hauptteil ist eine Einführung in die Fernerkundung urbaner Räume (Kap. 1), der Vorstellung von Zielsetzung und Aufbau (Kap.2.), die Einordnung der Arbeit in den relevanten Forschungsstand (Kap. 3) sowie einer Darstellung der Grundlagen der optischen Fernerkundung (Kap. 4) vorangestellt. Dem Hauptteil folgen eine Interpretation und Bewertung der Ergebnisse der Untersuchung (Kap. 8). Eine Zusammenfassung schließt die Arbeit ab (Kap. 9).

2.3 Konventionen

In dieser Arbeit erfolgt die Transkription arabischer Namen und Begriffe nach: The Arabic Division of Experts on Geographical Names (ADEGN) der Third Arab Conference on Geographical Names (AGGN) 2007. Folgende Ausnahmen, die sich auf den europäischen Sprachgebrauch arabischer Namen und Begriffe beziehen, wurden gemacht (Tab.2.3-1):

Tab. 2.3-1: Auflistung der von der Transkription nach ADEGN gemachten Ausnahmen.

Ausnahmen	Transkription nach AGGN (2007)	Ausnahmen	Transkription nach AGGN (2007)
Jemen	Al Yaman	Hama	<u>H</u> amah
Sanaa	Şan´aā	Kairo	al Qahira
Al-Hudaydah	Al-Hudydh	Ägypten	Misr
Suez	As-Sways		

3. Forschungsstand der Fernerkundung urbaner Strukturen in ariden Räumen und Stadtmodellierung

Luft- und Satellitenbilder ermöglichen die Beobachtung der Erdoberfläche aus der Luft bzw. dem Weltall und stellen ein Instrument zur flächenhaften Analyse der Landschaftsausstattung (Al Ashwal, 2008), (Esch et al., 2004), (Reder, 2002) und Raumplanung (Ahmed et al., 2009) dar. Bereits in den Anfängen der Fernerkundung aus dem Ballon wurden immer wieder städtische Siedlungen abgebildet. So zählen Schräg- bzw. Senkrechtaufnahmen städtischer Räume von Paris (1858), Boston (1860) oder Berlin (1886) zu den frühesten Fernerkundungsaufnahmen überhaupt. Die ersten Luftbilder von Städten arabischer Länder gibt es von Hama (1927) in Syrien, von Sanaa (1929 – 1937) in Jemen und von Kairo (1937) in Ägypten. Im Ersten und insbesondere Zweiten Weltkrieg lag ein Schwerpunkt der Fernerkundung aus dem Flugzeug auf der Erfassung, Beobachtung und Dokumentation von Städten und deren Raumstrukturen zur Durchsetzung militärischer Ziele.

Im urbanen Raum wurden aufgrund ihrer sehr hohen räumlichen Auflösung bislang hauptsächlich Luftbilder genutzt. Der Einsatz satellitengestützter Aufnahmen ist seit dem Beginn der operationellen Satellitenfernerkundung (1972) grundsätzlich möglich. Allerdings besaßen herkömmliche Satellitendaten wie Landsat und SPOT für städtische Fragestellungen keine ausreichende geometrische Auflösung (Herold et al., 2002), (Weber, 1992). Einzelne Objekte oder genaue Stadtstrukturen können mit gering- oder mittel auflösenden Satellitendaten aufgrund der Mischpixel bzw. Mischsignaturen meist nicht identifiziert bzw. klassifiziert werden (Albertz, 2001). Mit dem Start des Indian Remote Sensing Satellite Programms (IRS), das Satellitenbilder mit einer Auflösung von 5,8 x 5,8 m im panchromatischen und 23,2 x 23,2 m in den multispektralen Kanälen liefert, konnte ein bis dahin nur Luftbildern vorbehaltener Arbeitsmaßstab erreicht werden. Damit wurden Satellitenbilder für Einsatzgebiete im Rahmen der Stadt- und Regionalplanung interessant und einsetzbar (Reder, 2004). Die Differenzierbarkeit der Objekte ist durch den Einsatz von IKONOS (1m Bodenauflösung, panchromatisch) und QuickBird im Jahr 2000 weiter gestiegen. Ihre hohe geometrische und spektrale Auflösung ermöglicht die Erfassung der städtischen Oberflächenstrukturen bzw. Flächennutzungen (Bauer & Steinnocher, 2000), (Herold et al., 2006) und die Extraktion von Gebäuden und Straßen (Zeug & Eckert, 2009), (Hoffmann, 2001). Die Datenauswertung ist für einen Maßstab bis zu

ca. 1:5.000 geeignet (Ehlers, 2002). So werden auch für Versiegelungskartierungen, die der Erfassung und Modellierung städtischer Umweltbedingungen dienen, zunehmend Satellitenbilddaten eingesetzt (Lakes et al., 2005), (Van de Voorde et al., 2006).

Durch den Vergleich von Daten unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte ist es möglich, Urbanisierungsprozesse zu erfassen. So wurden in einer aktuellen Untersuchung zum Stadt- und Bevölkerungswachstum in Sanaa (Jemen) Satellitenbilddaten von Landsat TM (von 1989), SPOT 3 (von 1994), QuickBird (von 2004), Spot 5 (von 2007) und IKONOS-2 (von 2007) verwendet (Zeug & Eckert, 2009). Banzhaf et al. (2007) haben für die Analyse der Stadtentwicklung auf Spot XS und Landsat TM Daten zurückgegriffen. Auch in Ryad (Saudi-Arabien) werden Satellitenbilddaten zur Überwachung der städtischen Expansion eingesetzt (Mashee & Malthus, 2009). In Dhofar (Oman) dient die Fernerkundung in Verbindung mit den Geoinformationssystemen (GIS) der Kontrolle von Grünanlagen (Al Awathi, 2009).

Die von Satellitendaten erstellten Karten und den daraus gewonnenen Informationen werden heute auch zur Identifizierung sensibler Gefährdungszonen durch Naturgefahren und Klimawandel genutzt, die der Stadtverwaltung und auch der Weltbank zur Ausarbeitung von Schutzkonzepten sowie der Planung und Bewertung von Infrastrukturinvestitionen dienen (GeoVille, 2009).

In den Wüsten der arabischen Halbinsel und im Irak werden mit Hilfe der Fernerkundung und GIS die Bewegung des Sandes bzw. Dünen (Al Baldawi, 2009, Al Saud, 2009) und in Jordanien und Saudi-Arabien das Grundwasser (Awawdeh, 2009), (Outaibi, 2009) studiert und kartiert.

Es gilt dabei zu berücksichtigen, dass es sich bei Satellitenbilddaten entgegen der Fotografie um digitale Daten handelt, die erst eine Reihe von Verarbeitungsschritten unterzogen werden müssen, um von ihnen ein Bild zu erhalten. Es bedarf somit einer Infrastruktur, die es ermöglicht, die digitalen in analoge Daten zu konvertieren. Da diese Voraussetzungen nicht überall gegeben sind, ist die Einsetzbarkeit von Satellitendaten eingeschränkt. Zu ihren Vorteilen gehören die schnelle Verfügbarkeit, die Möglichkeit der Aktualisierung der Daten, die flächendeckende Erfassung großer Gebiete bzw. der gesamten Erde und die Beobachtung in vielen Spektralbereichen (sichtbares Licht, Infrarot, Mikrowellen).

Die 3D-Abbildung der dreidimensionalen Stadtstrukturen fußt auf der fotografischen Aufnahme von Stereo-Luftbildpaaren mit mehr als 60-prozentiger Bildüberlappung in

Aufnahmerichtung. Auch mit nichtfotografischen Satellitendaten können 3D-Abbildungen erzeugt werden, entweder durch schwenkbare Aufnahmekomponenten oder durch doppelte Instrumentierung.

Die CyberCity AG stellt mit dem CyberCity-Modeler eine Software zur Erfassung von 3D-Stadtmodellen aus Quickbird Satellitenbildern zur Verfügung. Dabei werden die Gebäude halbautomatisch erstellt und die Dächer aus Luftbildern texturiert (CyberCity, 2006). Das Potential der QuickBird-Satellitendaten für die Anwendung universeller Gebäudeextraktionsalgorithmen wird von Mosch (2005) untersucht. Das Ziel ist eine mittelmaßstäbige Visualisierung von Geoobjekten für touristische Anwendungen. Einzelne Gebäudedetails werden vernachlässigt, entscheidend ist der Wiedererkennungswert einer Siedlungsstruktur, der im Vorhandensein und in der Anordnung der Gebäude liegt.

Das meistgenutzte Messverfahren für die Erfassung dreidimensionaler Stadtmodelle stellt jedoch die Luftbildphotogrammetrie dar (Brenner, 2006). Neben diesen Verfahren hat sich in jüngerer Vergangenheit das luftgestützte Laserscanning etabliert, das die Oberfläche mittels eines Laserstrahls direkt dreidimensional erfasst. Mit Hilfe terrestrischer Laserscanner können einzelne Objekte zusätzlich hoch auflösend erfasst werden. In der anschließenden Modellierung lassen sich je nach Datenmenge und Anwendung verschiedene „Levels of Detail“ (LOD) berechnen. Diese reichen von einfachen Flachdachrepräsentationen über detaillierte Dächer mit Feinstrukturen bis hin zu begehbaren Architekturmodellen (Dold et al., 2003). Durch die Laser-Scanner Technologie kann im Gegensatz zu rein photogrammetrischen Methoden ein hoher Automatisierungsgrad erreicht werden, wobei auch hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit möglich sind. Für die Auswertung der Daten werden Verfahren genutzt, die z.B. Grundrissdaten oder photogrammetrische Aufnahmen mit Laserscanner Daten kombinieren (Jansa & Stanek, 2003).

Andere Datenquellen, die für die Generierung und Visualisierung von 3D-Stadtmodellen genutzt werden, stellen das digitale Oberflächenmodell, Karten und Pläne, wie die hoch detaillierte Automatische Liegenschaftskarte (ALK) und Katasterkarten oder die Bodennutzungskarte dar, siehe dazu Weitzig (2006), Kada (2007) und Pergande (2008).

Auch für die auf dem virtuellen Globus google earth dreidimensional präsentierten Stadtgebiete, wie beispielsweise Berlin (seit 08.03.2007) und Dresden (seit 09.07.2007), werden von der von einem Potsdamer Unternehmen (3D Geo GmbH)

entwickelten 3D-Software „LandXplorer“ vollautomatisch zweidimensionale Kartendaten genommen und diese mit Höhendaten kombiniert. Mit einem neuartigen Verfahren werden dann darauf die Fassaden positioniert, die aus speziell aufgenommenem Bildmaterial ausgeschnitten wurden (Hasso-Plattner-Institut für Softwaresystemtechnik, 2007).

3D-Stadtmodelle werden in vielen Bereichen und mit steigender Nachfrage eingesetzt. Neben den klassischen Anwendungen wie z. B. der Standortplanung von Antennen für Mobilfunknetze und Lärmanalysen, nimmt die Visualisierung einen immer höheren Stellenwert ein (Schilling et al., 2004), (Bauer & Mohl, 2004). Eine umfassende Auflistung von Anwendungen und deren spezifische Anforderungen an 3D-Stadtmodelle liefert (Albert et al., 2003).

4. Grundlagen der optischen Fernerkundung

Die optische Fernerkundung zeichnet die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung und die emittierte Thermalstrahlung in den sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereichen auf. Da die Strahlung von natürlichen Energiequellen ausgeht, bezeichnet man die eingesetzten Sensoren als passive Sensoren. Die Strahlungsquelle wird als Sender bezeichnet, das passive Satellitensystem als Empfänger. Optische Sensoren kann man nach verschiedenen Gesichtspunkten unterscheiden:

- Aufnahmeverfahren (z.B. fotografische Verfahren, Scanner)
- abbildende oder nicht abbildende Sensoren
- spektrale Auflösung (z.B. panchromatisch, multi-, hyperspektral)
- radiometrische Auflösung
- räumliche Auflösung
- zeitliche Auflösung.

Gegenstand dieser Arbeit sind passiv-optische Systeme mit einer multispektralen Auflösung, wie sie vom QuickBird-Sensor geliefert wird.

4.1 Elektromagnetisches Spektrum und Arbeitsbereiche optischer Fernerkundung

Die elektromagnetische Strahlung ist eine Form der Energieausbreitung, die als ein sich periodisch veränderndes, elektromagnetisches Feld verstanden werden kann. Die wichtigste Quelle elektromagnetischer Strahlung ist die Sonne. Sie sendet Wellen aller Frequenzen aus. Etwa 98% der extraterrestrischen Solarstrahlung entfallen auf den Bereich mit Wellenlängen von 290 nm bis 4000 nm, dabei liegen etwa 48% im sichtbaren Bereich (380 nm bis 780 nm), 46% im infraroten und 6% im ultravioletten Bereich (Chen, 1994).

Die verschiedenen Bereiche der elektromagnetischen Wellen werden im elektromagnetischen Spektrum dargestellt, siehe Abb. 4.1-1. Für die Fernerkundung ist nur ein Teil des elektromagnetischen Spektrums zwischen dem nahen Ultraviolett und dem mittleren Infrarot und außerdem der Mikrowellenbereich nutzbar (Albertz, 2007). Der klassische Frequenzbereich der analogen optischen Fernerkundung ist das Sichtbare Licht.

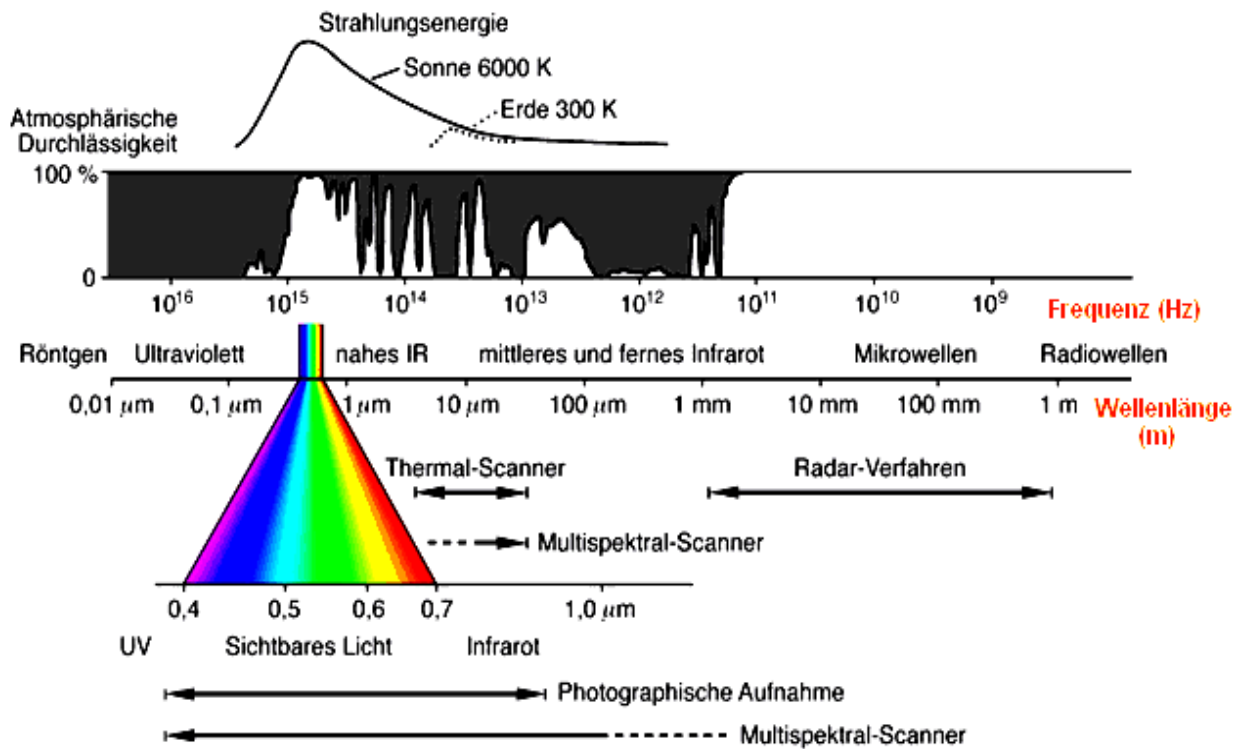


Abb.4.1-1: Das elektromagnetische Spektrum mit der atmosphärischen Durchlässigkeit und den Arbeitsbereichen verschiedener Sensoren. Quelle: Albertz (2007).

Die elektromagnetische Strahlung kann mit Fernerkundungssensoren auf unterschiedliche Weise aufgezeichnet werden. Wenn mehrere Messwerte in verschiedenen Wellenlängenbereichen gleichzeitig erfasst werden, handelt es sich um ein Multispektralsystem, zu diesem auch der Satellit QuickBird gehört. Eine Aufnahme seines optisch-elektronischen Scanners bildet die Grundlage dieser Arbeit.

4.2 Das Quickbird-Satellitensystem

QuickBird-Daten gehören zu den ersten kommerziell verfügbaren und seit 2001 vertriebenen, hochauflösenden Erderkundungsdaten ($0,61 \text{ m}$ im panchromatischen Kanal), die in den geometrischen Auflösungsbereich von Luftbildern reichen. Dadurch eignen sich diese Satellitenbilddaten insbesondere zur Erkundung dicht besiedelter Gebiete.

QuickBird-Sensoren gehören zu den Pushbroom-Scannersystemen² (Bill et al., 2001). Schwenkbare Kameras können sich bis zu 30° in jede Richtung drehen (Off-

² „Bildaufnahmesystem, welches ein Bild aus mehreren simultan aufgenommenen Zeilensensoren (linear arrays) zusammensetzt. Die erste Nutzung dieses Grundprinzips fand mit dem HRV-Sensor an Bord des SPOT-Satelliten 1986 statt“ (Bill, 2001).

Nadir-Modus), so dass auch Bilder neben der eigenen Umlaufbahn aufgenommen werden können. Die Wiederholungsrate wird somit erheblich verkürzt. Durch die Schrägaufnahme eines interessierenden Gebietes wird die Aufzeichnungsgeometrie verzerrt, so dass die Bodenauflösung verschlechtert wird, da die Auflösung vom Aufnahmewinkel abhängig ist. Im Nadirblick wird die höchste Auflösung erzielt, welche zum Rand hin abnimmt. Eine zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Merkmale sind in Tabelle 4.2-1 zu finden.

Die Datenprodukte des Satellitensensors QuickBird werden in drei verschiedene Produktstufen eingeteilt: Basic, Standard und Ortho. In dieser Arbeit werden die Standard-Produkte genutzt, deren wichtigsten Eigenschaften in tabellarischer Form dargestellt sind (Tab. 4.2-2). Die Informationen dazu stammen von Digitalglobe.

Tab. 4.2-1: Charakterisierung des QuickBird Satellitensensors. Quelle: Digitalglobe (2008).

Parameter	Charakteristik
Start der Mission	18. 10. 2001
Flughöhe	450 Km
Umlaufbahn	97,2°, sonnensynchron
Geschwindigkeit	7,1 km/s - 25,560 km/h
Wiederholungsrate	1-3,5 Tage (30° off-nadir)
Umlaufdauer	93,5 min
Überflug des Äquators	10:30 Ortszeit
Kartenprojektion/ Ellipsoid	UTM/WGS 84
Aufnahmefläche/Szene	16.5 Km x 16.5 Km (nadir)
Lagegenauigkeit	23 m horizontal (CE90%) ³
Radiometrische Auflösung	11 bits
Räumliche Auflösung	Pan: 61 cm (nadir) to 72 cm (25° off-nadir) MS: 2.44 m (nadir) to 2.88 m (25° off-nadir)
Spektralbereiche	Pan:450 - 900 nm; Multi.:Blue: 450 - 520 nm, Green: 520 – 600 nm, Red: 630 - 690 nm, Near IR: 760 - 900 nm

Tab. 4.2-2: Eigenschaften der Standard-Datenprodukte von QuickBird. Quelle: Digitalglobe (2008).

Verarbeitung	Auflösung	Lieferung
radiometrisch-, sensor- und geometrisch korrigiert	60 cm (nadir) bis 70 cm (25° bei off-nadir) – panchromatisch 2,44 m (nadir) bis 2,88 m (25° bei off-nadir) – multispektral 60 cm bis 70 cm pan-sharpend ⁴	mind. 25 km ² (bei archivierten Daten), 64 km ² (bei Neuerwerb), 100 km ² (bei Eilbestellung), max. 10.000 km ²

³ CE 90%: Circular Error 90: Mittlerer Lagefehler für 90% der Punkte

4.3 Spektralverhalten ausgewählter Oberflächen arider Räume

Die auf ein Objekt treffende elektromagnetische Strahlung wird teilweise absorbiert, teilweise reflektiert und der Rest durchdringt es. Wie groß die einzelnen Anteile jeweils sind, ist einerseits von der Beschaffenheit des Körpers und andererseits von der Wellenlänge der betreffenden Strahlung abhängig. Jeder Körper weist eine bestimmte Verteilung und Intensität der reflektierten Strahlung auf. Er besitzt also eine für ihn charakteristische Spektralsignatur (Löffler, 1994), so dass Fernerkundungsobjekte in bestimmten Spektralbereichen differenziert werden können.

Die Reflektionseigenschaften der Geländeobjekte sind vor allem abhängig von dem jeweiligen Material, dem physikalischen Zustand (z.B. Feuchtigkeit), der Oberflächenrauigkeit und den geometrischen Verhältnissen (Einfallswinkel der Sonnenstrahlung, Beobachtungsrichtung) (Albertz, 2007).

Darüber hinaus wird das Spektralverhalten von den atmosphärischen Bedingungen während der Aufnahme der Bilder beeinflusst, da die Übertragung der Strahlungsenergie stark vom Wasser- und Staubgehalt in der Atmosphäre abhängt.

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Einflussbereich der Halbwüsten- und Wüstenklimate. Die ariden Verhältnisse in dieser Region wirken sich auf das Spektralverhalten der Geländeobjekte aus. Im Folgenden sei das spezifische Reflektionsverhalten für die wichtigsten Oberflächenbedeckungsarten unter ariden Bedingungen kurz erläutert. Das Reflexionsvermögen vegetationsloser Böden steigt mit zunehmender Wellenlänge an. Die verschiedenen Bodenarten unterscheiden sich jedoch im Absolutwert der Reflexion aufgrund der Unterschiede im Feuchtigkeitsgehalt, im Anteil organischer Substanz, der mineralischen Zusammensetzung, der Oberflächenstruktur und der Grobstruktur der Bodenbearbeitung (Sieber, 1986). Das Spektralverhalten von Böden mit hohem und geringem organischem Material wird in Abb. 4.3-1 dargestellt. In ariden Gebieten, wo die Verdunstung größer als der Niederschlag ist, findet man wenig oder kaum Vegetation. Zudem wird aufgrund der hohen Temperaturen vorhandenes organisches Material schnell wieder umgesetzt, so dass kaum organisches Material im Boden akkumuliert wird.

Wie durch einen Vergleich von Boden A und B zu sehen ist, wirkt sich ein steigender Humusanteil reflexionsmindernd aus, so dass Humusböden im sichtbaren Bereich

⁴ Pan-sharpend: ist ein Format bei dem niedrig aufgelöste Multispektraldaten mit hoch aufgelösten panchromatischen Daten kombiniert werden, um ein räumlich geschärftes, multispektrales Bild zu erzeugen.

des Lichtes dunkler wirken als Gesteine. Organische Substanzen mit einem Anteil von 0,5% bis 5% im Boden erzeugen eine dunkelbraune bis schwarze Farbe. Sinkt der Humusgehalt erscheint der Boden in hellen Braun- und Grautönen (Sieber, 1986). Abb. 4.3-1 verdeutlicht, dass die Reflektionswerte der Böden A und B im Spektralbereich des sichtbaren Lichtes (0,4 – 0,7 μm) mit zunehmender Wellenlänge kontinuierlich ansteigen. Der Anstieg des Bodens B mit geringem organischem Material ist steiler als beim Boden A mit hohem organischem Material. Die Reflektionskurven erreichen im mittleren Infrarotbereich bei ca. 1,3 μm ihr Maximum und sinken dann ab. Lokale Minima finden sich bei beiden Kurven bei etwa 1,45 μm und 1,95 μm .

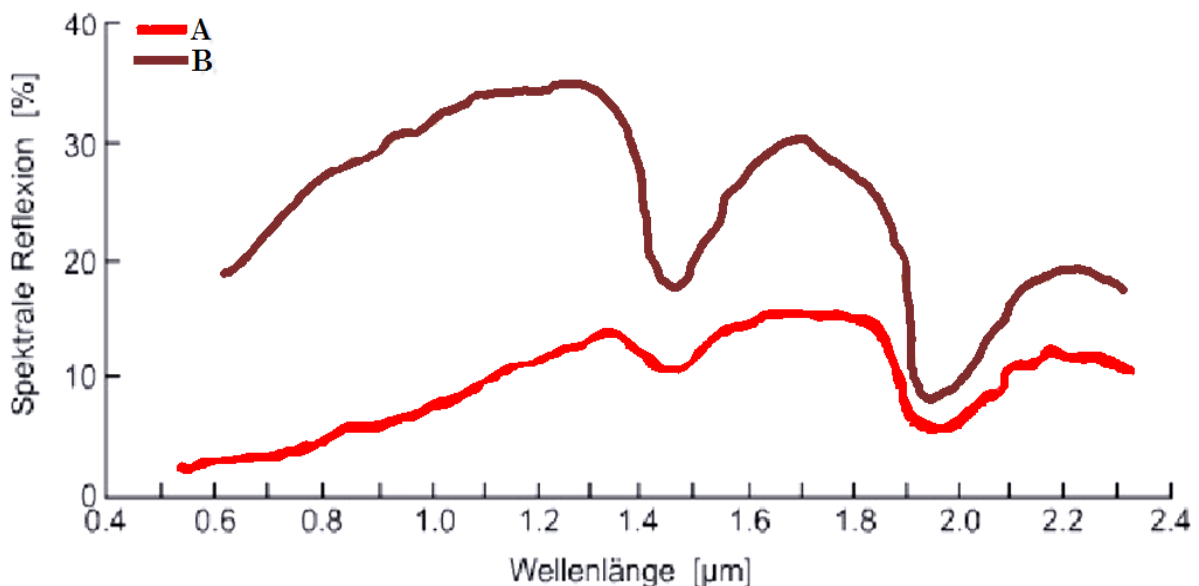


Abb. 4.3-1: Spektralverhalten vegetationsloser Böden mit hohem (B) und geringem organischem Materialanteil (A). Quelle: Stoner (1981).

Als Beispiel für den Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes in Böden dient Abb. 4.3-2. Dabei zeigt sich, dass die reflektierte Strahlung mit zunehmendem Wassergehalt sinkt, besonders stark bei Wassergehalten ab ca. 10% (Hoffer & Johannsen, 1969).

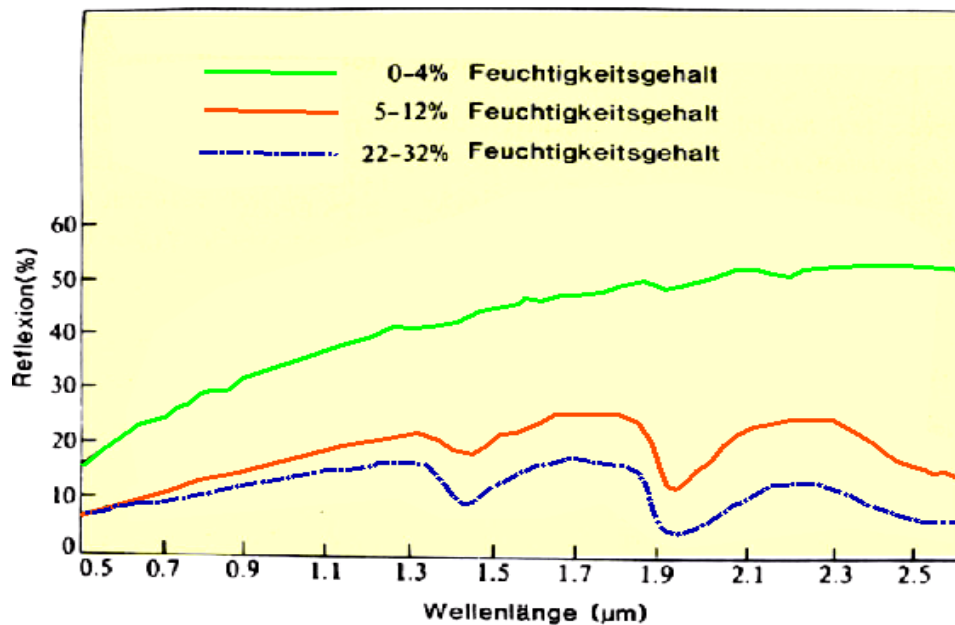


Abb. 4.3-2: Spektrale Reflexion von Sand in Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes nach Hoffer & Johannsen (1969) aus Sieber (1986)

Da ein trockener Boden stärker als ein feuchter Boden reflektiert, erscheint er daher in einer optischen Aufnahme heller. Feuchte Oberflächen zeichnen sich insbesondere durch die Reduzierung der Reflexionswerte im Bereich der Wasserabsorptionsbanden bei 1,4 µm und 1,9 µm aus. Das Reflektionsverhalten wird außerdem durch hohe Eisenoxidgehalte, hohe Oberflächenrauigkeit sowie eine zunehmende Korngröße vermindert.

Die spektralen Eigenschaften von Gesteinen werden von ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften bestimmt. Besonderen Einfluss auf das optische Verhalten von Gesteinen (Reflektion, Absorption) haben die Oberflächenstruktur, die Porosität und der Feuchtigkeitsgehalt. So unterscheiden sich z.B. mineralisch gleichartige Gesteine in ihrem Reflektionsverhalten aufgrund von unterschiedlicher tektonischer Beanspruchung oder Verwitterungsstärke. Unverwitterte schwach geklüftete Gesteinsserien besitzen ein bedeutend größeres Reflektionsvermögen als stärker verwitterte und geklüftete Gesteine (Koch, 1995).

Ein Vergleich des Reflexionsverhaltens grüner Vegetation zum unbewachsenen Boden ist in Abb. 4.3-3 und Abb. 4.3-4 dargestellt. Infolge der typischen Unterschiede der beiden Landbedeckungen können diese leicht von einander differenziert werden.

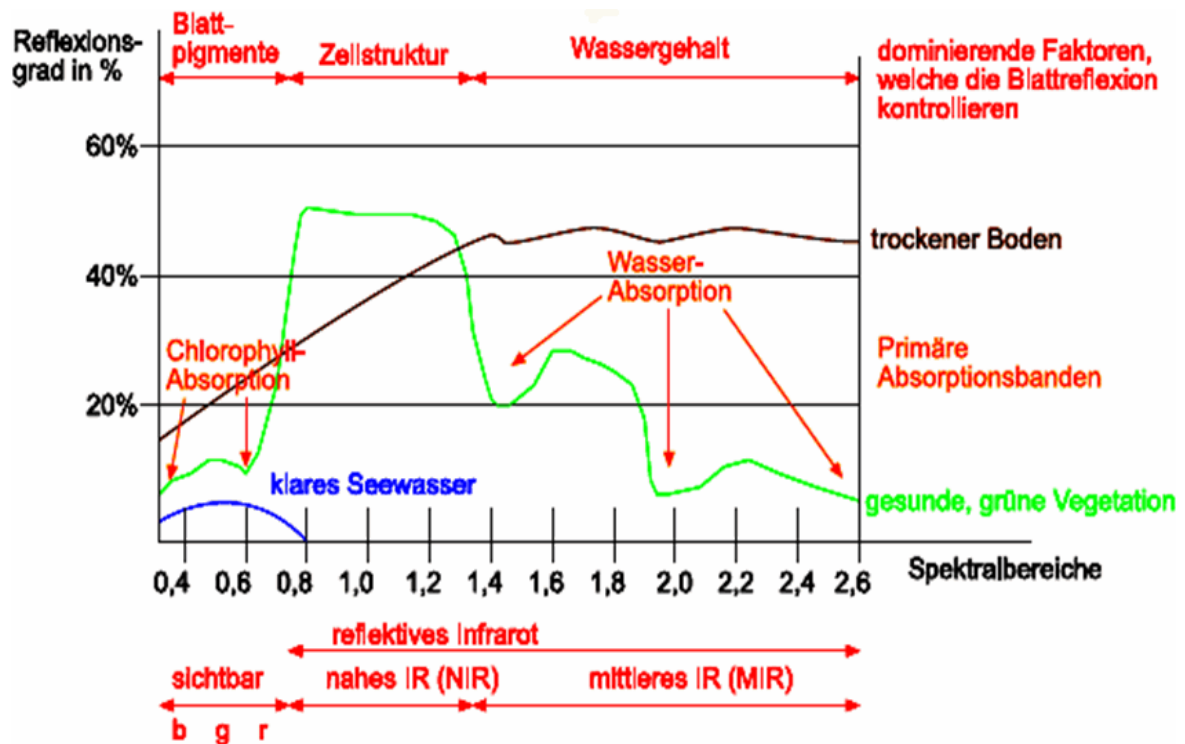


Abb. 4.3-3: Das typische spektrale Reflexionsvermögen von Vegetation und Boden.
 Quelle: Swain & Davis (1978).

Das Reflektionsverhalten grüner Vegetation wird durch die Eigenschaften des Blattes bestimmt. Die sich im oberen Teil des Blattes (Palisadenparenchym) befindenden Pigmente, wie Chlorophyll und Karotinoide, absorbieren die für die Photosynthese erforderliche Energie im sichtbaren Licht (Abb. 4.1-1). Aufgrund der hohen Absorption (70 bis 95%) reflektiert grüne Vegetation das sichtbare Licht sehr schwach. Das lokale Maximum liegt bei 0,55 µm. Im nahen Infrarotbereich (0,7 bis 1,3 µm) wird das Verhalten im Wesentlichen von der Blattzellstruktur bestimmt. Die Reflektionskurve steigt zuerst stark an und zeigt dann ein breites Maximum.

Im mittleren Infrarotbereich (1,3 bis 2,5 µm) zeigt die Reflektionskurve eine diskontinuierliche Abnahme zum langwelligen Teil hin. Das Reflektionsverhalten wird hier sehr stark vom im Blattgewebe enthaltenen Wasser bestimmt. Mit steigendem Wassergehalt sinken die Reflektionswerte. Bei 1,4 µm, 1,9 µm und 2,7 µm finden sich lokale Minima. Bei geschädigter oder absterbender Vegetation sind oft das zelluläre Blattgefüge und die interne Wasserversorgung gestört. Dies wirkt sich auf den Reflektionsgrad der Pflanze im Infrarotbereich aus. Dementsprechend kann das Maß der Reflektion in diesem Bereich als Vitalitätsfaktor angesehen werden (Lillesand et al., 2004).

Pflanzenbestände beeinflussen das Spektralverhalten durch die Stellung und Größe der Blätter, die Ausbildung von Spross- bzw. Baumkrone, die Belaubungsdichte (Bodenschluss, Schattenanteile), das Alter des Pflanzenbestandes und die Oberflächenrauigkeit. Des Weiteren wird das Reflektionsverhalten der Vegetation durch den Anteil an Chlorophyll in ihren Blättern bestimmt. Da Laubblätter einen höheren Chlorophyllgehalt als Nadelblätter aufweisen, zeigen sie im nahen und mittleren Infrarot eine stärkere Reflektion. Dies trifft auch auf landwirtschaftlich genutzte Flächen im Vergleich zu Wiesen aufgrund des geringeren Bodenschlussgrades zu. Variationen treten in Abhängigkeit von der Feldfrucht und dem Reifegrad der Frucht auf. Durch saisonal bedingte Phasen der Feldbestellung, Reife, Ernte und Brache ist das Reflektionsvermögen von Ackerflächen im jahreszeitlichen Verlauf ausgeprägter als das von Wiesen.

Wie Abb. 4.3-4 zeigt, weisen trockene Wiesen, wie sie in ariden Gebieten mehr als in humiden Gebieten vorkommen, im Infrarotbereich geringere Reflektionsgrade auf als feuchte Wiesen. Im Bereich des sichtbaren Lichtes wirkt sich der Feuchtigkeitsgehalt weniger stark auf das Reflektionsverhalten der Wiesen aus.

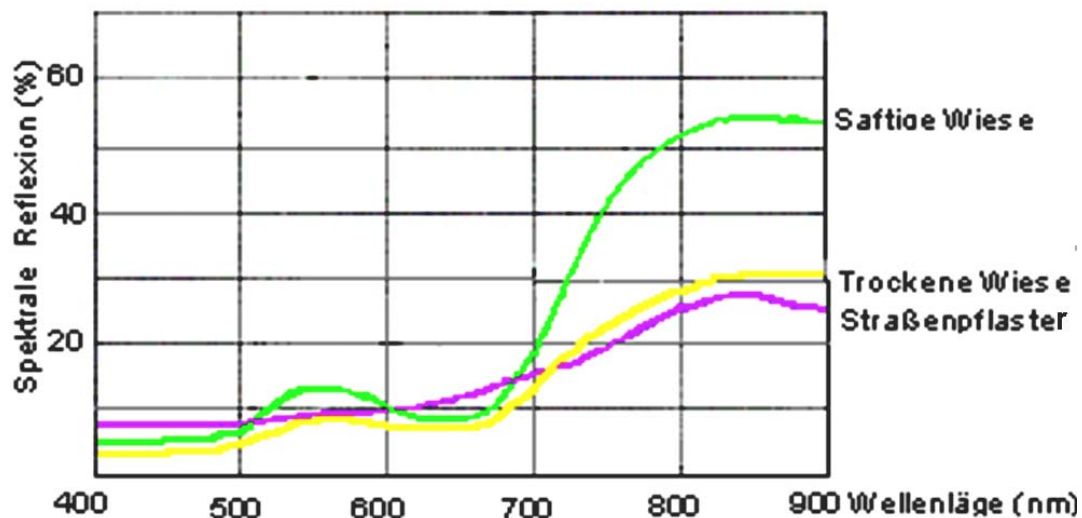


Abb. 4.3-4: Spektrale Reflexion verschiedener natürlicher Oberflächen im Bereich von 400-900 nm, entsprechend der Sensibilität eines panchromatischen Luftbildes. Quelle: Schwidofsky & Ackermann (1976).

Bezüglich ihrer flächenhaften Ausdehnung und Bedeutung sind Verkehrsflächen und Überbauungen die wichtigsten anthropogenen Bodenbedeckungen. Die Materialvielfalt für Gebäudebedachungen und Verkehrsflächenbefestigungen sind in ariden Gebieten, wie z.B. im Nahen Osten, weniger vielfältig als in den Ländern Europas, wo als Dachbeläge z.B. Tonziegel, Dachpappe, Teerbeläge, Schiefer, Beton oder

Metall und für Straßenbeläge Bitumen, Beton, Natur- und Kunststeinpflaster eingesetzt werden. Das Reflektionsverhalten dieser Materialien differiert sehr stark. So resultiert insbesondere in kleinteiligen, strukturreichen, urbanen Gebieten Europas ein Spektralmix der verschiedenen Materialien. Das Straßenpflaster zeigt im Infrarotbereich wesentlich geringere Reflektionsgrade als die saftige Wiese. Aufgrund des Einflusses der Oberflächenrauigkeit zeigen Pflasterstraßen und Schotterdecken ein geringeres Reflektionsverhalten als Asphaltstraßen.

Für die Erhebung von Fernerkundungsdaten ist es wichtig, dass sich die Geländeoberfläche und die auf ihr befindlichen Objekte gegenüber der auftreffenden Strahlung unterschiedlich verhalten.

4.4 Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit sind Daten des Satelliten QuickBird, dessen Sensor zu den passiven optischen Systemen zählt. Die Satellitenbildaufnahme zeigt einen Ausschnitt der Stadt Sanaa in Jemen, siehe Abb. 5.1.2-2. Die unter dem Einfluss der Halbwüsten- und Wüstenklimate herrschenden ariden Bedingungen in dieser Region, wirken sich auf das Spektralverhalten der Geländeoberflächen aus.

5. Datengrundlagen

Entsprechend der Zielsetzung bilden Fernerkundungsdaten die entscheidende Datengrundlage der Studie. Es handelt sich dabei um Scannerdaten optischer Systeme. Nähere Informationen finden sich in Abschnitt 5.2.

5.1 Untersuchungsgebiet

Bei dem Untersuchungsgebiet (Abb. 5.1-1) handelt es sich um einen Ausschnitt der Stadt Sanaa, der Hauptstadt des Jemen, südwestlich der arabischen Halbinsel, zwischen den Bergen Ng'um im Osten und 'Ayban im Westen, in 2200 m Höhe. In ihrer Morphologie und Struktur entspricht Sanaa dem Typus der orientalischen Stadt.

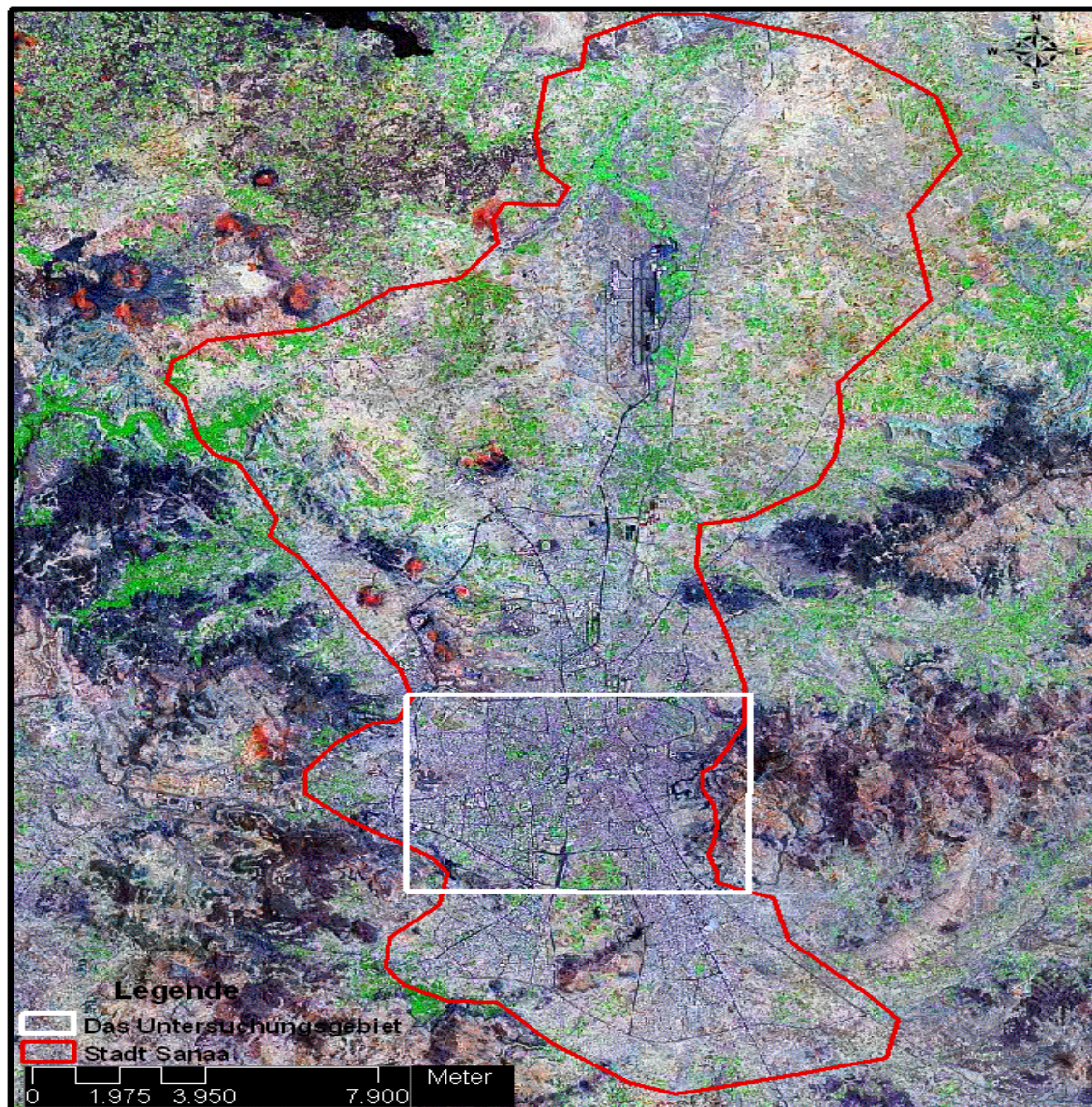


Abb. 5.1-1: Satellitenbildaufnahme vom Landsat ETM 2000 vom Untersuchungsgebiet in der Stadt Sanaa. Quelle: USGS (2000).

5.1.1 Sanaa: Abriss der historischen, demographischen und wirtschaftlichen Entwicklung

Sanaa ist eine der ältesten städtischen Siedlungen der Menschheit. Sie existiert mindestens seit dem 5. Jahrhundert vor Christus (Lücke, 1993). Am Anfang war Sanaa nur ein kleines Dorf, das sich nach und nach mit den in der Nähe befindlichen kleinen Siedlungen vereinigte. Um die Sicherheit der Stadt zu garantieren, wurden zahlreiche Burgen und eine Mauer um die Stadt gebaut. Sanaa hatte zu dieser Zeit eine Fläche von ca. 1,68 km² und ihre Mauer war 6,3 km lang (Al Ashawy, 1997). In der Stadt gab es zahlreiche kleine Felder, auf denen zum Teil bis heute Obst und Gemüse angebaut werden. Außerdem gab es zahlreiche Brunnen, um die Stadt und ihre Felder mit Wasser zu versorgen.

Ab der Mitte des 16. Jahrhunderts weitete sich das Stadtgebiet Sanaas über die alte Stadtgrenze hinaus aus. Westlich der Stadtmauer entstanden neue Siedlungen wie Bi'r Al-'Azab und Al Qa'a. Um beide Stadtviertel wurde Ende des 17. Jahrhunderts eine Stadtmauer gebaut, die an den ältesten Teil der Stadt Sanaa grenzt.

In der so genannten zweiten Phase der Stadtentwicklung, die die Jahre von 1538 bis 1961 umfasst, wuchs die Stadtfläche auf 2,4 km² an (Al Ashawy, 1997). Die Länge der Stadtmauer betrug ca. 12,5 km. Außerhalb der Stadtbegrenzung gab es keine Siedlungen oder Häuser, sondern nur Felder, die in der Regenzeit bebaut wurden. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts lebten in der Stadt ca. 30.000 Menschen. Die Wasserversorgung war durch eine vom Berg Nq'um zur Stadt führenden oberirdischen Wasserleitung gewährleistet.

Nach der zweiten osmanischen Eroberung 1872 erfuhr Sanaa einen starken Aufschwung. Insbesondere die Einbeziehung der Stadt in den großen osmanischen Staats- und Wirtschaftsverband und mit dem Bemühen um eine an westlichen Vorbildern orientierte Organisation von Wirtschaft und Gesellschaft flossen erhebliche Geldbeträge nach Sanaa. Mit ihnen waren kräftige Impulse für die Stadtentwicklung und Stadtgestaltung verbunden (Kopp & Wirth, 1990). Nach vorsichtiger Schätzung lebten in Sanaa um 1880 25.000 arabische Einwohner (McCarthy, 1979) und außerdem etwa 3.000, später 5.000 von der osmanischen Staatskasse besoldete Offiziere, Beamte, Lehrer usw....

Die Häfen der Arabischen Halbinsel am Roten Meer waren seit der Einführung der Dampfschiffahrt und der Eröffnung des Suezkanal 1869 an die Ströme des modernen Welthandels und Weltverkehrs angeschlossen. Importgüter konnten nun

billig im Hafen von Al-Hudaydah umgeschlagen und von dort nach Sanaa transportiert werden. In beiden Städten siedelten sich welterfahrene und kapitalkräftige Großhändler und Importeure an.

Einer flächenhaften Ausweitung städtischer Begrenzung und damit einer Zunahme der Bevölkerungszahl waren enge Grenzen gesetzt. Die Territorien der Stämme reichten bis an die Stadtmauern. Aufgrund des „Guwara“, das traditionelle Landverkaufsverbot, war es den Städtern verwehrt, Land außerhalb der Stadt zu erwerben. Hinzu kam, dass die Stadtbevölkerung ihren Bedarf an leicht verderblichen Agrarprodukten (Obst, Gemüse, Milch) im Stadtgebiet selbst produzieren musste, da einerseits Sanaa aus den Pachteinnahmen nur haltbare Agrarerzeugnisse (vor allem Getreide) erreichte, andererseits die Stämme der Umgebung weder bereit noch in der Lage waren, den städtischen Markt zu beliefern. Der hohe Anteil an Gartenland in der Stadt musste also erhalten bleiben und durfte nicht überbaut werden.

Nach Abzug der türkischen Besatzungsmacht 1918/19 erlebte die Stadt bis zur Ermordung des Imam Yahya⁵ 1948 (Hünefeld, 2010) eine Periode ungestörter Entwicklung. Mit der Ausrufung der Arabischen Republik Jemen 1962 (Nordjemen), begann ein Bürgerkrieg, der 1970 zu Ende ging. Danach etablierte sich die Republik mit einer Präsidialverfassung und starker zentralistischer Ausrichtung der staatlichen Administration, aber auch mit einer völlig liberalisierten Volkswirtschaft kapitalistischer Prägung. Dadurch wandelten sich entscheidende Rahmenbedingungen. Das traditionelle Landverkaufsverbot „Guwara“ wurde aufgehoben. Der Bodenspekulation stand damit nichts mehr im Wege. Gebaut wurde, wo Land käuflich war. Das Prinzip der Selbstversorgung der Stämme als auch innerhalb der Stadt wurde von einer marktwirtschaftlichen Orientierung abgelöst. Das belebte den Binnen- und Außenhandel, wovon Sanaa aufgrund seiner Lage, seines Status als Hauptstadt und dank seiner erfahrenen Händlerschicht besonders profitierte. Dies ermöglichte aber auch eine Überbauung des Gartenlandes innerhalb der Altstadt.

Um einer Abwanderung der Bevölkerung aus der Altstadt entgegenzuwirken, versuchte die Regierung dort die Wohnqualität zu verbessern, indem sie 1982 die Trinkwasser- und Stromversorgung sowie die Straßenbeleuchtung ausbaute. Zwei Jahre später wurde ein zentrales Abwasserentsorgungssystem eingeführt. Mit Unterstützung westlicher Geberorganisationen wurde die vorhandene Infrastruktur modernen Standards angepasst (Thielebein, 2000).

⁵ Imam Yahya Hamid ad-Din (1869-1948), König des Jemen und Oberhaupt des fünferschiitischen Islams

Sanaa war die Hauptstadt des Nordjemen und gleichzeitig kulturelles, wirtschaftliches und administratives Zentrum des Landes mit regen Handelsaktivitäten. Es übte damit eine starke Anziehung auf die Menschen, vor allem in den ländlichen Regionen aus, von denen viele, in der Hoffnung auf bessere Arbeits- und Lebensbedingungen, in die Stadt immigrierten. So stieg die Bevölkerung Sanaas von 96.000 (1970) auf 280.000 (1981) an (Kopp & Wirth, 1990).

Durch die seit 1962 existierende Autobahn zwischen Sanaa und der Hafenstadt Al-Hudaydah konnten die für den Ausbau sowie für den täglichen Bedarf benötigten Materialien in die Stadt transportiert werden. Ende der 60er Jahre betrug die Fläche Sanaas ca. 29 km². Bis 1977 wuchs die Fläche der Stadt auf ca. 32 km² an. Es entstanden neue Stadtviertel für Politiker, Händler, Beamte und gut verdienende Bürger. Die die Stadt umgebenden alten wie neuen Siedlungen haben sich im Laufe der Zeit mit der immer weiter wachsenden Stadt Sanaa verbunden oder wurden in die Stadtfläche integriert. So erweiterte sich die Fläche bis zum Jahre 1986 auf 95 km² (Al Saady, 1988) und bis 1994 auf 140 km² (Al Ashawy, 1997). Der Ausbau der Stadt nach 1970 erfolgte auf der Grundlage eines Stadtentwicklungsplans. Die Stadt entwickelt sich bis heute weiter und wächst vor allem entlang der regionalen Straßen. Nach Osten ist eine weitere Ausdehnung der Stadt durch den Berg Nq'um begrenzt. Nach der Vereinigung der jemenitischen arabischen Republik (YAR) im Norden und der demokratischen Volksrepublik Jemen (DVR) im Süden. 1990 wurde Sanaa Hauptstadt des vereinigten Jemens. Die seit 1988 zum UNESCO-Weltkulturerbe zählende Altstadt blieb von der explosionsartig wachsenden Bevölkerungszahl der Landeshauptstadt nahezu verschont. Dort lebten 2004 weniger als 63.398 Menschen von der insgesamt 1,7 Mio. in Sanaa lebenden Bevölkerung (Kopp & Wirth, 1990).

5.1.2 Struktur der Stadt Sanaa

Das Untersuchungsgebiet ist Teil einer städtischen Siedlung. Eine eindeutige Definition des Stadtbegriffes gibt es nicht. Dem geographischen Stadtbegriff wird eine Vielzahl von Merkmalen mit unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten als Bestimmungskriterien zugrunde gelegt. Dazu zählen:

- größere Siedlung (z.B. nach Einwohnerzahl),
- Geschlossenheit der Siedlung (kompakter Siedlungskörper),
- hohe Bebauungsdichte und überwiegende Mehrstöckigkeit der Gebäude (zumindest im Stadtkern),

- deutliche funktionale innere Gliederung (z.B. City, Wohnvierteln),
- hohe Wohn- und Arbeitsplatzdichte,
- Dominanz wirtschaftlicher Aktivitäten des sekundären und tertiären Sektors,
- Mindestmaß an Zentralität usw. (Heineberg, 2000).

Auf Grundlage dieser Merkmale wurden verschiedene idealtypische Stadtmodelle entwickelt, die in überschaubarer Form die räumliche Organisation einer Stadt und die Struktur ihrer Gesellschaft und Wirtschaft darstellen und Erklärungszusammenhänge aufzeigen. Dabei ist es notwendig, entsprechend der Differenzierung in verschiedene Kulturkreise, unterschiedliche Stadtmodelle zu entwickeln, wie z.B. lateinamerikanische, orientalische oder angloamerikanische Stadtmodelle.

Das Untersuchungsgebiet stellt einen Ausschnitt aus der Stadt Sanaa dar, welche zum kulturgenetischen Stadtyp islamisch-orientalische Stadt gehört. Der Name macht deutlich, dass sich hier der orientalische und der islamische Kulturraum, überlagern und sie prägen. Im 19. Jh. unterlag der städtische Idealtypus westlich-modernen Einflüssen. Dies spiegelt sich, in dem Modell von Seger (1975 und 1997), am Beispiel Teherans (um 1970) entwickelt, und in dem darauf aufbauenden Modell von Ehlers (1993), wieder. Die neue orientalische Stadt ist zweipolig aufgebaut und zeigt eine klare Wohnsegregation der einzelnen Sozial- und Einkommensschichten (Heineberg, 2000). In Abb. 5.1.2-1 ist das Modell von Ehlers (1993) dargestellt. Danach hat das Zentrum der Stadt zwei Kerne: die Altstadt mit dem traditionellen Bazar und den neuen Central Business District (CBD) (in Abb. 5.1.2-2 markiert), in deren peripheren Rand sich die neuen und modernen Geschäfte befinden. Der zentrumsseitige und ältere CBD - Rand ist altes Oberschichtviertel mit Regierungs- und Verwaltungsfunktion. Zwischen den am Rande gelegenen Villenvororten und dem CBD erstreckt sich eine Zone mit modernen mehrgeschossigen Mietshäusern. Wohngebiete unterer Einkommensgruppen sind die Altstadt und benachbarte jüngere Viertel. Wegen der späten Industrialisierung im Orient befinden sich die industriellen Großbetriebe im Allgemeinen von den dicht bebauten Wohngebieten getrennt. Sie orientieren sich meist an den Ausfallstraßen. In der Altstadt und den angrenzenden Wohngebieten findet sich allerdings Kleinindustrie und Gewerbe.

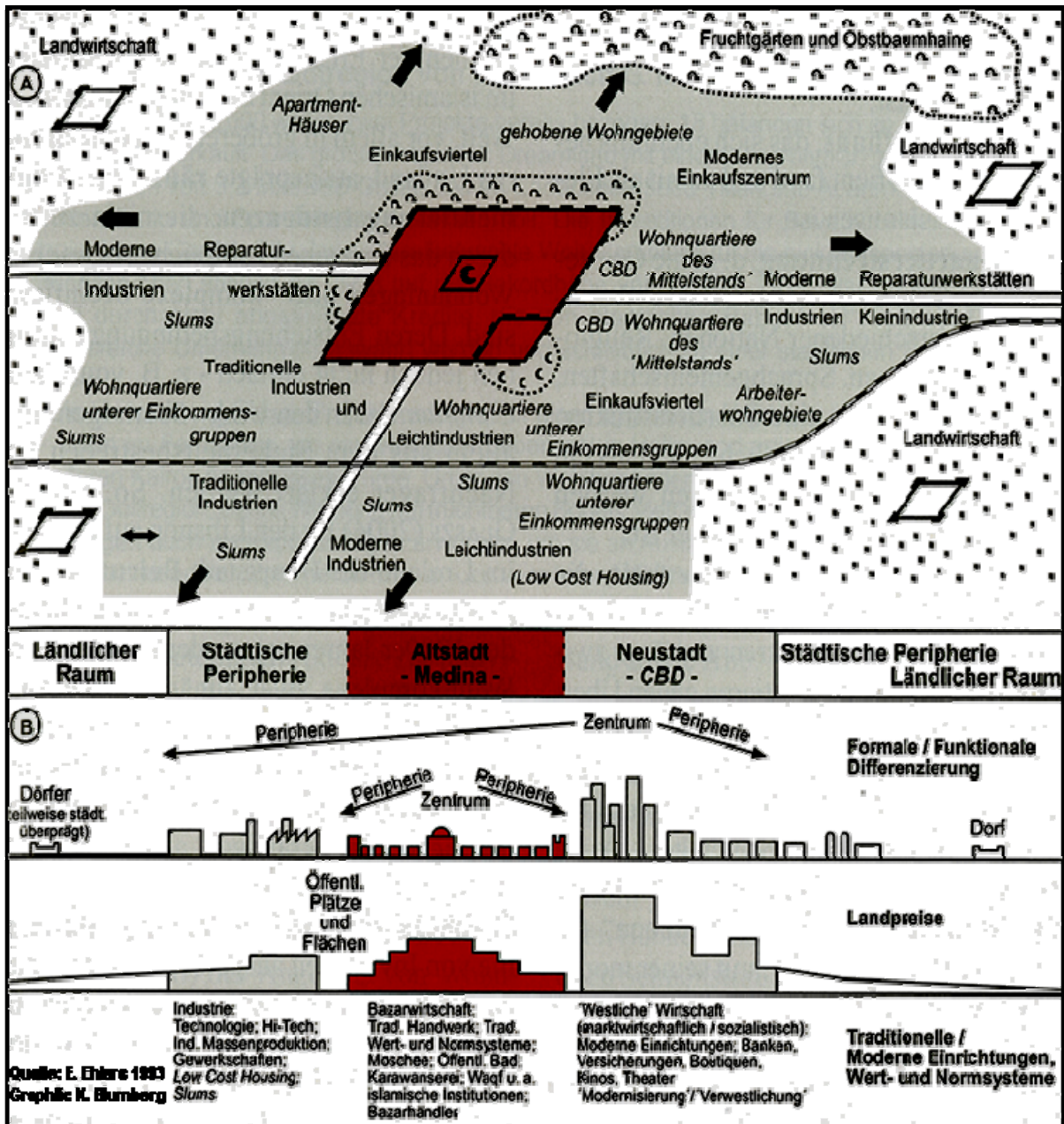


Abb. 5.1.2-1: Modell der islamischen Stadtstruktur von Ehlert. Quelle: Heineberg (2006).

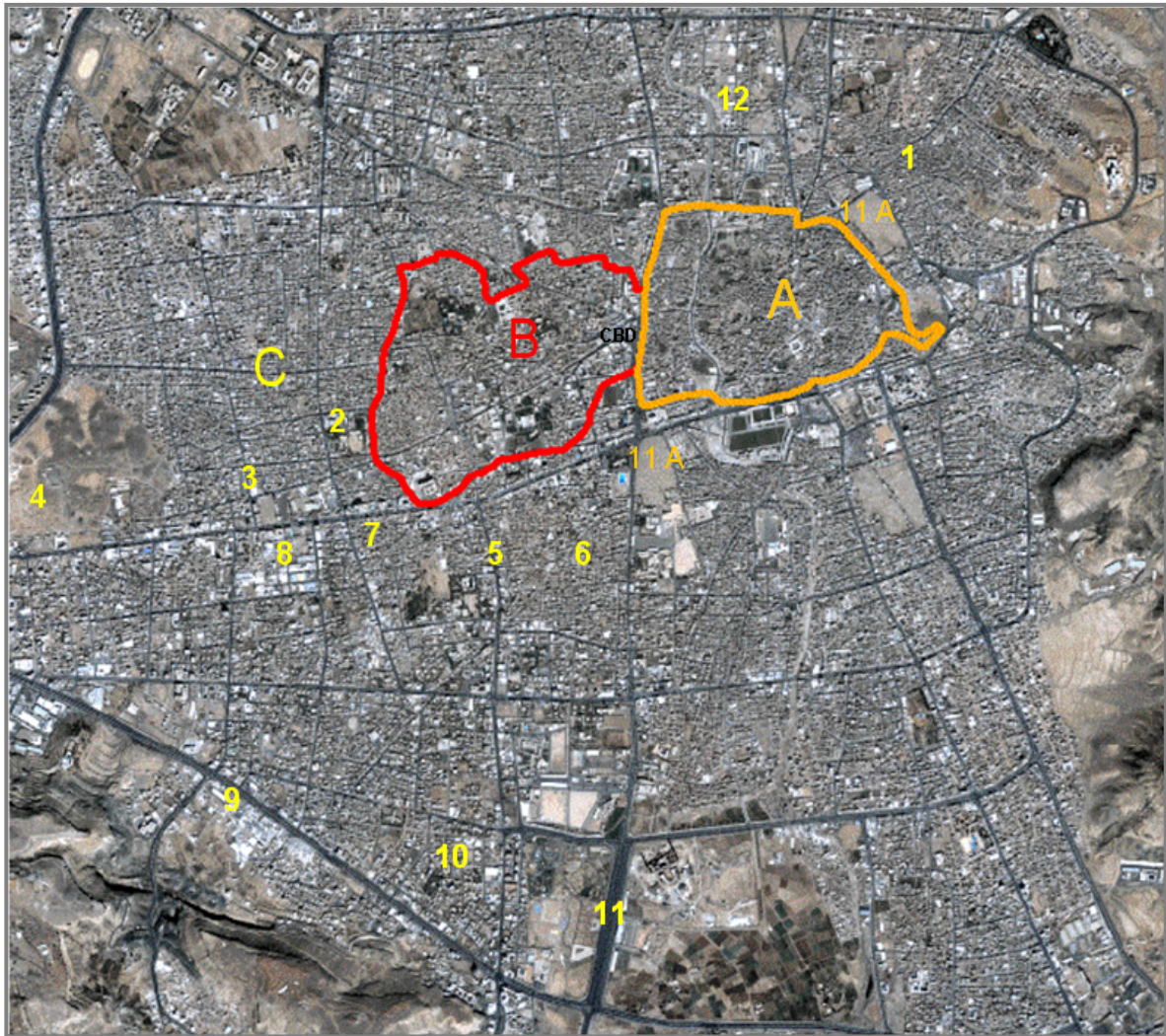


Abb. 5.1.2-2: QuickBird-Aufnahme (2004) vom Untersuchungsgebiet in Sanaa, Bereich A – Altstadt (umrandet mit oranger Kontur), Bereich B – ehemalige Garten- und Vorstadtquartiere (umrandet mit roter Kontur), Bereich C – Umgebung von A und B, Ziffern markieren Objekte. Eigene Darstellung.

Im Folgenden soll das Untersuchungsgebiet, das einen großen Teil der Stadt Sanaa abdeckt, mit dem Idealschema der islamisch-orientalischen Stadt verglichen werden, siehe dazu Abb. 5.1.2-2. Die traditionelle Altstadt (A) befindet sich etwas nordöstlich von der Mitte des Untersuchungsgebietes. Wie im Modell von Ehlers (1993) beschrieben, liegen heute außerhalb, aber in unmittelbarer Nähe der Altstadt, die Wohnquartiere der unteren Einkommenschichten. Es handelt sich dabei um die nördlich und nordöstlich von ihr gelegenen alten Viertel Mūsyk und Sh'uūp (C1), die dicht bebaut und durch enge Straßen und Gassen gekennzeichnet sind.

Bereits im 16. Jahrhundert wurde die Altstadt um Garten- und Vorstadtquartiere (B) im Westen erweitert. Es handelt sich dabei um einen weiträumigen Bereich mit Bewässerungsgärten (B1), der ungefähr der Fläche der ummauerten Altstadt entspricht. In den 80er Jahren befanden sich dort einige Ministerien, Botschaften und diplomatische Vertretungen (B2), siehe Abb. 5.1.2-3.

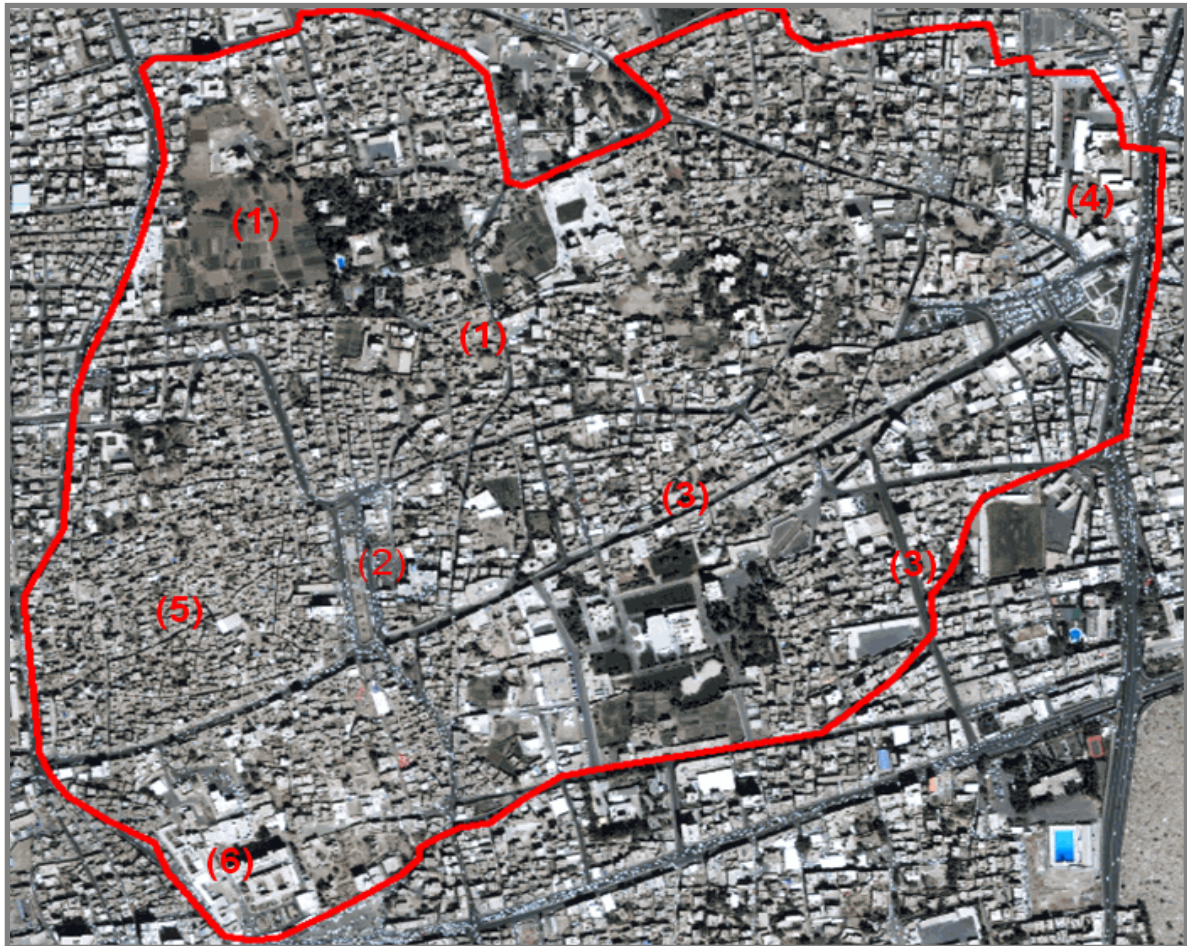


Abb. 5.1.2-3: QuickBird-Aufnahme (2004) von Bereich B des Untersuchungsgebietes (umrandet mit roter Kontur entlang der ehemaligen Stadtmauer), rote Ziffern markieren Objekte (beschrieben im Text). Eigene Darstellung.

Die großen Durchgangsstraßen und Erschließungsachsen vor allem im Süden und Osten dieses Gebietes sind zu bevorzugten Handels- und Dienstleistungsstandorten (B3) geworden. Dieses Gebiet kann mit dem CBD des Idealschemas von Ehlers (1993) verglichen werden. Zwischen dem CBD und dem Westtor der Altstadt liegt ein ovaler, teilweise noch mauergesäumter Bezirk (B4), in dem neben Ödland- und Trümmerflächen Verwaltungs- und Militärbauten, sowie die ehemaligen Imam-Paläste zu finden sind.

Westlich der Gartenvorstadt Bi'r Al-'Azab liegt das ehemalige Judenviertel (B5). Nachdem die meisten jemenitischen Juden 1949/50 nach Israel ausgewandert waren, wurde dieses Wohnviertel hauptsächlich von ärmlichen ländlichen Zuwanderern bevölkert. Dies entspricht weniger dem Modell der islamisch-orientalischen Stadt. Südlich dieses Viertels befindet sich ein großes staatliches Krankenhaus (B6).

Bewegt man sich weiter in westlicher Richtung (Abb. 5.1.2-2), gelangt man zu dem Standort der alten Universität (C2) und zu den zahlreichen bekannten Gewerbestraßen (C3), wie Al-Wahdh-Straße, Al-'Ashryn-Straße, Ar-Riyad-Straße und die Ar-R'ibat-Straße. Dort lebt die, der Mittelschicht angehörende Stadtbevölkerung. Auf den Brachflächen dieses Gebietes wurden jetzt neue amtliche Gebäude (C4) gebaut. Auch südlich der ehemaligen alten Stadtmauer der alten Gartenvorstadt befinden sich moderne Einkaufsstraßen (C5), Wohnhäuser der Mittelschicht (C6), Schulen (C7) und ein Industriepark (C8), so wie es im Idealschema von (Ehlers, 1993) (Abb. 5.1.2-1), dargestellt wurden ist. Weiter südlich dieses Gebietes bis zur As-Satyn (Sechzigmeter)-Straße (C9), die um die ganze Stadt herum führt, liegt das neue Diplomatenviertel mit Villen und Oberschichtwohnhäusern (C10) und dem ehemaligen Flugplatz (C11). Südlich der Straße wurden Gebäude für Ministerien, amtliche Einrichtungen sowie Häuser für die Mittel- und Oberschicht gebaut. Andere bürgerliche Wohngebiete liegen noch weiter südlich, außerhalb des Untersuchungsgebietes. Traditionelle- und Leichtindustrie (C12) (z.B. Spinnerei und Weberei, Kunststoffrohrfabrik, Verpackungsindustrie, Papierindustrie oder Pharmaindustrie) befinden sich in Sanaa, wie in dem Modell dargestellt, außerhalb, aber in unmittelbarer Nähe der Altstadt. Die großen Fabriken liegen an den Hauptstraßen außerhalb des Untersuchungsgebietes.

Das Idealschema von Dettmann (1969) (Abb. 5.1.2-4) zeigt wesentliche traditionelle Elemente des Stadtaufbaus sowie der funktionalen und sozialräumlichen Gliederung der Altstadt in den Städten Nordafrikas und Vorderasiens. Charakteristische bauliche Merkmale der traditionellen orientalischen Altstadt sind eine große Moschee als geistliches, intellektuelles und öffentliches Zentrum, der Sūq/Bazar als traditioneller wirtschaftlicher Mittelpunkt mit Anordnung der einzelnen, meist räumlich sortierten Branchen in Ladenstraßen (überdeckte Gassen für Einzelhandel und Handwerk), überdachten Hallen oder arkadengesäumten Innenhofkomplexen (sog. Khane für Großhandel und Gewerbe), eine Stadtmauer, häufig mit integriertem Palast als ehemaliger Sitz der stadtfremden Herrschaft und einem Friedhof außerhalb. Die Altstadt

ist gegliedert in Wohnquartiere, in denen die Menschen nach Religion, Nationalität, Sprachgemeinschaften oder Sippen getrennt voneinander leben. Erschlossen werden die Wohnviertel von einigen wenigen Hauptstraßen, die das Stadtzentrum mit den Toren verbinden. In den Stadtvierteln verlaufen enge, verwinkelte Nebenstraßen, von denen die meisten als Sackgassen enden (Wirth, 1975). Der Grundriss der Sackgassen als auch das dominante abgeschlossene Innenhofhaus dienen dem Prinzip der Absonderung und Abschottung zu Nachbarn anderer Religionen und Herkunft und dem Bestreben nach Sicherheit. Jedes Wohnquartier ist mit einem Subzentrum (lokaler Sūq, Moschee, Bad (Hamam) etc.) ausgestattet.

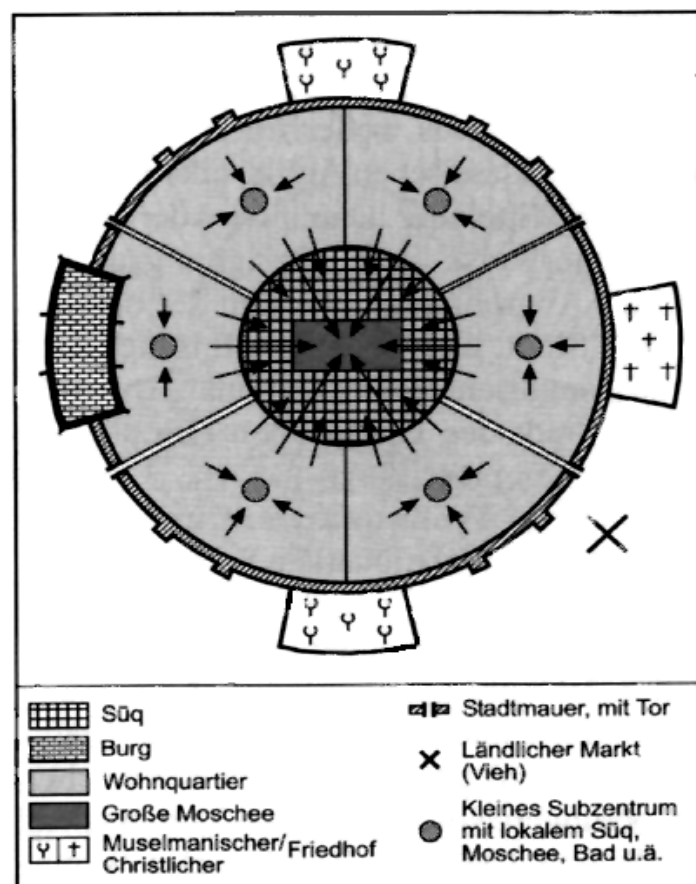


Abb. 5.1.2-4: Idealschema der islamisch-orientalischen Stadt nach Dettmann (1969). Quelle: Heineberg (2006).

Der Sūq (A1) der Altstadt von Sanaa (Abb. 5.1.2-5), liegt wie in dem Modell von Dettmann (1969), zentral. Der Kern des traditionellen Geschäftszentrums besteht aus einem Einzelhandel-Flächenbazar, dessen Gassen im Schachbrettmuster angeordnet und von eingeschossigen steinernen Ladenzeilen flankiert werden. Dieser Bazar ist zwar nicht absperrbar, wie sonst üblich, hat aber keinerlei Wohnfunktion.

Nur wenige kleine Gassenabschnitte sind überdacht (Wirth, 2000). Südwestlich des Sūqs liegt der große fast quadratische Gebäudekomplex der Großen Moschee (A2) (Abb. 5.1.2-5).

Eine breite Verkehrsachse (A3) verbindet den Sūq mit dem Nord-, Süd- und dem Zitadellentor. Diese drei Achsen sind, als Hauptleitlinien der Passantenströme, sowie der Sūq von Werkstätten und Läden gesäumt. In den dazwischen liegenden, dicht bebauten Kissektoren stehen traditionelle mehrgeschossige Wohnhäuser (A4). In den Randgebieten befindet sich bewässertes Gartenland (A5), das zu den Moscheen gehört.

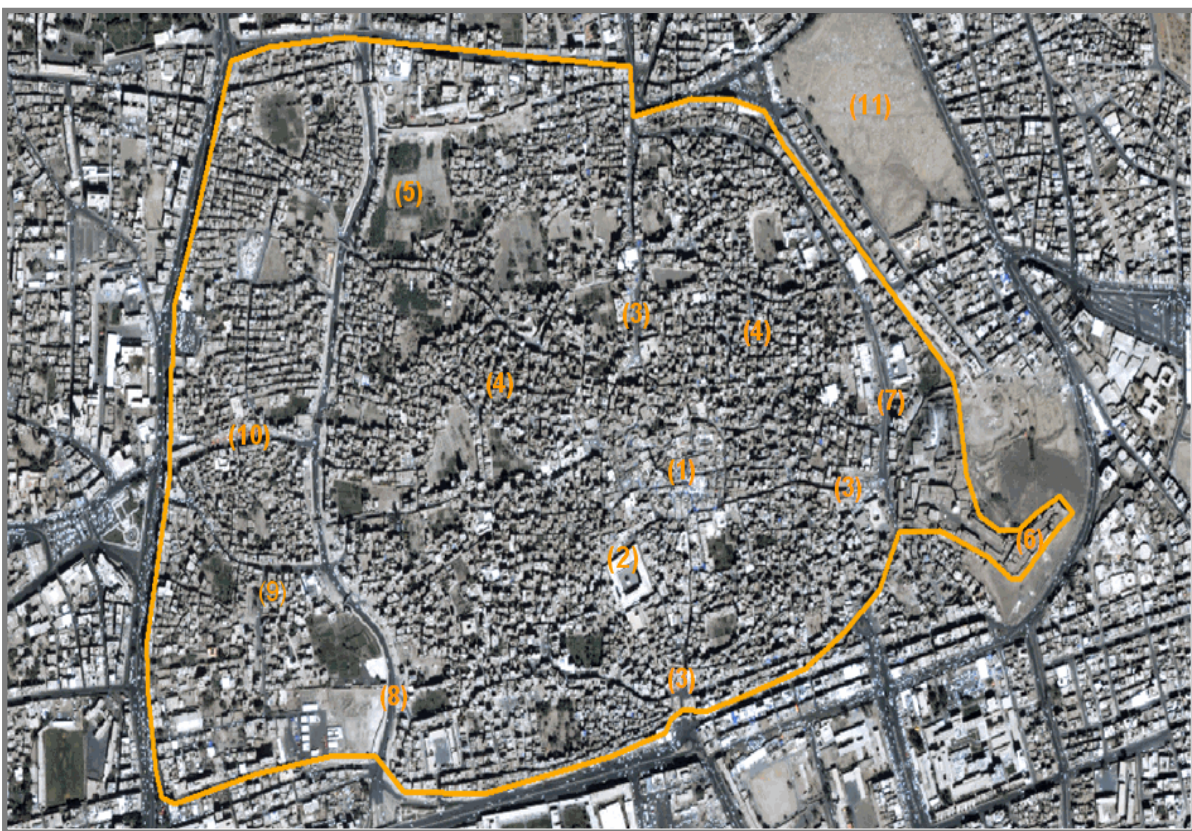


Abb. 5.1.2-5: QuickBird-Aufnahme (2004) von Bereich A des Untersuchungsgebietes (umrandet mit oranger Kontur, entlang der ehemaligen Stadtmauer), Ziffern markieren Objekte, die im Text genannt werden. Eigene Darstellung.

Ganz im Osten der Altstadt liegen auf einer Erhebung die Gebäudekomplexe der Zitadelle (A6, Abb. 5.1.2-5). Zwischen ihr und dem Altstadt kern verläuft in nord-südlicher Richtung ein breiter Straßenzug (A7) mit platzartigen Erweiterungen, der von repräsentativen Bauten aus den beiden Perioden osmanischer Herrschaft gesäumt ist. Westlich und nordwestlich des Altstadt kerns erstreckt sich bis zu dem in nord-südlicher Richtung verlaufenden Wadibett (A8) ein Bereich mit deutlich lockerer

Bebauung (A9), der von verhältnismäßig großen Gartenkomplexen durchsetzt ist, die bis heute von der städtischen Überbauung ausgespart worden sind. Diese Strukturen sind das Besondere der Altstadt Sanaa und nicht in dem Modell von Dettmann (1969) veranschaulicht. Der Bereich westlich des Wadis ist grundsätzlich genauso strukturiert. Hier sind anstelle der Gärten vielfach jüngere Wohnviertel mit allerdings noch im traditionellen Stil gehaltenen Häusern zu finden.

Zwei den Bereich in der Mitte querende, ladengesäumte Gassen (A10), die vom Westtor der Altstadt ausgehen, stellen die Verbindung zwischen den modernen Geschäftsvierteln im Westen und dem Altstadt kern mit dem Sūq im Osten her.

Wie man in dem Idealschema von Dettmann (1969) erkennen kann, befanden sich auch in Sanaa die Friedhöfe (A11) außerhalb der Stadt, an der Stadtmauer (Abb. 5.1.2-2 und 5.1.2-5).

5.2 Datengrundlagen

Satellitendaten

Für die vorliegende Arbeit standen 48 km² QuickBird-Daten zur Verfügung, die im Off-Nadir-Modus das Untersuchungsgebiet am 08.08.2005, um 07:51 Uhr *Greenwich Mean Time* (GMT), d.h. 10:51 Uhr Ortszeit, panchromatisch und multispektral, abbilden. Die Satellitendaten gehören zu der Produktgruppe Standard Imagery, Produktlevel 2A, was bedeutet, dass sie bereits radiometrisch korrigiert wurden. Sie liegen im Dateiformat GeoTiff⁶ vor.

Statistische Daten

Die für diese Arbeit genutzten statistischen Daten sind in Tabelle 5.2-1 aufgelistet. Es handelt sich dabei um die Gebäudeanzahl der Stadt Sanaa, die fast 240.000 beträgt, gegliedert nach ihren verschiedenen Dachmaterialien. Dabei wird ersichtlich, dass ca. die Hälfte aller aufgelisteten Häuser ein Dach aus Beton hat und fast jeweils ein Viertel ein Dach aus Holz und Beton oder Holz und Lehm. Die am wenigsten verwendeten Baumaterialien sind Blech und Heu in Verbindung mit Lehm.

⁶ GeoTiff ist ein TIF-Format (engl. Tagged Image File Format), ein Dateiformat zur Speicherung von georeferenzierten Bilddaten.

Tabelle 5.2-1: Gebäudeanzahl mit verschiedenen Dachmaterialien. Quelle: CSO (2004).

Beton	Holz & Beton	Holz & Lehm	Holz	Blech	Heu/ Balken	Heu & Lehm	Blech & Lehm	anderes Material	Summe
115.053	61.028	55.742	5.683	302	283	254	135	310	238.790

Klimadaten

Aus den folgenden Graphiken (Abb. 5.2-1 und Abb. 5.2-2) können die Klimadaten für die Stadt Sanaa aus dem Jahr 2004 entnommen werden. In Abb. 5.2-1 sind für jeden Monat die maximalen, minimalen und durchschnittlichen Lufttemperaturen angegeben. Im Juli werden die höchsten Temperaturen mit 23,5°C im Durchschnitt erreicht. Das Monatsmaximum liegt bei 32,7°C und das Monatsminimum bei 12,8°C. Die tiefsten Temperaturen weisen die Monate Dezember und Januar mit Durchschnittstemperaturen von 14,5°C und 14,3°C auf.

Anhand der Klimadaten in Abb. 5.2-2 ist erkennbar, dass die Niederschlagsmenge in den Monaten März und April mit 60 mm am höchsten ist. Es handelt sich dabei um die so genannte Regenzeit. In den Monaten September bis Januar und Mai bis Juni fällt die Niederschlagsmenge auf null ab, es herrscht Trockenheit.

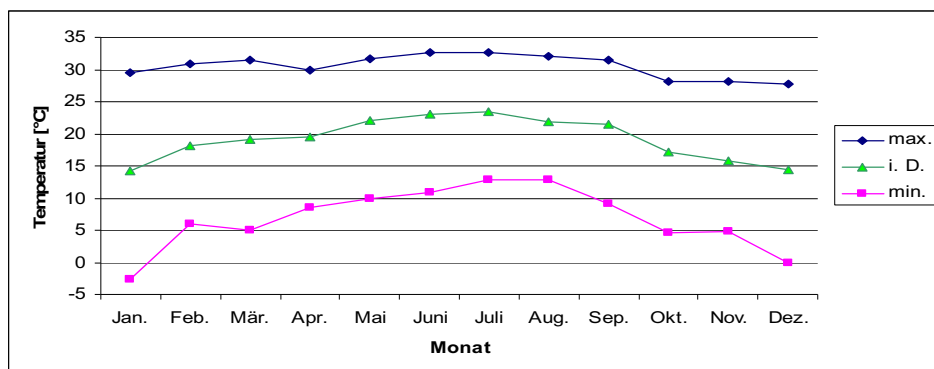


Abb. 5.2-1: Angabe der maximalen, minimalen und durchschnittlichen Lufttemperaturen der Stadt Sanaa für jeden Monat des Jahres 2004. Quelle: Klimadaten von CAMA (2004), Graphik eigene Darstellung.

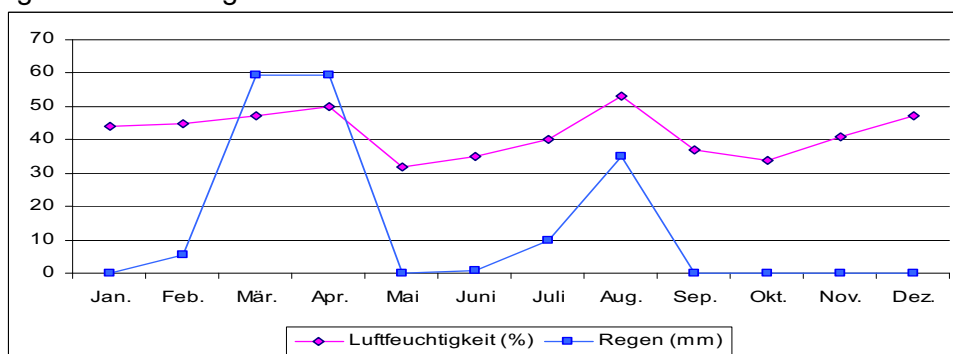


Abb. 5.2-2: Angabe der Luftfeuchtigkeit (in Prozent) und der Regenmenge (in mm) für die Stadt Sanaa für jeden Monat des Jahres 2004. Quelle: CAMA (2004). Graphik eigene Darstellung

Luftbilder und Kartenunterlagen

Vom Untersuchungsgebiet stehen für die Validierung der Klassifikationsergebnisse und für die visuelle Interpretation des Satellitenbildes verschiedene Karten und Luftbilder in unterschiedlichen Maßstäben zur Verfügung. Sie sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Tab. 5.2-2: genutzte Karten und Luftbilder vom Untersuchungsgebiet in Sanaa

Nr.	Kartenname	Gitternetzdaten	Maßstab	BlattNr.	Datum	Quelle
1	Orthophoto Map	UTM, Zone 38. WGS 84	1: 10000	B3	1994	Survey Authority of Yemen
2	Orthophoto Map	UTM, Zone 38. WGS 84	1: 10000	B4	1994	Survey Authority of Yemen
3	Orthophoto Map	UTM, Zone 38. WGS 84	1: 10000	B5	1994	Survey Authority of Yemen
4	Orthophoto Map	UTM, Zone 38. WGS 84	1: 10000	B6	1994	Survey Authority of Yemen
5	Gebäudegrundrisskarte		1:2500			Survey Authority of Yemen
6	Luftbild		1:20000	145	16.01. 1994	MAPSgeosystems, von Survey Authority of Yemen
7	Luftbild		1:20000	146	16.01. 1994	MAPSgeosystems, von Survey Authority of Yemen
8	Luftbild		1:20000	147	16.01. 1994	MAPSgeosystems, von Survey Authority of Yemen
9	Stadtplan Sanaa	UTM, Zone 38. WGS 72	1:5000	MB1594	1979	Ministry of Housing and Urban Planning, Yemen
10	Stadtplan Sanaa	UTM, Zone 38. WGS 72	1:5000	MB1197	1979	Ministry of Housing and Urban Planning, Yemen
11	Stadtplan Sanaa	UTM, Zone 38. WGS 72	1:5000	MB1194	1979	Ministry of Housing and Urban Planning, Yemen

In-situ-Daten

Zur Orientierung der Satelliten- und der In-situ-Daten wurden zahlreiche GPS Punkte durch ein Garmin GPS Gerät für das Untersuchungsgebiet auf den Kreuzungen der Straßen und in den Ecken der Gebäude und Straßen aufgenommen. Diese sind in alle Richtungen, am Rand und der Mitte der Stadt verteilt.

5.3 Soft- und Hardwaresysteme

Für diese Arbeit wurden folgende Softwaresysteme vom Geographischen Institut der Universität Potsdam und vom DLR (Neustrelitz) genutzt: Erdas Imagine 8.6, eCognition 3, ENVI 4.5, ArcView 3.2, ArcGIS 9.3, Microsoft Office (Word, Excel, Powerpoint), Adobe Suite und andere. Als Hardware standen ein Computer (Intel Core 2Duo, 3GHz, 2 Festplatten 250 GB SATA2, 16 MB Cache, Grafikkarte Geforce 9800GTX- 512 Cache), Farbscanner (A 0) sowie ein GPS-Gerät zur Verfügung.

5.4 Zusammenfassung

Grundlage dieser Arbeit bilden die Fernerkundungsdaten, die durch andere Daten u.a. auch Geländedaten ergänzt und verifiziert werden. Von einem Ausschnitt der Stadt Sanaa in Jemen steht eine QuickBird Aufnahme von 2005 zur Verfügung. Es wurde untersucht, ob die Stadt Sanaa in ihrer Morphologie und Struktur dem Typus der orientalischen Stadt, wie sie in den Modellen von Dettmann (1969) und Ehlers (1993) in ihren wesentlichen Merkmalen dargestellt werden, entspricht.

6. Methoden und Verfahren

Bei den verwendeten Fernerkundungsdaten handelt es sich um nichtfotografische multispektrale Scannerdaten. Zu deren Auswertung werden Methoden und Verfahren der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt, wie sie in kommerziellen Softwaresystemen verfügbar sind, siehe Abschnitt 5.3. Zur Auswertung ergänzender Informationen und zur Kontrolle der Bildverarbeitung erfolgt auch eine visuelle Interpretation der zu analogen Farbkompositen gewandelten Digitaldaten. Beide Verfahren werden bei der Erzeugung der Datenprodukte, z.B. Realnutzungskarten oder 3D-Repräsentationen, miteinander verknüpft, um optimale Visualisierungsergebnisse zu erzielen.

6.1 Bildverarbeitungsverfahren

Störeinflüsse der Daten sollen durch die Vorverarbeitung der Bilder reduziert und interessierende Aspekte hervorgehoben werden. Zur Beseitigung von atmosphärischen Störungen und Datenfehlern durch Sensoren (wie z. B. Streifenmuster im Bild oder das Fehlen von ganzen Linien) werden radiometrische Korrekturverfahren eingesetzt. Die für diese Arbeit genutzten Satellitendaten von QuickBird waren bereits radiometrisch korrigiert. Für eine weitere Verwendung im Bildverarbeitungssystem von Erdas Imagine wurden sie in das Image Format (img) konvertiert. Zudem wurde eine Kanalkombination der Multispektralkanäle durchgeführt. Die weiteren durchgeführten Bildverarbeitungsschritte werden im Folgenden kurz beschrieben.

6.1.1 Geometrische Rektifizierung

Bei der geometrischen Rektifizierung werden Verzerrungen, verursacht z.B. durch Geländehöhenunterschiede, das Aufnahmesystem und die Aufnahmegeometrie, geometrisch korrigiert. Dazu werden Rasterdaten mittels einer Anzahl von Passpunkten an ein geodätisches Koordinatensystem angeglichen. Die Satelliten- und Luftbilder sowie die verwendeten Karten wurden mit mindestens 35 GPS Punkten an das UTM und Koordinatensystem WGS-84 angepasst.

6.1.2 Atmosphärische Korrektur

Die Einflüsse der Atmosphäre auf die Bilddaten führen, von Ausnahmen, wie z.B. Wolkenschatten, abgesehen, zu einer Aufhellung und Kontrastminderung. Ihre Wirkung ist abhängig vom Spektralbereich, vom Zustand der Atmosphäre während der Aufnahme, vom Sonnenstand, der Beobachtungsgeometrie und dem Gelände-relief (Albertz, 2007). Die atmosphärische Korrektur der Originaldaten ist ein am Beginn einer Reihe von Bildverarbeitungsverfahren stehender Schritt, der für die verwendete QuickBird – Aufnahme von 2005 vom DFD (Deutsches Fernerkundungs-datenzentrum) des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) mit dem vollautomatischen Verfahren „DurchBlick“ (Borg et al., 2000, Holzer-Popp et al., 2001) unter Einbeziehung aktueller Zusatzdaten zum Aufnahmezeitpunkt (z.B. Wasserdampf, Ozon, Höhenmodell, Aerosolmenge und -typ, Wolken/Schatten, Bodentyp) durchgeführt wurde. Dieses Verfahren besteht aus drei wesentlichen Komponenten: der Datenbank, dem Vorklassifikator und dem Strahlungs-Transport-Modell Exact (Popp, 1993, 1995). Zuerst findet eine Vorklassifizierung statt. Sie dient der Erkennung von Wolken, Wolkenschatten und Dunstgebieten sowie der Unterscheidung verschiedener Landbedeckungsklassen. Ihre Ergebnisse dienen der Erstellung der notwendigen Wolken- und Wolkenschattenmaske sowie der Bodentypkarte. Zur Assimilation externer Zusatzdaten (Wasserdampf, Feuchte), die im DFD operationell generiert werden, wird eine automatische Schnittstelle genutzt. Ein Strahlungstransportmodell dient der Invertierung des Satellitensignals in Boden-reflexgrade. Berücksichtigung finden dabei der Einfluss von Rayleigh- und Aerosol-streuung, Absorption durch Wasserdampf und Ozon und die Anisotropie pro Land-nutzungs-kategorie (bidirektionale Reflexionsverteilung am Boden). Aus den Rohdaten wird mittels Strahlungstransportrechnungen an automatisch detektierten „Dunkel-feldern“ (z.B. dunkle Vegetation wie dichte Kiefernwälder) eine Dunstmaske, die Aussagen zur optischen Dicke und zum Typ der Aerosole liefert, abgeleitet (Holzer-Popp et al., 2002).

6.1.3 Bildverbesserungsmethoden

Mit den verschiedenen Methoden der Bildverbesserung (*image enhancement*) werden die Bilddaten hinsichtlich einer bestimmten Anwendung für eine leichtere, schnellere und zuverlässigere Auswertung vorbereitet. Folgende Bildverbesserungsmethoden wurden in dieser Arbeit verwendet:

- Nutzung einer Look Up Tabelle (LUT) vgl. Albertz (2007) zur Kontrastverbesserung von multispektralen Falschfarbenaufnahmen,
- digitale Filterung (*spatial enhancement*): Hoch- und Tiefpassfilter (mehr dazu in Kapitel 6.3.3 und in den Veröffentlichungen von (Jähne, 2002) und (Kraus & Schneider, 1988),
- Datenfusion (*resolution merge*): IHS-(Intensity-Hue-Saturation) Transformationsmethode: Kombination der Multispektraldaten mit den höher auflösenden panchromatischen Daten; ausführliche Erläuterungen in Zhang & Albertz (1998) und Haydn et al. (1982).

6.2. Klassifikation des Untersuchungsgebietes

Bei der Klassifizierung wird jedes Bildelement einem Bildsegment und/oder einer Klasse zugeordnet, die sich durch definierte Merkmale auszeichnet und sich dadurch von anderen Klassen unterscheidet. So werden Flächen mit gleichen Eigenschaften ermittelt und eine thematische Wiedergabe des Bildes erzielt. Für die automatische Klassifizierung von Satellitendaten stehen zwei Verfahren zur Verfügung, die pixelbasierte und die objektbasierte Klassifikation, die auch in dieser Arbeit angewendet und in den kommenden Ausführungen beschrieben werden. Zuvor werden die Klassen vorgestellt, in die das zu klassifizierende Bildmaterial eingeteilt werden soll.

6.2.1 Klasseneinteilung

Durch die Einteilung des Bildes in Klassen wird sein Informationsgehalt auf die für einen menschlichen Betrachter wichtigsten Informationen reduziert.

Bei der Festlegung der Klassen spielen zum einen die Auflösung, mit der das Gebiet aufgenommen wurde und das Klassifikationsziel eine Rolle. Die Größe der Fläche, die einem Pixel entspricht, liegt bei ca. 0,36 m². Bei Betrachtung des zu untersuchenden Gebietes in dieser Auflösung und unter Beachtung des Zieles dieser Arbeit, der Ableitung eines Stadtmodells, werden folgende Klassen vorgeschlagen

oder als sinnvoll erachtet: *Gebäude*, *Straßen*, *Vegetation* und *Brachflächen*. Für eine bessere Übersicht und zur Veranschaulichung sind die Klassen noch einmal untergliedert und in den Abb. 6.2.1-1 bis Abb. 6.2.1-6 mit Großbuchstaben und Zahlen, nach der Beschreibung in Tabelle 6.2.1-1, gekennzeichnet.

In der Klasse *Gebäude* werden Häuser mit verschiedenen Dachmaterialien zusammengefasst. So gibt es Dächer aus Dachbeton (G1), Wellblech (G2), Lehm (G3) und aus Lehm & Beton (G4). Häuser, die mit G4 gekennzeichnet sind, zeigen eine dichte Bebauung, mit nur kleinen, flachen Dachflächen, auf denen sich oft mehrere Wasserbehälter und Satellitenantennen unterschiedlicher Größen und Farben befinden. Die nebeneinander stehenden Gebäude haben keine einheitliche Höhe, weshalb es zum Schattenwurf kommt (Abb. 6.2.1-3, Bild A und C). Die Straßen und Wege sind ca. 2 m bis 4 m breit.

In der Klasse *Straßen* differiert das Reflektionsverhalten aufgrund einer großen Materialvielfalt. Es gibt asphaltierte, gepflasterte und sandige Straßen und Wege. Sie unterscheiden sich vor allem in ihrer Verkehrsnutzung. Diese zeigt sich in dem verschiedenen Reflektionsverhalten. Straßen mit einer hohen Nutzungshäufigkeit sind breit und erscheinen aufgrund ihrer Asphaltierung dunkel. Sie sind mit (S1) im Bild gekennzeichnet. Auf den wenig befahrenen, asphaltierten Straßen lagern sich mehrere Schichten Staub und Sand ab, so dass sich das Reflektionsverhalten ändert und die Straßen an den Stellen der Ablagerungen in einer helleren Farbe erscheinen. Diese Straßen sind mit (S2) markiert. Objekte in der Klasse *Straßen*, wie Fahrzeuge, unterscheiden sich vor allem in der Farbe, mit der sie lackiert wurden (Abb. 6.2.1-4, Bild A).

Die Klasse *Vegetation* umfasst Flächen mit Bäumen (V1), Wiesen (V2) und Ackerland (V3). Die verschiedenen Spektren in dieser Klasse resultieren u. a. aus einem unterschiedlich dichten Bewuchs, verschiedenen Pflanzenarten und Reifegraden, sowie der Menge der Bewässerung (Abb. 6.2.1-5).

Friedhöfe, Sport- und Spielplätze sind in der Klasse *Brachflächen* (Abb. 6.2.1-6) zusammengefasst. Diese Klasse zeigt zwei verschiedene Spektralverhalten. Einerseits wird das Spektralverhalten durch Sand und Erde bestimmt. Es gleicht dem spektralen Reflektionsvermögen von Lehmdächern. Dagegen zeigen Steine und Kies ein anderes Spektralverhalten, das, aufgrund der gleichen Farbe, dem der Straßen gleicht.

Tab. 6.2.1-1: Einteilung der Objekte des Satellitenbildes in vier verschiedene Klassen und Unterklassen, ihre Charakterisierungen und Zuordnungen zu einer Abbildung und zu der Satellitenbildaufnahme.

Klassen	Beschriftung	Beschreibung	Abb.Nr. und Zuordnung zum Satellitenbild
<i>Gebäude</i>	G1	Dachfläche aus Beton	Abb. 6.2.1-3, Bild C; in Abb. 6.2.1-1 im blauen Rechteck
	G2	Dachfläche aus Wellblech (weiß oder blau)	Abb. 6.2.1-3, Bild C; in Abb. 6.2.1-1 im blauen Rechteck
	G3	Dachfläche aus Lehm	Abb. 6.2.1-3, Bild A; in Abb. 6.2.1-1 im gelben Rechteck
	G4	Dachfläche aus Lehm oder Beton, mit Wasserbehältern und Satellitenschüsseln, Höhenunterschiede	Abb. 6.2.1-3, Bild C; in Abb. 6.2.1-1 im blauen Rechteck
<i>Straßen</i>	S1	viel befahrene, breite, asphaltierte Straßen	Abb. 6.2.1-4, Bild C; in Abb. 6.2.1-2 im blauen Rechteck
	S2	wenig befahrene, asphaltierte und nicht asphaltierte Straßen und Wege	Abb. 6.2.1-4, Bild D; in Abb. 6.2.1-1 im blauen Rechteck
	S3	Hauptstraße (Kanal)	Abb. 6.2.1-4, Bild A und B in Abb. 6.2.1-1 im schwarzen Rechteck
	S4	Zubringerstraßen	Abb. 6.2.1-4, Bild D; in Abb. 6.2.1-1
<i>Vegetation</i>	V1	Bäume	Abb. 6.2.1-5, Bild A; in Abb. 6.2.1-1
	V2	Wiese	Abb. 6.2.1-5, Bild D, in Abb. 6.2.1-2 im blauen Rechteck
	V3	Ackerflächen	Abb. 6.2.1-5, Bild C; in Abb. 6.2.1-1 im schwarzen Rechteck
<i>Brachflächen</i>	Br	Friedhöfe, Spiel- und Sportflächen, Bauland	Abb. 6.2.1-6, Bild D; in Abb. 6.2.1-1 im schwarzen Rechteck



Abb. 6.2.1-1: Bildausschnitt von QuickBird-Aufnahme (2005, 0,6 cm Auflsg.). Die Buchstaben und Ziffern markieren Orte, in deren Nähe Objekte zu finden sind, die zu den in Tabelle 6.2.1-1 definierten Klassen gehören. Eigene Darstellung.



Abb. 6.2.1-2: Bildausschnitt von QuickBird-Aufnahme (2005, 0,6 cm Auflsg.). Die Buchstaben und Ziffern markieren Orte, in deren Nähe Objekte zu finden sind, die zu den in Tabelle 6.2.1 -1 definierten Klassen gehören. Eigene Darstellung.

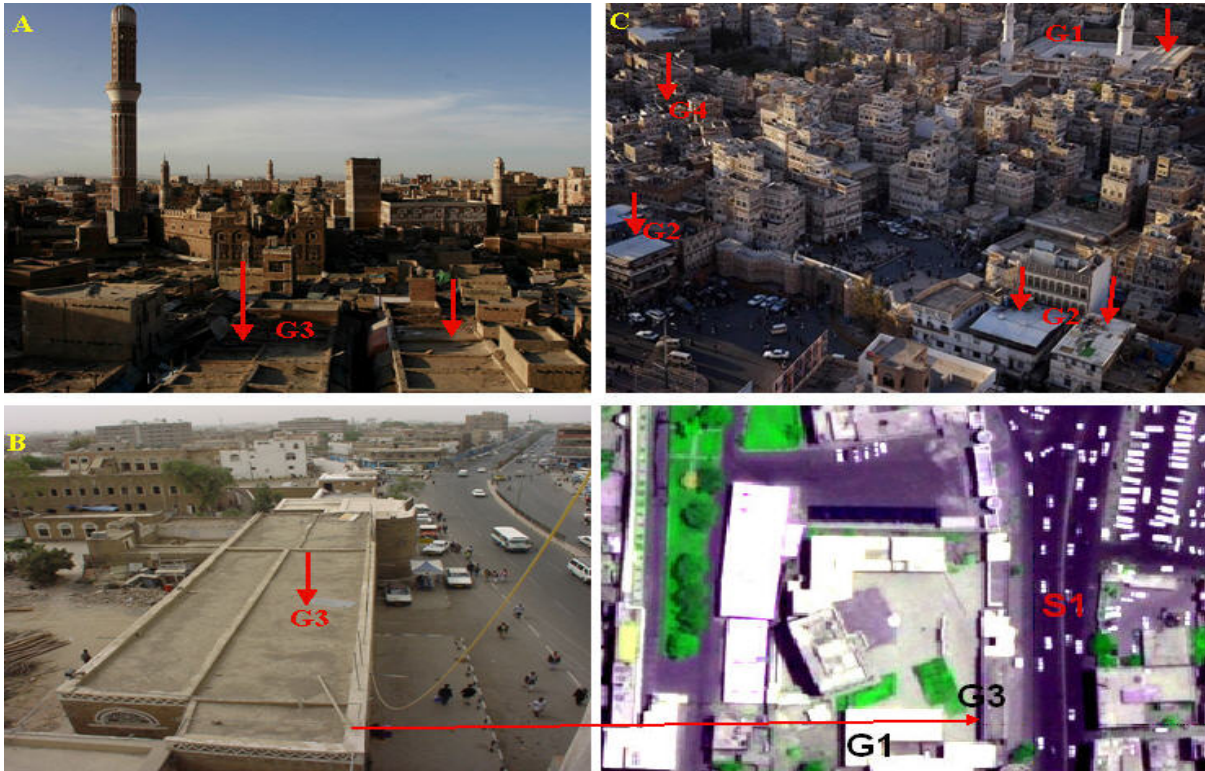


Abb. 6.2.1-3: Bild A - C: Kennzeichnung der verschiedenen Dachmaterialien, siehe Tabelle 6.2.1-1.; Bild D: Satellitenbildausschnitt als Zuordnung zu Bild B. Quellen: Bild A: Lampe, Bild B: Urbanalyst, Bild C: Arthus-Bertrand, Y. Eigene Darstellung.



Abb. 6.2.1-4: Straßenstrukturen und Baumaterialien: A) Kanal aus Asphalt genutzt als Straße; B) Kanal führt Wasser; C) mehrspurige Asphaltstraße D) Pflasterstraße in der Altstadt Quellen: Bild A von Mofadhl Y., Bild B von Aljadaby A., Bild C von Alhameedy, Bild D von Urbanalyst. Eigene Darstellung.



Abb. 6.2.1-5: Vegetationsarten: A) Bäume, B) und C) Ackerflächen, D) Wiese/Park; Quellen: Bild A von Alsindi F. Bild B und C von Urbanalyst, D: von Muhammed Saleh.



Abb. 6.2.1-6: Brachflächen: A) Hügel am Stadtrand; B) Bauland; C) Friedhof; D) Sportplatz
 Quellen: Bild A von Alhashdi, Bild B von Urbanalyst, Bild C von Alqafary. M., Bild D von Alkabus.

6.2.2 Pixelbezogene Klassifikation

Bei der pixelbasierten Klassifikation sind die zu klassifizierenden Einheiten einzelne Pixel, die analysiert und nach ihren spektralen Eigenschaften in Klassen unterteilt werden. Der Kontext wird dabei nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass die abgegrenzten Objekte nicht der menschlichen Wahrnehmung entsprechen müssen. Da aber jedes Pixel aufgrund bestimmter statistischer Merkmale für den Nutzer nachvollziehbar einer Klasse zugeordnet wird, kann der subjektive Einfluss des Bearbeiters minimiert werden.

Bei den pixelbasierten Klassifizierungsverfahren unterscheidet man zwischen der überwachten und der unüberwachten Klassifizierung.

Bei der **unüberwachten Klassifizierung** werden die Bildelemente in Klassen ähnlicher spektraler Eigenschaften unterteilt, wobei keine Referenzdaten in Form von Trainingsgebieten definiert werden. Diese Art der Datenanalyse wird meist eingesetzt, wenn wenig über das Untersuchungsgebiet bekannt ist oder um einen Überblick von dem spektralen Informationsgehalt der Daten zu gewinnen. Somit wird sie vielfach als Vorstufe für eine überwachte Klassifizierung eingesetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die **überwachte Klassifizierung** genutzt. Hierbei werden Vorinformationen in Form von Referenzflächen, von denen bekannt ist, welcher Objektklasse sie angehören, mit in den Auswerteprozess einbezogen (Albertz, 2007). Die pixelbasierte überwachte Klassifizierung wird in dieser Arbeit auf zwei verschiedene Arten durchgeführt. Zum einen wird das gesamte Bild, das bedeutet alle Klassen zusammen, mit dem *Minimum-Distance*- und dem *Maximum-Likelihood-Verfahren* klassifiziert. Diese Art der Klassifizierung wird im Folgenden als pixelbezogene Klassifikation auf Bildebene bezeichnet. Zum anderen wird die Klassifikation mit dem *Parallelepiped-Verfahren* für jede Klasse einzeln durchgeführt. Diese wird im Folgenden als pixelbezogene Klassifikation auf Klassenebene bezeichnet. Diese beiden verschiedenen Vorgehensweisen werden in den folgenden Kapiteln kurz vorgestellt und definiert.

6.2.2.1 Pixelbezogene Klassifikation auf Bildebene

Die Klassifikation auf Bildebene ist eine zeitgleiche Klassenzuweisung von Pixeln anhand vorgegebener Merkmalsräume. Pixel werden eindeutig zugewiesen. Eine Mehrfachzuweisung in verschiedene Klassenmodelle ist nicht möglich.

Alle pixelbasierten überwachten Klassifikationen erfordern vor dem eigentlichen Klassifikationsprozess eine Trainingsphase. In dieser werden auf dem Satellitenbild eine Reihe geschlossener Polygone markiert, die die Testgebiete für die verschiedenen Trainingsklassen darstellen (Abb. 6.2.2.1-1). Dabei wird versucht die gewünschte Klassenhierarchie in den Trainingsgebieten abzubilden, um so die unterschiedlichen spektralen Ausprägungen mit einfließen zu lassen. Für die Trainingsklasse *Gebäude* werden deshalb Häuser mit verschiedenen Dachmaterialien ausgewählt. Bei der Trainingsklasse *Straßen* wird darauf geachtet, dass Gebiete ohne Fahrzeuge und in den verschiedenen Farbtintensitäten markiert werden. Für die Trainingsklasse *Vegetation* werden Flächen auf Wiesen, Bäumen und Acker genommen und für die Trainingsklasse *Brachflächen* werden die Polygone auf Sport- und Spielplätzen, Friedhöfen und ungenutztem Bauland platziert. Das Ergebnis eines Trainings sind Signaturen, die die spektrale Charakteristik der Trainingsgebiete beschreiben. Anschließend werden in kleineren Szenenausschnitten überwachte Klassifikationen durchgeführt, um die Eignung der erstellten Signaturen zu testen. Auf Grundlage des Klassifikationsergebnisses werden ungeeignete Trainingsgebiete verändert oder verworfen und dann neue Signaturen extrahiert. Dieser Vorgang wird iterativ solange wiederholt, bis ein für die eigentliche überwachte Klassifikation geeigneter Signatursatz vorhanden ist.

Für die dann anschließende Klassifikation werden das *Minimum-Distance-* und das *Maximum-Likelihood-Verfahren* eingesetzt. Sie bedienen sich binärer Entscheidungsregeln bezüglich der Zugehörigkeit des Bildelementes zu einer Klasse und werden deshalb auch als harte Klassifizierungssysteme bezeichnet. Sie bringen zum Ausdruck, ob das Element der Klasse angehört (=1) oder nicht (=0). Die klassifizierte Szene erscheint sehr heterogen.

Das *Minimum-Distance-Verfahren* (Methode der kürzesten Entfernung) gehört zu den geometrischen Klassifikationsverfahren. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass die Pixel, die zu einer Klasse gehören, isotrop um den entsprechenden Klassenmittelpunkt verteilt sind. Bei der Klassifikation werden für die Trainingsgebiete jeder Objektklasse zunächst die arithmetischen Mittel der Messwerte in den verschiedenen Spektralkanälen berechnet. Danach findet für jedes Pixel die Ermittlung der Abstände zu den Mittelpunktvektoren aller vorhandenen Klassen und die anschließende Zuordnung derjenigen Klasse statt, deren Mittelpunkt es am nächsten ist. Der Nachteil besteht darin, dass die Streubereiche der Messwerte nicht berück-

sichtigt werden, so dass ein Bildelement einer Klasse zugeordnet werden kann, der es nicht angehört. Vorteilhaft ist, dass der *Minimum-Distance-Klassifikator* sehr schnell und einfach zu berechnen ist (Albertz, 2007).

Das *Maximum-Likelihood-Verfahren* (Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit) gehört zu den statistischen Klassifikationsverfahren. Es geht davon aus, dass die Grauwerte einer Objektklasse zugehörigen Bildelemente eine GAUSS'sche Normalverteilung um den Klassenmittelpunkt aufweisen. Bei dem Verfahren werden anhand statistischer Kenngrößen die Wahrscheinlichkeiten der Bildelemente einer bestimmten Klasse anzugehören, berechnet. Der Rechenaufwand dieses Verfahrens ist größer als der beim *Minimum-Distance-Verfahren*.



Abb. 6.2.2.1-1: Ausschnitt vom Satellitenbild des Untersuchungsgebietes mit den eingegrenzten Testflächen.

6.2.2.2 Pixelbezogene Klassifikation auf Klassenebene

Die pixelbezogene Klassifikation auf Klassenebene ist eine in Reihe geschaltete Klassenzuweisung von Pixeln anhand vorgegebener Merkmalsräume. Das Bild wird jeweils vollständig bearbeitet und dann dem nächstfolgenden pixelbezogenen Klassifikationsverfahren auf Klassenebene übergeben. Pixel können durch Mehrfachzuweisungen verschiedenen Klassenmodellen zugeordnet werden.

Bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene werden für die Trainingsphase die gleichen Testgebiete wie bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene verwendet. Die Trainingsphase wird allerdings für jede Klasse einzeln durch-

geführt und es werden nur die zu einer Klasse gehörenden Testgebiete genutzt. Das Satellitenbild wird anschließend mit Hilfe des *Parallelepiped-Verfahrens* klassifiziert. Bei dieser Klassifikation werden für jeden ausgewählten Spektralkanal eine obere und untere Grauwertschwelle bestimmt. Dies führt im zweidimensionalen Raum zu rechteckigen Entscheidungsgrenzen. Die Zuweisung der Bildelemente zu den Objektklassen erfolgt über eine Abfrage, ob die Messwerte zu einem Punkt innerhalb eines Rechtecks liegen. Das Verfahren ist rechnerisch einfach. Probleme entstehen, wenn sich Rechtecke überlappen oder die Grauwerte zu große Korrelationen aufweisen. Dann sind Modifizierungen der Abgrenzungen der Zuordnungsflächen notwendig (Lillesand et al., 2004).

6.2.3 Objektbasierte Klassifikation

In dieser Arbeit wird die objektbasierte Klassifikation mit dem Softwaresystem eCognition durchgeführt. Es handelt sich um eines der ersten kommerziell verfügbaren Programme, das einen Segmentierungsalgorithmus nutzt.

Der Bearbeitungsablauf gliedert sich grob in zwei Schritte. Zuerst wird das Bild segmentiert und in einem weiteren Schritt das Ergebnis klassifiziert. Beide Schritte werden im Folgenden beschrieben.

6.2.3.1 Segmentierung

Da aus den einzelnen Pixels keine Information über die Bedeutung der Objekte, deren Textur, Form und deren Relationen zueinander ersichtlich werden, fasst man mehrere Pixel in homogenen Segmenten, deren Form und Größe von zuvor durch einen Operator definierten Parametern bestimmt werden, zusammen. Die objektorientierte Segmentierung dient dazu, sehr unterschiedliche Pixel in bedeutungsvolle „homogene“ Objekte (z.B. Gebäude, Straßen) zu integrieren. Jähne (2002) unterscheidet drei Vorgehensweisen bei einer Segmentierung: die punktorientierte, die regionenorientierte und die kantenbasierte Segmentierung.

Die Bilddaten werden nach einem multiskaligen Segmentierungsverfahren auf Grundlage des Regionenwachstumsverfahrens segmentiert, bei dem vorhandene Elemente (Pixel oder bereits bestehende Regionen) aufgrund von Werteähnlichkeiten (Homogenität) neuen Segmenten zugeordnet werden. Nähere Informationen

zu dem Segmentierungsalgorithmus können den Arbeiten von Baatz & Schäpe (2000) entnommen werden.

Durch die multiskalige Segmentierung ist es möglich, nacheinander eine Vielzahl von Segmentierungen zu generieren, die jeweils eine andere Segmentgröße (Auflösung) haben. Die einzelnen Maßstabsebenen sind miteinander vernetzt (Abb. 6.2.3.1-1), so dass jedem Segment seine Nachbar-, Unter- und Oberobjekte zugeordnet werden kann. Mit Hilfe des hierarchischen Netzwerks können so z.B. generierte Objekte einer niedrigen Segmentierungsebene (Level) in einer höheren Ebene semantisch zusammengefasst werden. Dies ist besonders in heterogenen Räumen wie z.B. Städten nützlich, da Objekte in der Realität unterschiedlich groß sind, die generierten Segmente aber innerhalb einer gewissen Toleranz ähnliche Ausmaße haben (Tomowski et al., 2006).

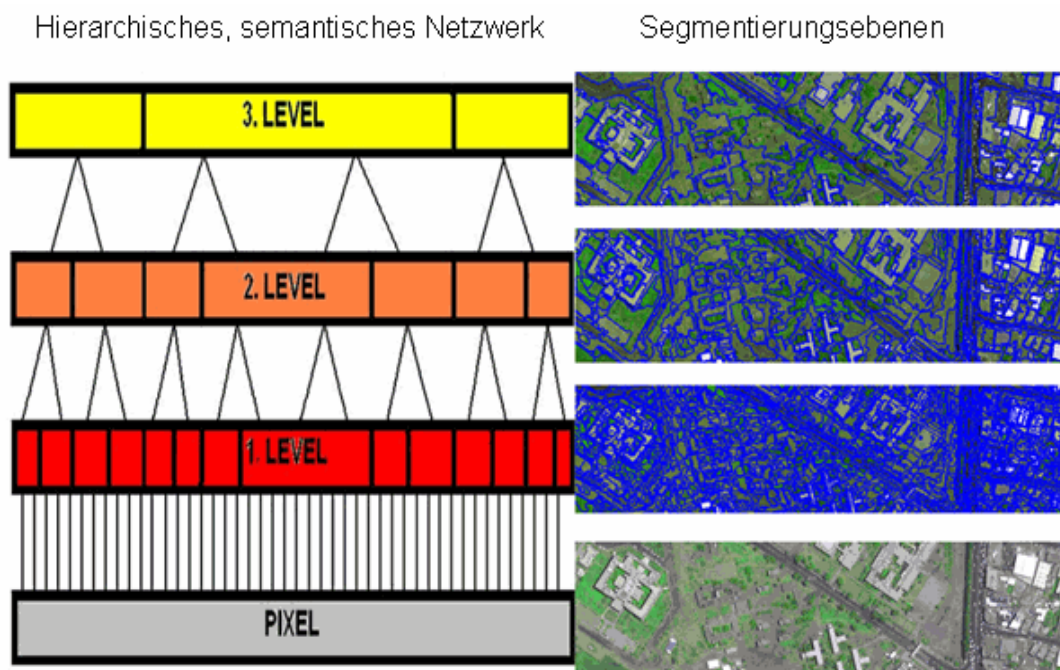


Abb. 6.2.3.1-1: Komponenten der eCognition-Software: Ebenenweise aufeinander aufbauende Segmentgeometrie (links) und Hierarchie und Semantik der Segmente am Beispiel des Satellitendatensatzes von Sanaa. Eigene Darstellung.

Die Einstellung der Segmentierungsparameter ist von verschiedenen Faktoren der Bilddaten abhängig, wie z. B. der geometrischen Auflösung, der Anzahl der Bildkanäle, der Farbtiefe, den spektralen Eigenschaften des Bildes und den abzugrenzenden Objekten. Aus diesem Grund kann keine allgemeingültige Aussage über die Wahl der Parameter getroffen werden. Optimale Parameter lassen sich nur durch längeres interaktives Testen nach der *trial-and-error*-Methode herausfinden. Tabelle

6.2.3.1-1 zeigt eine Zusammenstellung der verwendeten Parameter, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Die Segmentierung der Daten erfolgt in drei Segmentierungsebenen (Spalte 1). Mit dem *Scale Parameter* (SP) wird die mittlere Größe der resultierenden Objekte festgelegt. Er bildet eine obere Schranke, die maximale zugelassene Heterogenität pro Objekt. Dabei ist zu beachten, dass seine Größe über alle Kanäle aufsummiert wird. Der *Segmentations Mode* ist auf Normal eingestellt. Die andere Option wäre *Form Subobjects*, die der Erzeugung von Unterobjekten zur Form- und Texturanalyse dient. Die Homogenitätskriterien dienen der Feineinstellung der Segmentierung und beeinflussen die Gestalt der Objekte. So kann man festlegen, ob mehr die Farbe oder die Form bei der Generierung der Objekte berücksichtigt werden soll.

Tab. 6.2.3.1-1: Parametereinstellungen für die Segmentierung mit eCognition.

Segmentierung & Klassifikationsebene	S P	Quickbirdbande				Segmentation Mode	Homogenitätskriterium			
		Blau	Grün	Rot	NIR		Color	Shape	Shape settings	
									Smoothness	Compactness
Level 1	50	No	Yes	Yes	Yes	Normal	0,7	0,3	0,7	0,3
Level 2	100	No	Yes	Yes	Yes	Normal	0,7	0,3	0,7	0,3
Level 3	200	No	Yes	Yes	Yes	Normal	0,7	0,3	0,7	0,3

6.2.3.2 Klassifikation

Nach der Festlegung der Segmentierungsebenen erfolgt die Klassifikation aufgrund der zuvor durch den Interpretier definierten Merkmalsräume für die einzelnen Klassen. Diese werden anhand ausgewählter Trainingsgebiete (Nearest-Neighbour-Klassifikator) oder durch Fuzzy-Logic-Funktionen erstellt. Im ersten Fall werden die Objekte automatisch einer Klasse zugeordnet und im zweiten Fall definiert der Anwender selbst Merkmale und Schwellenwerte einer Klassenzugehörigkeit.

Für die Erstellung der Wissensbasis, wird in dieser Arbeit der Nearest-Neighbour-Klassifikator (Edit Standard NN) genutzt. Er hat den Vorteil, dass man durch die Auswahl von Beispielsegmenten mehrere Merkmale in den Klassifikationsprozess einbeziehen kann.

Zu Beginn werden die Klassen und die für jede Klasse zu verwendenden Merkmale festgelegt. Im Anschluss daran werden Beispielobjekte für die einzelnen Klassen definiert.

Bei der Klassifikation wird das gesamte Bild einbezogen, es bleiben keine Segmente unklassifiziert. Fehlklassifikationen werden durch weitere Merkmale mit Hilfe von Zugehörigkeitsfunktionen minimiert.

Schwächen des objektorientierten Verfahrens liegen vor allem in der Segmentierung, da diese über die iterative Auswahl eines Skalierungsfaktors erfolgt. Es ist damit abhängig von der subjektiven Wahrnehmung des Bearbeiters, was die Übertragbarkeit des Verfahrens einschränken kann. Des Weiteren wird u. U. bei der Segmentierung eine Generalisierung verursacht, so dass wichtige Details innerhalb der Objekte nicht berücksichtigt werden können (Koch et al., 2003).

6.2.4 Nachbearbeitung der Klassifikationsergebnisse

Um die Ergebnisse aus den pixelbasierten Klassifikationen zu verbessern, werden sie einer Nachbearbeitung unterzogen. Zur Veranschaulichung dient Abb. 6.2.4-1. Die objektbasierte Klassifikation wurde in dieser Arbeit nicht nachbearbeitet. Nähere Erläuterungen dazu sind in Kap. 7 zu finden.

a) Nachbearbeitung der Flächen

Das Ziel der Nachbearbeitung besteht in der Erhöhung der Homogenität und der Minimierung fehlerhafter Klassenzuweisungen. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse aus der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene, die mit dem *Minimum-Distance*-Verfahren erzielt wurden, gefiltert. Dafür wird ein Hochpassfilter mit einer Fenstergröße von 3x3 genommen, um kleine Lücken innerhalb einer Klasse zugewiesener Bildobjekte zu schließen. Anschließend werden diese Ergebnisse und die Ergebnisse aus der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene einem geometrischen Generalisierungsverfahren unterzogen, bei dem alle Objekte mit einem Flächeninhalt unterhalb eines zuvor definierten Schwellenwertes eliminiert werden. Für die ersten beiden Schritte wird das GIS *Analysis Tool* des Softwaresystems Erdas Imagine genutzt. Mit Hilfe der Funktion *Clump* werden zuerst zusammenhängende Pixel als Einzelobjekte erkannt und mit einer eigenen ID versehen. Mit der Funktion *Eliminate* werden dann alle Objekte mit einem Flächeninhalt unterhalb eines bestimmten Schwellenwertes eliminiert. Für die Eliminierung hat sich nach verschiedenen Tests ein Schwellenwert von 100 Pixel als sinnvoll erwiesen. Die Schwellenwerte für die einzelnen Klassen aus der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene sind im Folgenden aufgelistet:

- *Brachflächen*: ≤ 30 Pixel
- *Vegetation*: ≤ 10 Pixel
- *Gebäude*: ≤ 35 Pixel
- *Straßen*: ≤ 90 Pixel.

Mit der Funktion *Eliminate* werden die kleinen „Inselklassen“ innerhalb der größeren Klassen eliminiert.

Die anschließenden Schritte werden nur für die pixelbezogene Klassifikation auf Klassenebene durchgeführt. Dafür werden morphologische Operatoren genutzt. Ihre Aufgabe ist die Extraktion relevanter Bildstrukturen. Dies kann erreicht werden, indem das Bild mit einer anderen Menge bekannter Formen, die strukturierendes Element (SE) genannt wird, überprüft wird (Soille, 1998). Die Auswahl der Form und Größe des SE wird anhand von a priori-Wissen getroffen und muss an die zu extrahierenden Merkmale angepasst sein.

Die Basisoperationen der morphologischen Bildverarbeitung sind die *Dilatation* und die *Erosion*. Bei den oben genannten Klassen wird zuerst die *Dilatation* durchgeführt. Das bedeutet, dass zusammenhängende Regionen ausgeweitet werden. Voraussetzung ist, dass das strukturierende Element mindestens ein Pixel der aktuellen Umgebung überdeckt (Luhmann, 2003). Bei der *Erosion* werden alle Strukturen, die kleiner als das strukturierende Element sind, entfernt. Alle größeren Strukturen werden dabei geschrumpft. Diese Funktion wird nicht genutzt. Da man bei der *Erosion*, im Gegensatz zu der Funktion *Eliminate*, nicht die Flächengröße für jede Klasse einzeln angeben kann, die eliminiert werden soll.

Anschließend werden die kleinen Objekte mit der Funktion *Opening*, einer kombinierten Operation aus *Erosion* und *Dilatation*, entfernt. Dabei bleiben die Form und die Größe aller anderen Objekte erhalten. Als letztes werden mit Hilfe der entgegengesetzten Operation, dem *Closing*, die Lücken zwischen den Objekten geschlossen. Andere Strukturen bleiben erhalten, werden nicht wie bei der *Dilatation* vergrößert.

Da bei der Klasse Gebäude durch *Eliminate* Gebäude entfernt werden, wird zuerst die *Dilatation* durchgeführt und dadurch die Flächen der Gebäude ausgeweitet. Anschließend werden alle Objekte ≤ 400 Pixel eliminiert.

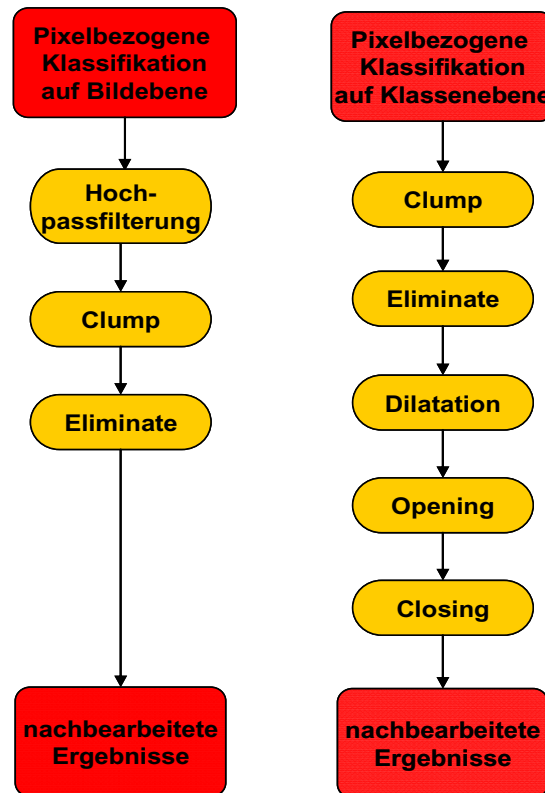


Abb. 6.2.4-1: Schematische Darstellungen zum Verfahrensablauf der Nachbearbeitung der pixelorientierten Klassifikationsergebnisse. Eigene Darstellung.

b) Nachbearbeitung der Linien

Um eine Linienglättung der Straßenabgrenzungen zu erreichen wurde die Klasse Straßen der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene von Raster zu Vektor und von Polygon zu Linien umgewandelt. In ArcGis wurde die Funktion *Simplify Line* gewählt. Sie beseitigt kleine Ausschläge oder übermäßige Biegungen und vereinfacht somit eine Linie bei Beibehaltung der grundlegenden Gestalt. Innerhalb dieser Funktion wurde der Algorithmus Point Remove und eine Toleranz von 10 m gewählt. Um die ästhetische Qualität zu verbessern werden die Linien der Straßen durch die Funktion *Smooth Line*, mit dem Algorithmus Paek und einer Toleranz von 10m geglättet.

6.2.5 Validierung der Klassifikationsergebnisse

Für die Einschätzung der Qualität der Klassifizierungsergebnisse werden sie anschließend einer Validierung unterzogen. Diese erfolgt für die Ergebnisse aus den beiden pixelbasierten Klassifikationsverfahren u. a. anhand einer Konfusions- bzw. Fehlermatrix, die im *Accuracy Assessment Tool* von Erdas Imagine erstellt wurde. Bei der Bewertung der Genauigkeit findet ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der Klassifikation mit ausgewählten Referenzdaten (Pixel) statt, deren korrekte Lage bekannt ist. Dazu werden aus dem Originaldatensatz 600 Stichprobenpunkte durch einen Zufallsgenerator ausgewählt. Nach Congalton (1991, zitiert nach Erdas (2008), Vol. II) werden mehr als 250 Referenzpixel zur Bestimmung der Klassifikationsgenauigkeit benötigt.

Bei der Fehlermatrix werden in tabellarischer Form die richtig und falsch klassifizierte Pixel jeder Klasse aufgelistet (siehe Anhang I: Tab. I.1 – Tab. I.5). In den Zeilen stehen die Ergebnispixel nach der Klassifizierung und in den Spalten die Pixel der Referenzdaten. Die Hauptdiagonale (rote Zahlen) repräsentiert die korrekt klassifizierte Pixel. Alle anderen Elemente stellen *Unterlassungsfehler* (in den Spalten) bzw. *Überlassungsfehler* (in den Zeilen) dar. Sie ermöglichen das Auffinden von Fehlerquellen bzw. unstabiler Klassen. Anhand der Fehlermatrix können die nachfolgend beschriebenen Evaluierungsmaße berechnet werden.

Die **Gesamtgenauigkeit** (*Overall Accuracy – OA*) wird gebildet, indem die Summe der richtig klassifizierte Pixel durch die Gesamtpixelanzahl dividiert wird. Nachfolgende Formeln sind (Congalton & Green, 1999) entnommen.

$$O_A = \frac{\sum_{i=1}^K n_{ii}}{n}$$

n_{ii} = Elemente der Hauptdiagonalen
 K = Anzahl der Klassen
 n = Anzahl der Referenzpixel

Um Informationen über die Qualität der einzelnen Objektklassen zu erhalten, können aus der Fehlermatrix weitere Maße abgeleitet werden. Dazu gehören die **Hersteller-genauigkeit** (*Producer Accuracy, PA*). Sie berechnet sich aus den richtig klassifizierte Pixels (eine Zahl aus der Hauptdiagonalen) durch die Gesamtzahl der

Referenzpixel der jeweiligen Klasse (Spaltensumme). So erhält man die Wahrscheinlichkeit mit der die Pixel der Klassifikation mit den Referenzdaten übereinstimmen.

$$P_A = \frac{n_{jj}}{n_{+j}} \quad \begin{array}{l} n_{jj} = \text{korrekt zur Klasse } j \text{ zugewiesene Pixel} \\ n_{+j} = \text{Gesamtanzahl der Referenzpixel der Klasse } j \end{array}$$

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ergebnispixel derselben Klasse den Referenzdaten angehört, wird durch die **Nutzergenauigkeit** (*User Accuracy, UA*) ausgedrückt. Sie berechnet sich aus den richtig klassifizierten Pixels durch die Gesamtzahl der Ergebnispixel der jeweiligen Klasse, siehe dazu folgende Formel.

$$U_A = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \quad \begin{array}{l} n_{ii} = \text{Korrekt zur Klasse } i \text{ zugeordnete Pixel} \\ n_{i+} = \text{Gesamtanzahl der Ergebnispixel der Klasse } i \end{array}$$

Des Weiteren wird der **Kappa-Koeffizient** berechnet. Auch er ist ein Maß für die Beurteilung der Gesamtgenauigkeit. Doch geht er, anders als die OA davon aus, dass die erstellte und die Referenzklassifizierung von gleicher Zuverlässigkeit sind. Bei seiner Berechnung berücksichtigt er auch die Unter- und Überlassungsfehler. Man erfährt durch ihn, wie gut die Klassifizierungsergebnisse mit den Referenzdaten übereinstimmen.

Er berechnet sich aus der Differenz zwischen den richtig klassifizierten Pixels und einer nicht korrekten Übereinstimmung. Das Ergebnis wird durch den theoretisch möglichen Anteil, der über den Zufall hinausgehenden Übereinstimmungen dividiert. Der nachfolgenden Definition des Kappa-Koeffizienten ist zu entnehmen, dass er alle Elemente der Konfusionsmatrix enthält.

$$KK = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}} \quad \begin{array}{l} k = \text{Anzahl der Klassen} \\ n = \text{Anzahl der Referenzpixel} \end{array}$$

Der Kappa-Koeffizient kann Werte in einem Intervall von -1 bis 1 annehmen. Bei einer kompletten Übereinstimmung von Klassifizierung und Referenzdaten beträgt er

1, bei keiner Übereinstimmung minus eins. In der Literatur wird ein Wert von über 0,8 als ein sehr hohes Maß der Übereinstimmung gewertet (Altmann, 1991).

Ein oft genutztes Bewertungsschema für den Kappa-Koeffizienten wurde von Landis & Koch (1997) aufgestellt. Die besten drei Kategorien sind wie folgt definiert.

- almost perfect: 0,81 – 1
- substantial: 0,61 – 0,8
- moderate: 0,41 – 0,6

Diese sind ähnlich der bei Ortiz et al. (1997) gefundenen Skala:

Kappa-Wert [%] Qualität:

< 0,0		Sehr schlecht
0	bis 20	Schlecht
20	bis 40	Akzeptabel
40	bis 60	Gut
60	bis 80	Sehr gut
80	bis 100	Ausgezeichnet.

Die Zuverlässigkeit einer Genauigkeitsprüfung ist von mehreren Faktoren abhängig. So haben die Methode zur Aufnahme der Referenzdaten (Stichprobenverfahren und Stichprobengröße), ihre Genauigkeit und Aktualität, sowie das Klassifikationsschema (Anzahl der Klassen und ihre Beschreibung) großen Einfluss auf die Analyse. Dies wird exemplarisch von Lo & Watson (1998) aufgezeigt. Durch die hohe Abhängigkeit der Klassifikationsgenauigkeit von verschiedenen Faktoren, liefert die Fehlermatrix lediglich Annäherungswerte der Klassifikationsgüte, die jedoch nicht als quantitative Maße Gültigkeit haben.

Des Weiteren wurde zur Validierung das Originalsatellitenbild genutzt. Es diente dem visuellen Vergleich mit den Klassifikationsergebnissen. Da die Altstadt von Sanaa dicht bebaut ist, können die Gebäudeaußengrenzen nur schwer erkannt werden. Aus diesem Grund wurde auf die Gebäudegrundrisskarte, in einem Maßstab von 1:2500 (siehe Tab. 5.2-2), zurückgegriffen. Nach dem Einscannen wurde sie von Raster zu Vektor umgewandelt und anschließend auf die Karte mit den Klassifikationsergebnissen gelegt. Durch einen visuellen Vergleich beider Karten kann bestimmt werden, wie gut die Gebäude, auch innerhalb der Altstadt, durch die Klassifikation in ihren Außengrenzen erfasst wurden, ob es einen Gebäudeinnenhof gibt, wo neue Gebäude erbaut oder alte Gebäude abgerissen worden sind. Auch die Erfassung des Vegetationsbestandes durch die Klassifikation kann überprüft werden.

6.3 Erfassung der Stadtstruktur durch Zusatzinformationen

Mit den Möglichkeiten der Bildverarbeitung soll die Struktur, die für eine orientalische Stadt charakteristisch ist, herausgearbeitet werden. Die dafür genutzten Verfahren werden im Folgenden vorgestellt.

6.3.1 Aufbereitung der topographischen Daten

Die in Tab. 5.2-3 (Abschnitt 5.2) aufgelisteten Karten werden eingescannt, um sie in digitaler Form weiter bearbeiten zu können. Die Orthophoto Maps, die Gebäudegrundrisskarte, Luftbilder und die Stadtpläne von Sanaa werden anhand zahlreicher GPS Punkte und mit Hilfe des Satellitenbildes georeferenziert.

In der Gebäudegrundrisskarte wird die Altstadt mit Beschriftung von wichtigen Straßen, Ämtern, Moscheen und Gärten, in einem Maßstab 1:2500, dargestellt. Diese Karte wird eingescannt und der Rasterdatensatz in Erdas Imagine vektorisiert. Die Arc Coverage Daten werden dann mit dem Programm ArcGis geöffnet und als Shape Daten gespeichert. In der Validierungsphase sollen die Objekte dieser Karte visuell mit den Klassifikationsergebnissen verglichen werden.

6.3.2 Texturorientierte Verfahren

Das Untersuchungsgebiet weist eine ausgesprochene Homogenität im Material von Gebäuden und Straßen auf. Dies erschwert die Trennung und somit Erkennbarkeit der einzelnen Objekte voneinander. Hinzu kommt eine dichte Bebauung in der Altstadt. Um die Trennung der Klassen zu erleichtern und mehr Informationen über Landnutzung, Landbedeckung und Objekteigenschaften zu erhalten, wird eine Texturanalyse durchgeführt.

Die Textur einer Oberfläche entsteht durch die lokale Verteilung und Variation der Grauwerte in einem Teilbereich des Bildes und bildet ein Muster, das sich periodisch im Raum wiederholt (Abmayr, 1994). Texturen können hierarchisch aufgebaut sein, d.h. sie können bei unterschiedlicher Vergrößerung verschieden aussehen (Jähne, 2002).

Für die Berechnung von Texturen gibt es verschiedene Ansätze (Reder, 2004). Einer davon ist das statistische Texturmodell, bei dem die Merkmalsextraktion durch statistische Verfahren stattfindet. Diese Methoden beruhen auf Funktionen der Grauwertverteilung in einer Bildregion (Grotepaß, 1992).

Ein Verfahren bei dem Klassen statistischer Texturmerkmale abgeleitet werden können, ist der Einsatz von Co-occurrence-Matrizen⁷ (Haralick et al., 1973). Diese werden in dieser Arbeit mit dem Programm ENVI berechnet. Aus der Co-occurrence Matrix wurden von Haralick 14 Texturmaße abgeleitet, die statistische und informationstheoretische Eigenschaften der Textur erfassen (Gotlieb & Kreyszig, 1990). Davon sind in ENVI folgende acht Merkmale in verschiedenen Kombinationen mit den Layern 1 - 4 einsetzbar: *Mean*, *Variance*, *Homogeneity*, *Contrast*, *Dissimilarity*, *Entropy*, *Second Moment* und *Correlation*. Die in Ergebnisse aufgelisteten Parameterkombinationen, werden sowohl auf die RGB Kanäle, als auch auf den NIR Kanal mit einer Auflösung von 0,6 m angewendet.

Des Weiteren wird eine Texturanalyse mit der Software Erdas Imagine durchgeführt und dafür die Texturbilder *Variance*, *Skewness*, *Mean Euclidean Distance* verwendet.

6.3.3 Kantenorientierte Verfahren

Zur Detektion der Stadtstruktur sollen des Weiteren die oft nicht scharf konturierten Kanten verbessert werden. Kanten stellen in der digitalen Bildverarbeitung ein wichtiges Mittel zur Objekterkennung und somit zur Bildinterpretation dar. Unter einer idealen Kante versteht man in der Regel eine räumlich scharfe Diskontinuität der räumlichen Grauwertfunktion. Für die Detektion von Kanten ist es deshalb notwendig, dass Grauwertveränderungen verstärkt und Bereiche konstanter Grauwerte unterdrückt werden. Dazu eignen sich Ableitungsoperatoren. Die erste Ableitung hat an einer Kante ein Maximum oder Minimum, die zweite Ableitung einen Nulldurchgang (Jähne, 2002). Diese beiden Merkmale können zur Bestimmung von Kanten verwendet werden.

Bei Kanten im Ortsfrequenzraum handelt es sich um hoch frequente Bildanteile. Da auch zufällige Signalfuktationen, wie sie durch Rauschen verursacht werden, von hoch frequenter Natur sind, besteht für die Kantendetektoren die Schwierigkeit in der Unterscheidung zwischen den genannten Störungen und realen Kanten. Durch ungünstige Beleuchtungen, Schatten usw. können sogenannte Pseudo-Kanten auftreten. Für die korrekte Ermittlung von Kanten muss daher vor der eigentlichen Kantendetektion eine Filterung, zur Verminderung von Rauschen und feinen Details

⁷ Co-occurrence Matrizen erfassen Grauwertinteraktionen innerhalb einer Bildumgebung und sind ein Maß für die Statistik zweiter Ordnung, bei der die Richtung und Entfernung zweier Pixel zueinander eine wichtige Rolle spielen.

im Originalbild, durchgeführt werden. Die üblichen Operatoren bestehen deshalb aus einem Glättungs- und Kantenverstärkungsteil.

Das Ergebnis der Kantendetektion ist abhängig von der Kantenart (Grauwert-, Textur- und Farbkanten), der Qualität des Ausgangsbildes und dem verwendeten Algorithmus (Steinbrecher, 1993). Je nach Einsatzgebiet liefert daher der eine oder der andere Operator ein besseres Ergebnis.

Die Kantendetektion wurde in dem Programm ENVI mit den Roberts-, Sobel- und Laplace-Operatoren, in den RGB Kanälen in der Kombination 3, 4 und 2 angewendet. Das Ergebnis ist eine Trennung der Gebäudekanten von den Straßen und der Vegetation und wird in Kapitel 7 anhand von Abbildungen dargestellt, beschrieben und verglichen.

Tab. 6.3.3-1: Übersicht der verwendeten Kantenfilter. Quelle: siehe Literatur*

Operator	Roberts-Operator	Sobel-Operator	Laplace-Operator
Verfahren	parallele Verfahren, bei denen lokal ein Eigenschaftsvektor festgelegt wird, der Angaben über Kantenstärke, Kantenrichtung oder Maße der Kantenform enthält und parallel für alle Bildpunkte berechnet wird		
Operatorenaufbau	Differenzoperator erster Ordnung, berechnet Ableitungen in diagonalen Richtung	Differenzoperator erster Ordnung, glättet orthogonal zur Differenzierungsrichtung, richtungsabhängig; mehrere Kantenfilter nacheinander ausgeführt und Ergebnisse zu einem Bild kombiniert	Differenzoperator zweiter Ordnung, richtungsunabhängig; durch Einsatz punktsymmetrischer Maske Kanten aller Richtungen detektierbar
Bildmerkmal	rauschempfindlich, da Glättung fehlt; diagonal verlaufende Kanten besser detektiert als bei einfachen Differenzoperator	Verbreiterung der Kanten, nur Detektion der senkrecht zur Laufrichtung sich befindenden Kanten mgl.	rauschempfindlich, klarer Kantenverlauf
Anwendung	in Programm ENVI für alle vier Kanäle, jeden Kanal einzeln, mit Filtermatrix 3x3; Werte für Funktion <i>Image Add Back</i> : 0, 20, 40 (d.h. das bearbeitete Bild wird dem Originalbild wieder angenähert)		
*Literatur	Klette & Zamperoni (1995), Abmayr (1994), Bässmann & Besslich (1989) und Steinbrecher (1993)		

6.3.4 Gebäudegrundrisskarte

Nachdem die Gebäudegrundrisskarte in der Vorverarbeitung georeferenziert wurde, werden nun die Gebäude in dem Geoinformationssystem ArcGis abdigitalisiert und die Attributtabelle bearbeitet. Dieser Schritt dient der Erfassung der Gebäude für das 3D-Stadtmodell und für den visuellen Vergleich mit dem 3D-Stadtmodell aus der Klassifikation.

6.3.5 Erstellen des Digitalen Geländemodells (DGM)

Das Digitale Höhenmodell (DHM) bildet den höhenmäßigen Verlauf einer beliebigen Oberfläche mathematisch ab. In dieser Arbeit wird das DHM der Geländeoberfläche ohne Bebauung und Vegetation - DGM (Digitales Geländemodell) für die dreidimensionale Darstellung der Stadt Sanaa genutzt.

Die Konturlinien werden von der Orthophoto Map Sanaa (Maßstab 1:10.000) abdigitalisiert und die Höhen in die Attributtabelle eingefügt. Der Abstand der Höhenlinien beträgt 10 m. Für die Umwandlung von Shape-file in TIN und die Darstellung des DGM wird die Software ArcMap 9.3 verwendet.

6.3.6 Vegetationsdetektion

Zur Erfassung und Charakterisierung des Vegetationsanteils innerhalb des Untersuchungsgebietes wurde der Vegetationsindex NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index) bestimmt. Er macht sich die charakteristische spektrale Reflexion von lebender, grüner Vegetation zu nutze. Im sichtbaren Licht ist die Reflexion gering und steigt im nahen Infrarot stark an, siehe Abb. 4.3-3.

Der NDVI ist abhängig von dem Anteil, der durch die Photosynthese absorbierten Strahlung und korreliert stark mit der Vitalität und der Dichte der Vegetationsdecke. Er berechnet sich aus der reflektierten Strahldichte in einem Aufnahmekanal des nahen Infrarot mit L_{NIR} und im roten Spektralbereich mit L_{ROT} . Durch Einführung der Differenz und Summe beider Strahldichten ergibt sich die normalisierte Differenz der spektralen Strahldichten, der NDVI (Hildebrandt, 1996), siehe folgende Formel.

$$NDVI = (L_{NIR} - L_{ROT}) / (L_{NIR} + L_{ROT})$$

Da Vegetation im NIR stärker reflektiert als im roten sichtbaren Licht, ist der Quotient um so größer, je höher der Anteil an grüner Biomasse ist. Die Werte des NDVI liegen zwischen -1 und +1. Sehr niedrige Werte (0,1 und weniger) korrespondieren mit

kahlen Gebieten wie Fels, Sand und Schnee. Mittlere Werte (0,2 bis 0,3) stellen Busch- und Grünland dar und hinter hohen Werten (0,6 bis 0,8) verbergen sich gemäßigte und tropische Regenwälder (NASA, 1999).

Für die Interpretation des Vegetationsindexes sind Bedingungen, die zu Reflektionsschwankungen führen, zu beachten. Dazu zählen beispielsweise Art und Zustand der Vegetation, der Grad der Bodenbedeckung, Einflüsse der Einstrahlungs- und Beobachtungsgeometrie und der Atmosphärenzustand (Hildebrandt, 1996).

In dieser Arbeit wird der NDVI, auf Basis der QuickBird-Satellitenbilddaten, mit dem Programm ENVI, in den BGR+NIR Kanälen mit der *Atmospheric Correction* Methode *Dark Object Subtraction* berechnet. Dabei wird die Fläche der Stadt in vier Kategorien eingeteilt:

- 1: no vegetation
- 0,18: sparse vegetation
- 0,50: moderate vegetation
- 0,70: dense vegetation.

6.4 Regeln für die Ableitung eines funktionalen Stadtmodells

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, die es ermöglicht, aus QuickBird-Satellitenbilddaten ein funktionales Stadtmodell abzuleiten, durch das die Struktur einer orientalischen Stadt, wie sie in den Modellen von Dettmann (1969) und Ehlers (1993) dargestellt ist, deutlich herausgearbeitet wird. Dafür wurde das Satellitenbild auf drei verschiedene Arten klassifiziert und andere Bildverarbeitungsverfahren durchgeführt, die zusätzliche Informationen zur Erfassung der Stadtstruktur liefern. Die Entscheidung, welche der durch die Vielzahl an Verfahren gewonnenen Informationen in das Stadtmodell einfließen sollen, wird anhand selbst aufgestellter Regeln getroffen, die im Folgenden vorgestellt werden.

1. Die Kosten für die Erstellung der 3D-Visualisierung sollen so gering wie möglich gehalten werden.
2. Die Ergebnisse aus den drei verschiedenen Klassifikationen werden einem visuellen Vergleich mit dem bearbeiteten Satellitenbild (textur- und kantenorientierte Verfahren) und einer Grundrisskarte unterzogen. Es werden nur die Klassifikationsergebnisse für die Erstellung des Stadtmodells genutzt, bei denen die Gebäude die größte Lage- und Formgenauigkeit aufweisen.

3. Für das Stadtmodell wird auf die Klassifikation mit den in der Validierung erreichten höchsten Genauigkeitswerten zurückgegriffen.
4. Es werden nur die Klassen ausgewählt, die für die Erstellung des Stadtmodells notwendig sind und die eine möglichst nahezu unveränderliche Flächennutzung aufweisen.

6.5 Verfahren zur Erfassung der Struktur einer orientalischen Stadt und ihre Darstellung in 2D/3D-Stadtkarten

Das ausgearbeitete Verfahren integriert die Ergebnisse aus der Klassifikation, der visuellen Interpretation und der manuellen Digitalisierung. Als Datenquellen dienen QuickBird-Satellitenbilddaten, topographische Karten (für die Erstellung des DGM und visuelle Interpretation), Grundrisskarten und Luftbilder (für visuelle Interpretation). Nähere Informationen zu den Daten sind in Abschnitt 5.2 zu finden.

Die Vorgehensweise zur geometrischen Modellierung wird im Folgenden beschrieben. Zu Beginn werden die Ergebnisse der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene ins Shape-Format umgewandelt, in ArcGis überführt und dargestellt. Dort findet eine Nachbearbeitung statt, die kurz dargestellt werden soll.

Die in Richtung Markt immer enger werdenden Durchgangsstraßen der Altstadt werden von der Klassifikation mit nur wenigen Pixeln erfasst und sind deshalb bei der Nachbearbeitung (Unterabschnitt 6.2.4.) eliminiert worden. Diese fehlenden Teile der Durchgangsstraßen werden manuell digitalisiert. Außerdem werden einige, bei der Klassifikation einer falschen Klasse zugeordneten Flächen, manuell entfernt. Dazu gehören z.B. die sich in dem Wadibett befindende sowie sandige Straßen.

Nach der manuellen Verbesserung der Klassifikationsergebnisse wird für die Erstellung der 2D-Stadtkarte das Untersuchungsgebiet in drei Großbereiche eingeteilt und diese verschiedenfarbig markiert (Abb. 7.1.7-1). Dieses Stadtmodell wird mit der Karte aus der visuellen Interpretation (Abschnitt 7.2 und Abb. 7.2.2.1-1, Abb. 7.2.2.2-1 und Abb. 7.2.2.3-1) nach bestimmten Kriterien, wie z.B. Zeitaufwand und Kosten ihrer Erstellung, miteinander verglichen. Es soll geprüft werden, ob sich wesentliche Elemente einer orientalischen Stadt, wie sie in den Modellen von Dettmann (1969) und Ehlers (1993) (Unterabschnitt 5.1.2) dargestellt werden, in Sanaa wiederzufinden sind (siehe Abschnitt 8.1).

Anschließend werden die Ergebnisse aus der visuellen Interpretation mit der aus den Klassifikationsergebnissen erstellten Stadtkarte in dem Programm ArcMap zusammengeführt (siehe Abschnitt 7.3 und Abb. 7.3-1, Abb. 7.3-2 und Abb. 7.3-3).

In Ergänzung der 2D-Karten wird eine kartographische Darstellung in 3D durchgeführt. Sie erfolgt aufgrund der vorhandenen Software- und Hardwareausstattung nur für den Bereich der Altstadt. Die Verarbeitungslinie der verwendeten Daten sind in Abb. 6.5-1 schematisch dargestellt.

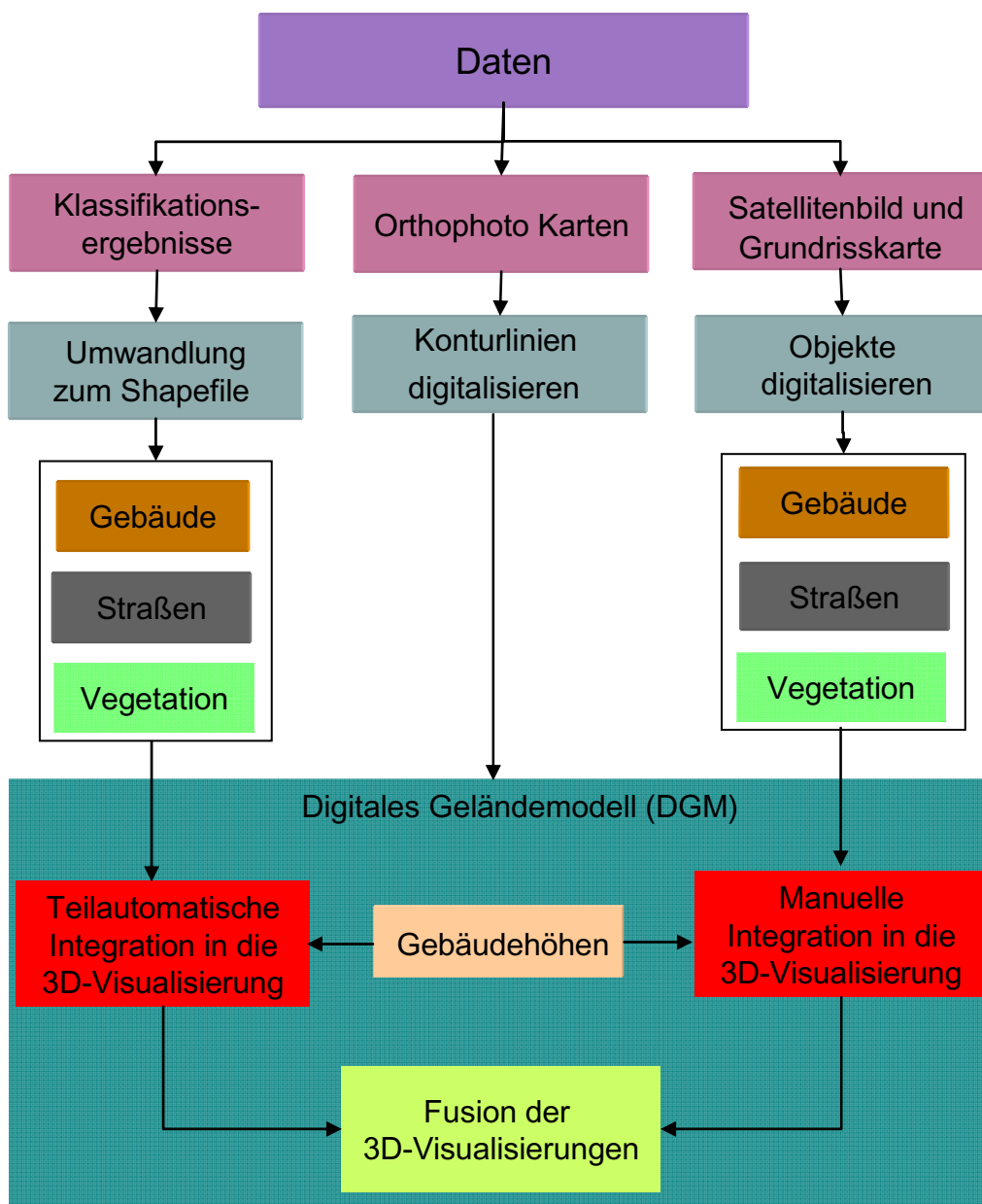


Abb. 6.5-1: Flussdiagramm zur Verarbeitungslinie der 3D-Visualisierung. Eigene Darstellung.

Das in 3D zu visualisierende Gebiet der Altstadt wird sowohl auf dem Satellitenbild, auf Basis der Grundrisskarte, manuell digitalisiert, als auch von der aus den Klassifikationsergebnissen erstellten Stadtkarte in ArcMap ausgeschnitten. Für die Objekte in diesem Bereich werden die relativen Höhen berechnet, indem die Stockwerksanzahl mit den jeweiligen Stockwerkshöhen multipliziert wird. Für Gebäude, außer Industrie- und Lagerhallen, werden in der Altstadt 3 m und im übrigen Gebiet 4 m, auf Grundlage von Experteninformationen, für die Höhe eines Stockwerkes veranschlagt. In der Altstadt haben die Gebäude durchschnittlich 10 und manchmal auch mehr Stockwerke. Für die Stadtmauer wird eine Höhe von 5 m definiert. Diese Objekte werden dann mit dem DGM zusammengebracht. Die Höhe der Gebäudeunterseite ergibt sich durch die Verschneidung des Gebäudegrundrisses mit dem DGM. Jedes Gebäude wird durch ein Gebäudemodell LOD1⁸ (Gröger et al., 2007), (Luebke et al., 2003) repräsentiert. Die auf Basis der Digitalisierung erstellte 3D-Visualisierung dient dem Vergleich mit der aus den Klassifikationsergebnissen erstellten 3D-Visualisierung zur Bestimmung der Lage- und Formgenauigkeit ihrer Objekte. Anschließend werden die Ergebnisse beider 3D-Visualisierungen zu einer 3D-Darstellung zusammengeführt (siehe Abb. 7.4.3-1). In Abschnitt 7.4 werden die Ergebnisse der 3D-Visualisierung vorgestellt und darauf hin untersucht, in welchen Punkten sie die 2D-Karte ergänzen und eine Bereicherung der Visualisierung der urbanen Strukturen orientalischer Städte darstellen.

6.6 Visuelle Bildinterpretation

Bei der Auswertung der Satellitenbilddaten durch die visuelle Interpretation können Bildinformationen, wie Textur, Struktur, Form, Kontext und Reflexion zur Abgrenzung der verschiedenen Objekte bereits mit einfachen Hilfsmitteln bei nur geringer Anforderung an die Soft- und Hardware gewonnen werden. Durch das einfache Erkennen komplexer Strukturen und Gegenständen, können große Informationsmengen aus den Fernerkundungsdaten extrahiert und qualitativ hochwertige Interpretationen gemacht werden.

Der Nachteil der visuellen Interpretation liegt darin, dass der Genauigkeitsgrad der aus dem Satellitenbild erfassbaren Informationen subjektiv beeinflusst ist. Er ist abhängig vom Kenntnisstand des Interpreten über das Gelände, die Beschaffenheit

⁸ LOD: Level of Detail – bezeichnet die verschiedenen Detailstufen bei der Darstellung virtueller Welten. LOD 1: Klötzchenmodell, Gebäudeblock (Grundfläche hochgezogen) (Luebke, 2003), (Special Interest Group 3D, 2007)

und die jahreszeitlichen Veränderungen sowie von seiner Erfahrung (Strand et al., 2002) hinsichtlich der Wiedergabe auf den Fernerkundungsdaten. Die Objektivität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sind eingeschränkt (Ehlers et al., 2003). Diese Gründe sind die Motivation für das Bestreben automatische Verfahren zur Interpretation von Fernerkundungsdaten zu entwickeln. Jedoch reichen die bisher verfügbaren automatischen Klassifikationsverfahren im Allgemeinen nicht an die Auswertequalität eines Menschen heran (Coppin et al., 2004).

Der Gesamtprozess der Bildinterpretation gliedert sich im Wesentlichen in zwei Phasen. Am Anfang steht das Erkennen von Objekten. Auf der Grundlage des Erkannten werden dann mit Hilfe von speziellem Vor- und Fachwissen Rückschlüsse auf die jeweilige Klasse gezogen. Ausführlichere Beschreibungen zu dem Interpretationsvorgang können z.B. in Hildebrandt (1996) und Albertz (2007) nachgelesen werden.

Für die visuelle Interpretation der Stadtstruktur von Sanaa werden als Informationsquellen zusätzlich zum Satellitenbild Luftbilder von 1994, topographische Karten, photographische Aufnahmen und statistische Daten genutzt.

Zu Beginn der visuellen Interpretation findet eine großräumige, flächenhafte Gliederung des Bildes in drei Bereiche statt, die mit den Großbuchstaben A, B, C gekennzeichnet werden. Der Bereich A umfasst das Gebiet der traditionellen Altstadt und liegt nordöstlich von der Mitte des Untersuchungsgebietes. Westlich davon befinden sich die Garten- und Vorstadtquartiere, um die die Altstadt im 16. Jahrhundert erweitert worden ist und in dem Bild als Großgebiet B zusammengefasst sind. Die Flächen außerhalb von A und B bilden das Gebiet C, das sich außerhalb der alten Stadtmauer befindet. Als zweiten Schritt sind diese eben genannten Großbereiche in drei Stufen weiter untergliedert worden, siehe Tab. 6.6-1. Das Straßennetz des gesamten Untersuchungsgebietes wird digitalisiert und in acht verschiedene Klassen untergliedert (mehr dazu in Tab. 6.6-1).

Große Areale, wie die Friedhöfe, Sportplätze, Parkanlagen und die Obst- und Gemüsegelder werden als Flächen digitalisiert. Insgesamt werden zwölf verschiedene Objektklassen auf dem Satellitenbild unterschieden und mit einem Symbol auf der Karte gekennzeichnet.

Tab. 6.6-1: Untergliederung der zu interpretierenden Großbereiche.

Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Bebaute Flächen	<ul style="list-style-type: none"> - Wohnbauflächen - Moscheen - Industrieflächen - Öffentliche Gebäude - Schulen - Sonstige Flächen 	Bauweise (dicht oder locker, Geschosszahl, Dachmaterial, Grundrissgröße der Häuser, mit oder ohne Garten, ...)
Freiflächen	<ul style="list-style-type: none"> -Ackerflächen -Wiese -Bäume -Spiel- und Sportflächen -Sonstige Flächen 	Feuchtigkeitsgrad, Funktion, Nutzungsart
Straßen	<ul style="list-style-type: none"> - mehrspurige Schnellstraße - wichtige Hauptstraße - Hauptstraße - Hauptstraße (Kanal) - Nebenstraße - Nebenstraße (Kanal) - Zubringerstraße - Gasse 	Breite: mehr- oder einspurig, Inseln zwischen den Fahrbahns Spuren

6. 7 Zusammenfassung

In Kapitel 6 wurde auf die einzelnen Schritte, die zur Umsetzung des Konzeptes dieser Arbeit nötig sind, eingegangen. Am Anfang steht die Erläuterung der für alle Klassifikationsverfahren erforderlichen Vorverarbeitung der Satellitenbilddaten. Die Auswertung der Bilddaten erfolgte visuell als auch digital durch objekt- und pixelbasierte Klassifikationsverfahren. Die für alle durchgeführten Klassifikationsverfahren genutzte Klasseneinteilung wurde zu Beginn beschrieben. Es folgen nähere Ausführungen zu den pixelorientierten Klassifikationsverfahren, die sowohl auf Bildebene als auch auf Klassenebene durchgeführt wurden, und zu dem objektorientierten Klassifikationsverfahren. Die Ergebnisse aus den Klassifikationen werden nach einem visuellen Vergleich mit den Originaldaten, topographischen Karten etc. einer Nachbearbeitung unterzogen. Die dann anschließende Validierung erfolgte für die Ergebnisse aus den pixelorientierten Klassifikationsverfahren zur Bewertung der Klassifikationsgenauigkeit. Zur Berechnung der Evaluierungsmaße wurde eine Konfusionsmatrix genutzt. Des Weiteren wurde das Klassifikationsergebnis anhand eines visuellen Vergleichs mit topographischen Karten, den Originaldaten, Luftbildern und Stadtplänen bewertet.

Neben den Satellitenbilddaten wurden für die Stadtmodellierung topographische Daten genutzt. Sie dienten der Gewinnung zusätzlicher Informationen zur Erfassung der Stadtstruktur von Sanaa. Nach einer Aufbereitung der topographischen Daten wurden textur- und kantenorientierte Verfahren durchgeführt. Für die dreidimensionale Darstellung der Stadt Sanaa wurden die Gebäude von der Gebäudegrundrisskarte digitalisiert. Und von der Orthophotomap von Sanaa wurden die Konturlinien digitalisiert und ein Digitales Geländemodell (DGM) erstellt. Des Weiteren fand eine Bestimmung des Vegetationsindex NDVI des Untersuchungsgebietes statt. Die Ergebnisse der NDVI-Berechnung gehen in die visuelle Interpretation des Satellitenbildes und in die Auswertung der Klassifikationsergebnisse ein (Kap. 7).

Die Entscheidung, welche der durch die Vielzahl an Verfahren gewonnenen Informationen zur Erstellung des Stadtmodells genutzt werden sollen, wird anhand zuvor definierter Kriterien getroffen. Im Anschluss daran wurde das erarbeitete Verfahren zur Ableitung des Stadtmodells vorgestellt. Dieses Verfahren beschreibt die Erstellung von 2D-Stadtkarten sowohl auf Grundlage der Klassifikationsergebnisse als auch auf Grundlage der visuellen Interpretation, die dann einem visuellen Vergleich unterzogen und die Informationen anschließend zusammengefügt werden. Im Anschluss daran wird das weitere Vorgehen zur Erstellung eines 3D-Stadtmodells für den Altstadtbereich beschrieben. Dieses wird sowohl von den Klassifikationsergebnissen als auch von der manuellen Erfassung der Objekte erzeugt. Dazu dienen ein DGM, die Gebäudegrundrisskarte und das Originalsatellitenbild.

7. Zusammenstellung und Validierung der Auswertungsergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse, die durch Anwendung der digitalen und optischen Verarbeitungsverfahren im Einzelnen erreicht wurden, zusammengeführt und validiert. Dabei liegt ein besonderer Schwerpunkt auf der vergleichenden Diskussion der Verfahren der pixelbasierten, auf Bild- und Klassenebene, Klassifikationen. Die Ergebnisse der digitalen Bildverarbeitung werden den Ergebnisse der visuellen Analyse des analogen Bildes gegenübergestellt.

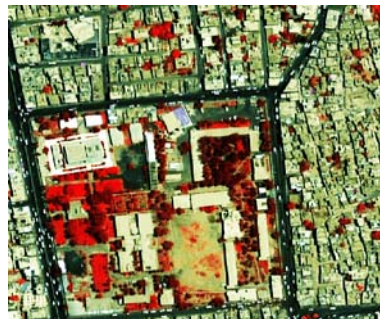
7.1 Ergebnisse der Bildverarbeitung

7.1.1 Ergebnisse der Bildverbesserungsmethoden

Zur Verbesserung des Kontrastes und somit Erhöhung der Detailgenauigkeit wurde eine „Look Up Table“ (LUT) mit folgenden Übertragungsfunktionen: Percentage LUT und Histogramm Equalisation, eingesetzt. Es handelt sich dabei um eine Umrechnungstabelle, die dem Original- oder Eingabewert eines Pixels einen neuen Wert zwischen 0 bis 255 zuweist. Die Ergebnisse sind in Abb. 7.1.1-1 dargestellt.



(a) Multispektral Falschfarbe ohne Kontrastverbesserung



(b) Multispektral Falschfarbe Percentage LUT



(c) Multispektral Falschfarbe Histogramm Equalization

Abb. 7.1.1-1: Kontrastverbesserung von multispektralen Falschfarbenbildern.

Eine weitere Methode der Bildverbesserung ist die digitale Filterung. Durch den Einsatz eines Hochpassfilters wurden die Daten verstärkt und Informationen hervorgehoben (Abb.7.1.1-2). Weitere Ergebnisse der für diese Arbeit genutzten Hochpassfilter finden sich in Unterabschnitt 7.1.3.



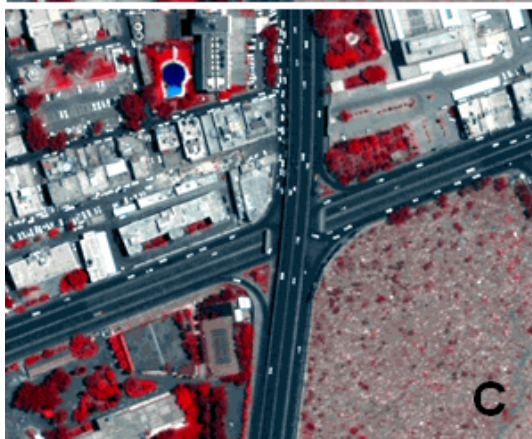
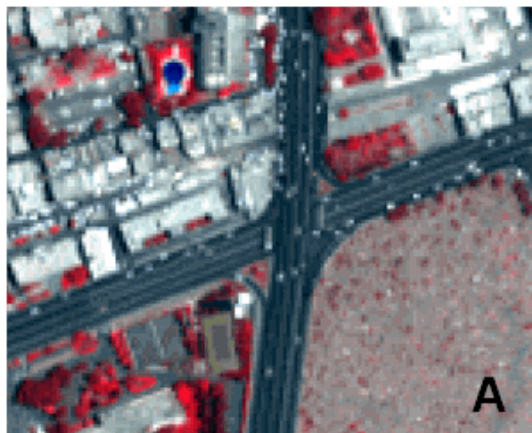
(a) Multispektral Falschfarbe
ohne Hochpassfilter



(b) Multispektral Falschfarbe
mit Hochpassfilter

Abb. 7.1.1-2: QuickBird-Satellitenbildaufnahme vor und nach der Anwendung eines Hochpassfilters (Fenstergröße 3 x 3 Pixel).

Eine weitere durchgeführte Bildverbesserungsmethode ist die Datenfusion (*Resolution Merge*). Das Ergebnis der für diese Arbeit genutzten IHS-Transformationsmethode zeigt Abb. 7.1.1-3



A: Multispektral
Bodenauflösung 2,4 m
Falschfarbkombination = 4 3 2

B: Panchromatisch
Bodenauflösung 0,6 m

C: IHS-Merge A + B
Bodenauflösung 0,6 m
Falschfarbkombination = 4 3 2

Abb. 7.1.1-3: QuickBird-Satellitenbildaufnahme im multispektralen und panchromatischen Kanal und nach der IHS – Transformation.

7.1.2 Ergebnisse der texturorientierten Verfahren

Anhand verschiedener Verfahren wurden die Texturen für das Untersuchungsgebiet berechnet und die einzelnen Ergebnisse miteinander verglichen. Im Anschluss sollen die für geeignet befundenen Texturoperatoren für einen Vergleich mit den Ergebnissen aus den Klassifikationen und für die visuelle Bildinterpretation genutzt werden. Zuerst wurden mit Hilfe der Co-occurrence Matrix die Merkmale *Mean*, *Variance*, *Contrast* und *Correlation* in folgenden Kombinationen getestet.

1. Mean (layer 1), Variance (layer 3), Correlation (layer 4)

Bei dieser Parametereinstellung werden die Gebäude gut identifiziert. Sie sind in der Abb. 7.1.2-1 als Objekte in Abhängigkeit vom Dachmaterial und den sich darauf befindenden Objekten in roter bis violetter Farbe markiert. Nach außen werden sie durch eine heller farbige Linie abgegrenzt. Vegetation und Straßen erscheinen in blauer und Fahrzeuge in weißer Farbe. Brachflächen und Wege werden in roter Farbe abgebildet. In dicht bebauten Wohngebieten sind die einzelnen Sackgassen mit hellen Linien abgegrenzt und dadurch sehr gut zu erkennen (Abb. 7.1.2-1, links).

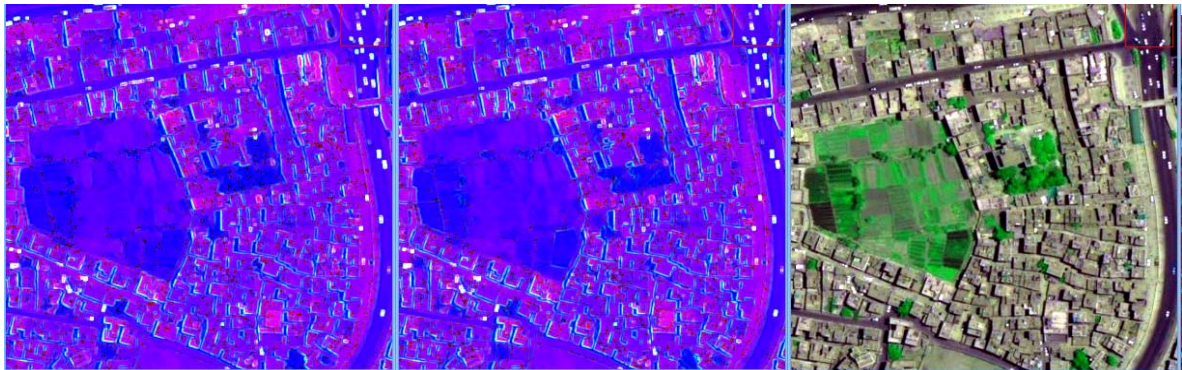


Abb. 7.1.2-1: Co-occurrence Matrix: *Mean* (layer 1), *Variance* (layer 3), *Correlation* (layer 4) – Bild links, *Mean* (layer 1), *Variance* (layer 4), *Correlation* (layer 2) – Bildmitte, Originalbild mit Echtfarbkombination – Bild rechts, Programm ENVI.

2. Mean (layer 1), Variance (layer 4), Correlation (layer 2)

Das Ergebnis dieser Kombination entspricht dem gerade beschriebenen Ergebnis, jedoch mit dem Unterschied, dass hier weniger schwarze Flächen, die aus den Schatten resultieren, erscheinen (Abb. 7.1.2-1, Bildmitte).

3. Mean (layer 4), Contrast (layer 3 und 1)

Das Straßennetz wird gut identifiziert. Es erscheint in einer dunkleren Farbe als die übrigen Objekte. Die wenig befahrenen Straßen und Wege sind nicht ganz schwarz, sondern dunkelrot. Gebäude, Vegetation und Brachflächen werden in roter, die Fahrzeuge in weißer Farbe dargestellt (Abb. 7.1.2-2).

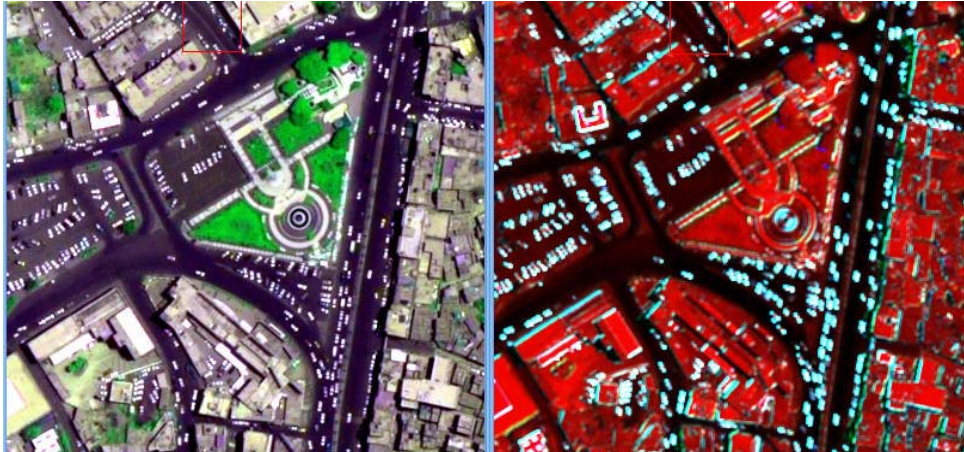


Abb. 7.1.2-2: Co-occurrence Matrix: *Mean* (layer 4), *Contrast* (layer 3 und 1) - Bild rechts; Satellitenbildaufnahme in Echtfarbkombination, Programm ENVI.

Des Weiteren wurde eine Texturanalyse in Erdas Imagine mit *Variance*, *Skewness* und *Mean Euclidean Distance* durchgeführt und damit folgende Ergebnisse erzielt.

Mit dem Texturoperator ***Variance*** erscheint das Bild in schwarzer Farbe. Die Abgrenzungen der Gebäude zu ihrer Umgebung, deren Innenhöfe, ihrer Aufbauten, der Fensterscheiben auf den Lagerhallen (Abb. 7.1.2-3), der Vegetation und der Fahrzeuge werden mit weißen Linien dargestellt.

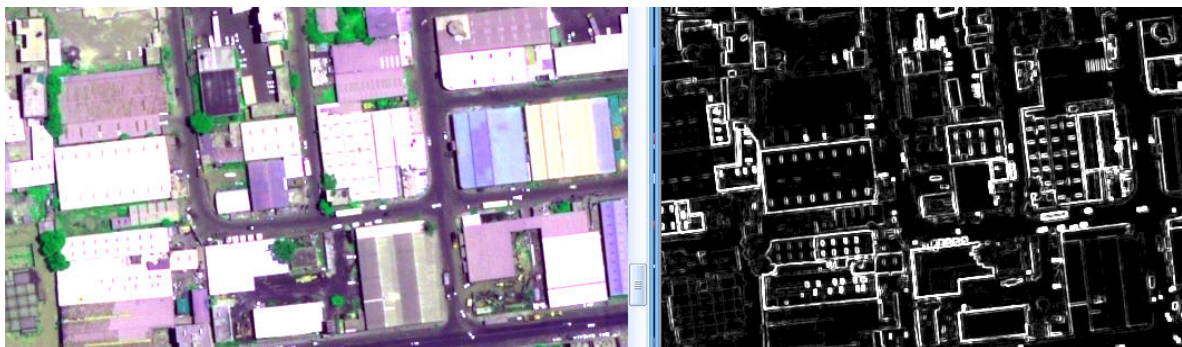


Abb. 7.1.2-3: Satellitenbildaufnahme links, Anwendung des Texturoperators *Variance* , Bild rechts.

Treppenaufgänge, die auf das Dach führen und deren Ausgänge, die durch Aufbauten etwas erhöht liegen, wurden abgegrenzt (Abb. 7.1.2-4). Auf diesem Bild kann man auch erkennen, dass bei Kanalkombination 3, 4, 2 (RGB) die Vegetation mit grünen Linien dargestellt wird.

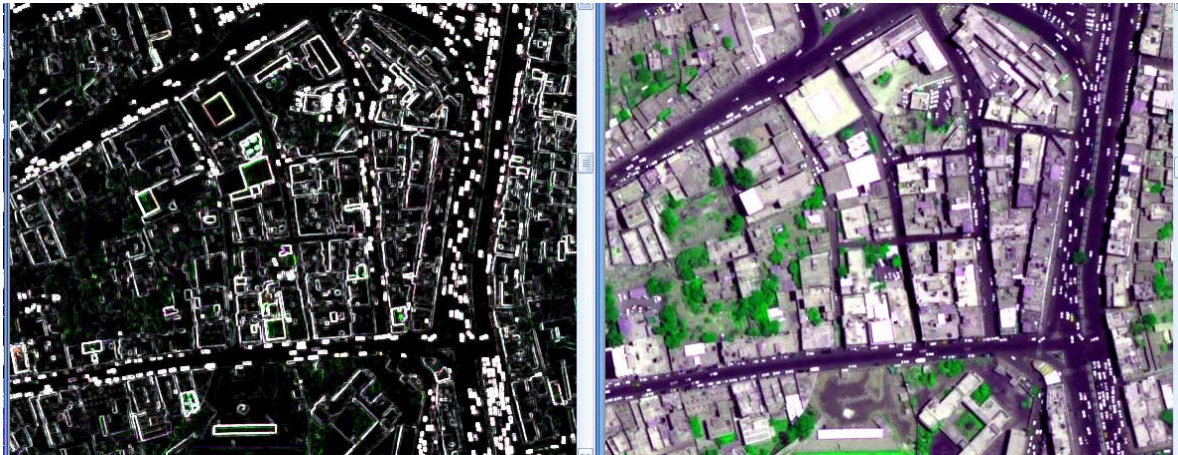


Abb. 7.1.2-4: Satellitenbildaufnahme rechts, bearbeitet mit *Variance* – Bild links.

Durch die abgegrenzten Fußwege und Bäume entlang und zwischen den Straßen können auch die sich dort befindenden Straßen erkannt werden. Auch die Steinplatten, die manche Häuser einrahmen, wurden erfasst (Abb. 7.1.2- 5). Im Allgemeinen ist die Linienstärke auf der Schattenseite der Objekte und der weißen Dächer größer.

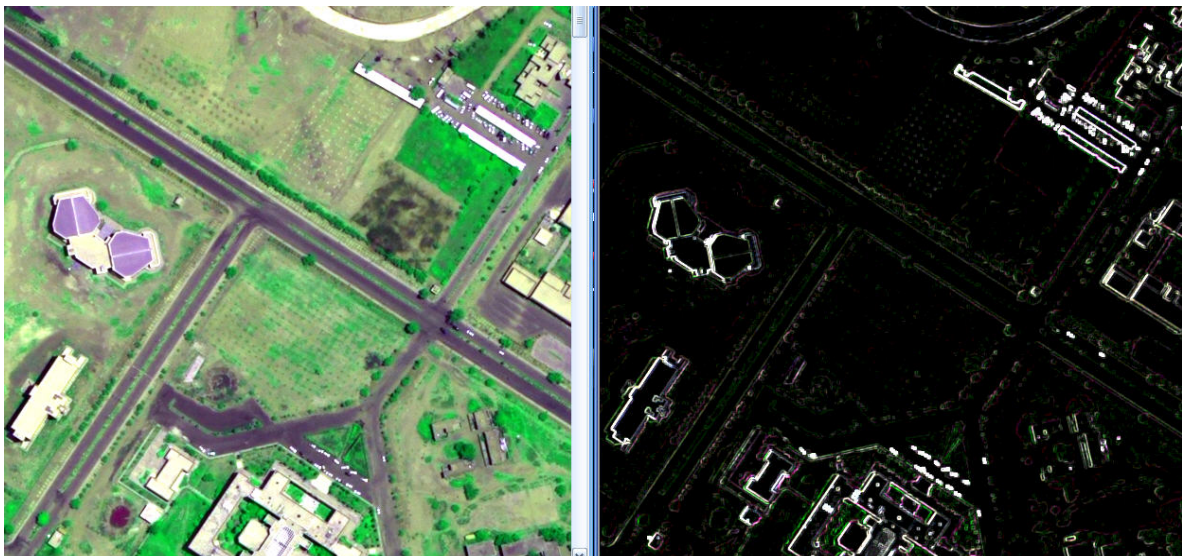


Abb. 7.1.2-5: Satellitenbildaufnahme links, bearbeitet mit *Variance* - Bild rechts.

Skewness:

Bei dem Texturoperator ***Skewness***⁹ erscheint der Hintergrund in grauer Farbe. Für die Abgrenzung der meisten Objekte wird zusätzlich zu der weißen Linie eine schwarze Linie genutzt. Dadurch sind mehr Objekte und Details zu erkennen (Abb. 7.1.2-6).

⁹ Skewness = die Schiefe, sie ist ein Maß für die Symmetrie einer Verteilung (<http://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/119/schiefe/>, Stand 29.11.09)

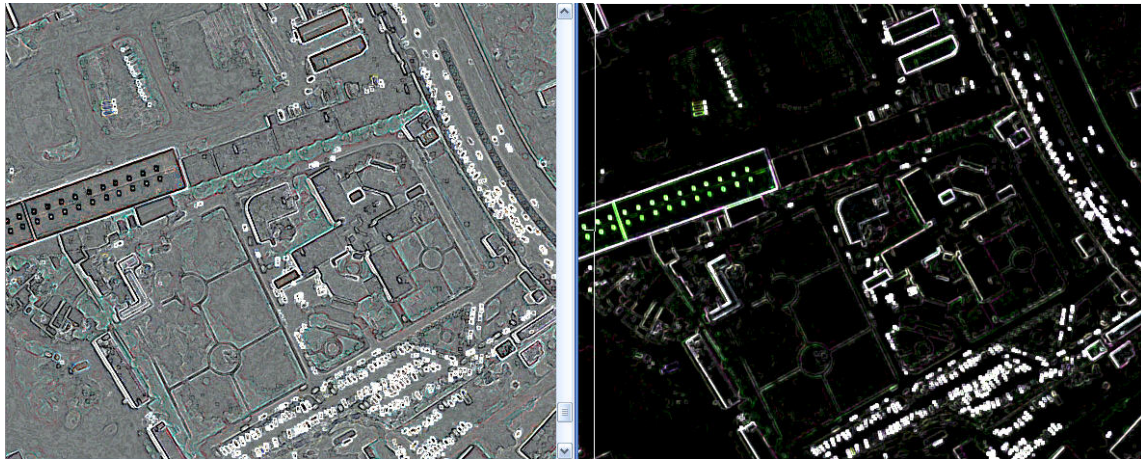


Abb. 7.1.2-6: Satellitenbildaufnahme bearbeitet mit *Skewness* – Bild links, im Vergleich dazu Bild rechts - bearbeitet mit *Variance*.

Dieser Umstand wirkt sich bei der Identifikation der Altstadtstruktur negativ aus. Durch die sehr dichte Bebauung gestaltet sich die Unterscheidung der Gebäude von ihrer Umgebung als schwierig (Abb. 7.1.2-7).



Abb. 7.1.2-7: Satellitenbildaufnahme bearbeitet mit *Skewness* – Bild links, im Vergleich dazu Bild rechts - bearbeitet mit *Variance*.

Mit dem Texturoperator *Skewness* werden im Vergleich zu dem Texturoperator *Variance* viele Objekte besser herausgearbeitet. Dazu zählen die Fahrzeuge, die großen Straßen in ihren Grenzen und mit den Fahrbahninseln, die einzelnen Bäume und Pflanzen in grüner Farbe auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen und auch die sich auf den Dächern befindenden Objekte, wie z.B. die Wasserbehälter.

Schatten werden mit beiden Texturoperatoren als Objekte erfasst und mit weißen Linien umgrenzt, siehe dazu die Minarette der Moschee auf Abb. 7.1.2-8.



Abb.7.1.2-8: Satellitenbilddaufnahme links, bearbeitet mit *Skewness* – Mitte, im Vergleich dazu Bild rechts - bearbeitet mit *Variance*.

Bei ***Mean Euclidean Distance*** erscheint der Untergrund wie mit *Variance* in schwarzer Farbe. Es wurden aber mehr Objekte identifiziert. Dazu zählt die Vegetation mit grünen und roten Linien. Auch die Stadtmauer kann besser erkannt werden. Für die Identifikation der Struktur in der Altstadt wirkt sich die Wiedergabe der vielen Details als weiße oder farbige Linien ungünstig aus (Abb. 7.1.2-9).



Abb. 7.1.2-9: Satellitenbilddaufnahme links, bearbeitet mit *Mean Euclidean Distance* – Mitte, im Vergleich dazu Bild rechts - bearbeitet mit *Variance*.

Für die visuelle Interpretation wird der Texturoperator *Mean Euclidean Distance* ausgewählt.

7.1.3 Ergebnisse der kantenorientierten Verfahren

Durch die Anwendung kantenorientierter Verfahren können Objekte besser herausgearbeitet und dadurch besser erkannt werden. Dies ist vor allem in einer kleinräumigen, heterogenen Umgebung, wie sie in einer Stadt vorzufinden ist, für die visuelle Interpretation sehr hilfreich. Die Ergebnisse der verschiedenen Operatoren werden im Folgenden vorgestellt.

Roberts-Operator

Der Roberts-Operator (vgl. Unterabschnitt 6.3.3) wurde mit drei verschiedenen Werten in *Image Add Back*, auf einem Kanal, angewandt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.1.3-1 dargestellt.

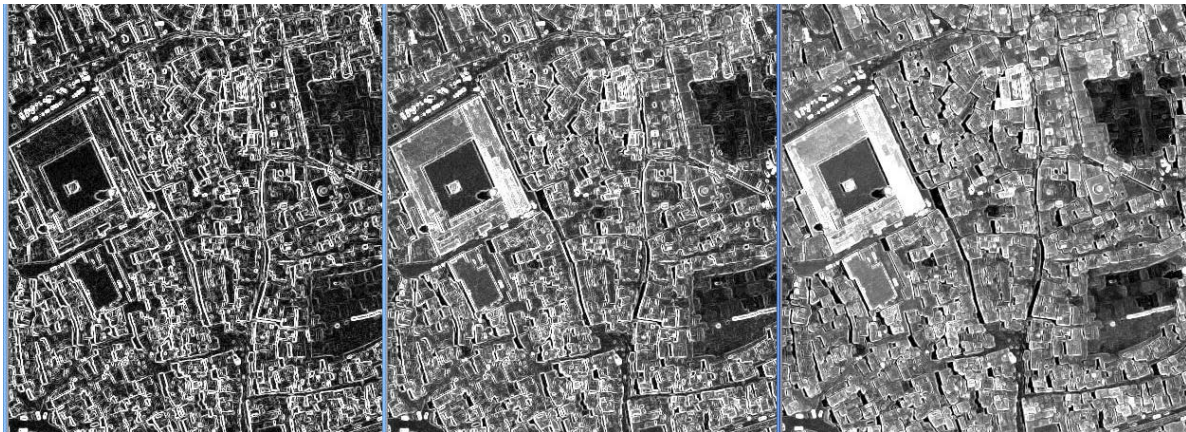


Abb. 7.1.3-1: QuickBird-Satellitenbild, Ausschnitt von Altstadt in Sanaa, bearbeitet mit Roberts-Operator, auf einem Kanal, *Image Add Back* null – Bild links, *Image Add Back* 20 – Bild Mitte, *Image Add Back* 40 – Bild rechts.

Das linke Bild zeigt den Operator ohne *Image Add Back*. Die Objekte werden durch weiße Linien von einem schwarzen Untergrund hervorgehoben. Auch alle Schatten werden mit Linien erfasst, wodurch das Erkennen der Gebäude erschwert wird. Die Stadtstruktur, besonders in dicht bebauten Gebieten mit hohen Häusern, wie man es in der Altstadt vorfindet, kann auf diesem Bild nur ungenügend erkannt werden.

Auf dem Bild in der Mitte wurde der Roberts-Operator mit einem *Image Add Back* Wert von 20 und auf dem Bild rechts daneben mit einem Wert von 40 angewandt. Je höher der Wert, desto mehr nähert sich das Ergebnis dem Originalbild an. Die Abgrenzung der Objekte durch Linien weicht einer flächenhaften Darstellung. Die Dächer der Gebäude erscheinen in grauer Farbe und können so gut von den schwarz dargestellten Straßen unterschieden werden. Das Verkehrssystem mit den Durchgangsstraßen und den Sackgassen, auch kleinere Moscheen, im Bildaus-

schnitt rechts mittig, sind nun gut zu erkennen. Die Schatten der Gebäude erscheinen in dunkler Farbe und lassen das Bild räumlich erscheinen.



Abb. 7.1.3-2: QuickBird-Satellitenbild, Ausschnitt von Altstadt in Sanaa, bearbeitet mit Roberts-Operator, in allen vier Kanälen, *Image Add Back* null – Bild links, *Image Add Back* 20 – Bild Mitte, *Image Add Back* 40 – Bild rechts.

Abb. 7.1.3-2 zeigt die Anwendung des Roberts-Operator in allen vier Kanälen mit den verschiedenen *Image Add Back* Werten. Die Vegetation wird in grüner Farbe dargestellt (bei Kanalkombination 3, 4, 2) und kann so einfach von den Gebäuden und den Straßen unterschieden werden. Die einzelnen Details innerhalb der Objekte (siehe Bild links) werden bei allen Kanälen seltener weiß und häufiger durch farbige Linien dargestellt. Gebäude werden so besser von ihrer Umgebung abgegrenzt, als bei nur einem Kanal. Bei einem Wert von 40 werden zum Teil die ungefähren Originalfarben der Dächer wiedergegeben.

Sobel-Operator

Die Anwendung des Sobel-Operators (vgl. Unterabschnitt 6.3.3) auf allen Kanälen bringt bei einem *Image Add Back* Wert von Null visuell die gleichen Ergebnisse wie die des Roberts-Operators (Abb. 7.1.3-3, Bild links). Je höher der *Image Add Back* Wert, desto flächiger und räumlicher wird die Darstellung der Objekte und desto besser kann die Stadtstruktur erkannt werden, ähnlich dem Roberts-Operator. Jedoch mit dem Unterschied, dass auch bei einem Wert von 40 die Darstellung der Objekte linienhaft bleibt und das Erkennen der Dachflächen weniger gut ist.

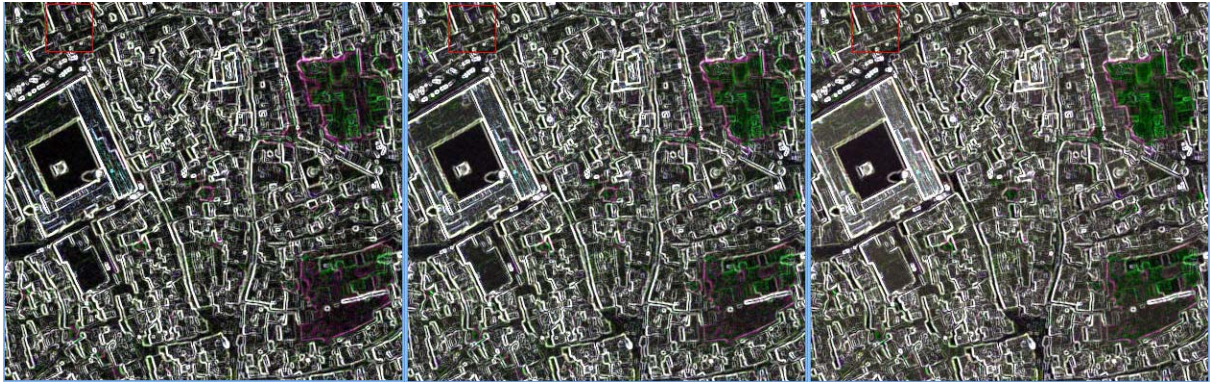


Abb. 7.1.3-3: QuickBird-Satellitenbild, Ausschnitt von Altstadt in Sanaa, bearbeitet mit Sobel-Operator, in allen vier Kanälen, *Image Add Back* null – Bild links, *Image Add Back* 20 – Bild Mitte, *Image Add Back* 40 – Bild rechts.

Laplace-Operator

Das Ergebnis des Laplace-Operators (vgl. 6.3.3) ist in Abb. 7.1.3-4 dargestellt. Durch diesen Operator, mit einem *Image Add Back* Wert von 40, werden die Kanten der Objekte sehr gut herausgearbeitet, so dass die Struktur der Stadt, auch in eng bebauten Gebieten, klar ersichtlich wird. Auch einzelne Elemente auf den Dächern, wie z.B. die Kuppeln einer Moschee oder die großen Satellitenantennen auf den Villen, die Sackgassen, schmale Wege, kleine Objekte im Sūq, die Gräber auf den Friedhöfen, die Fahrbahnmarkierungen, die einzelnen Ackerfurchen und viele andere Dinge, können durch die Filterung mit dem Laplace-Operator sehr gut erkannt werden.



Abb. 7.1.3-4: QuickBird-Satellitenbild, Ausschnitt von Altstadt in Sanaa, bearbeitet mit Laplace-Operator, in allen vier Kanälen, *Image Add Back* null – Bild links, *Image Add Back* 20 – Bild Mitte, *Image Add Back* 40 – Bild rechts.

Nachdem die Ergebnisse mit den drei verschiedenen Kantenoperatoren ausgewertet worden sind, wird der Laplace-Operator für den Vergleich der drei verschiedenen Klassifikationen hinsichtlich der Form- und Lagegenauigkeit der Gebäude und für die visuelle Interpretation ausgewählt.

7.1.4 Ergebnisse der Vegetationsdetektion

Zur Erfassung und Charakterisierung des Vegetationsanteils innerhalb der Stadt Sanaa wurde der Vegetationsindex NDVI¹⁰ (Riechelmann, 2009) bestimmt, in ArcGis dargestellt und mit den Ergebnissen aus den Klassifikationen für die Klasse Vegetation verglichen.

Dabei konnte festgestellt werden, dass Sanaa zum überwiegenden Teil nur über als spärlich eingestufte Vegetation (siehe Unterabschnitt 6.3.6), mit einem NDVI zwischen 0,18 und 0,49, verfügt (Abb. 7.1.4-1). Einen nur geringen Flächenanteil nimmt dichtere Vegetation mit einem NDVI von 0,5 ein. Vegetation mit einem NDVI von 0,70 ist kaum zu finden.

Bei dem Vergleich der Vegetationsdetektion mit den Klassifikationsergebnissen erhält man Informationen über den Anteil an grüner Biomasse, der vorhanden sein muss, um von der Klassifikation erfasst und als Klasse Vegetation ausgewiesen zu werden. Es stellte sich heraus, dass dieser Anteil bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene geringer sein kann, als bei der Klassifikation auf Bildebene. Bei der erstgenannten ist zum Teil ein NDVI von 0,18 ausreichend, um als Vegetation erfasst zu werden. Bei der letztgenannten liegt der NDVI bei ca. 0,22. Bei der objektorientierten Klassifikation werden nicht einzelne Pixel sondern ganze Segmente klassifiziert, so dass Bereiche, mit einem nur sehr geringen NDVI als Vegetation erfasst werden. Der Anteil an Fläche, der als Vegetation innerhalb der Stadt ausgewiesen wird, ist bei der objektorientierten Klassifikation am höchsten.

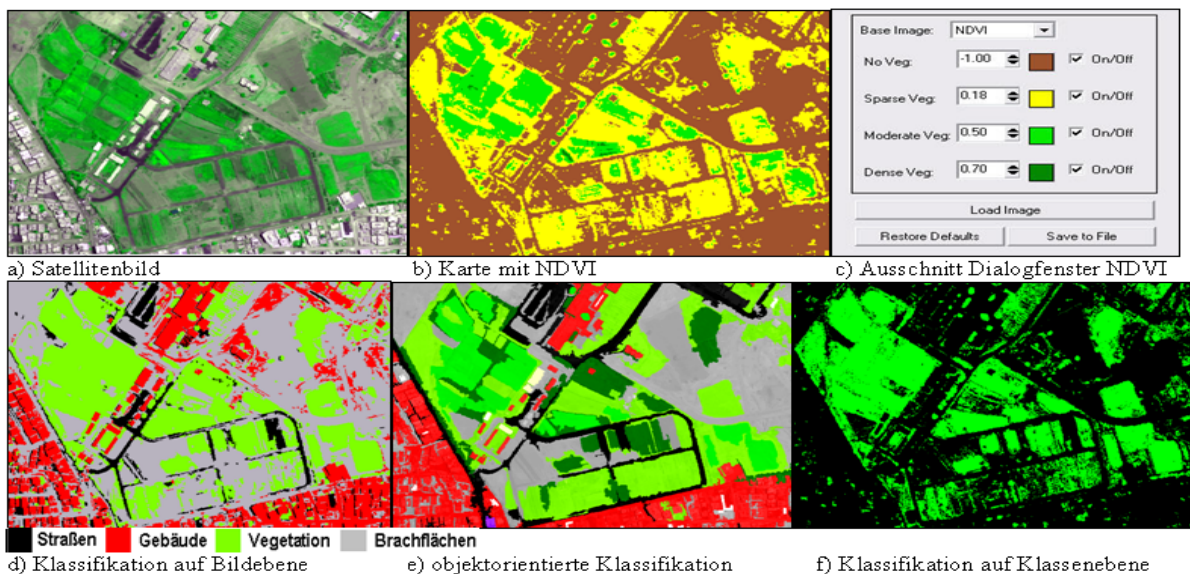


Abb. 7.1.4-1: Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Klassifikationsverfahren mit der Vegetationsdetektion. Eigene Darstellung.

¹⁰ NDVI = Normalized Differenced Vegetation Index

7.1.5 Ergebnisse der Klassifikationsverfahren und ihre Validierung

Die Ergebnisse aus den drei verschiedenen Klassifikationsverfahren (vgl. Unterabschnitt 6.2.2 und 6.2.3) werden für jede Klasse im Folgenden vorgestellt, visuell und anhand der Genauigkeitsanalyse miteinander verglichen. Dazu dienen das Satellitenbild, Luftbilder, Stadtkarten, die Ergebnisse aus den textur- und kantenorientierten Verfahren und der Vegetationsdetektion.

7.1.5.1 Klasse *Vegetation*

Der Vergleich mit dem vom Laplace-Operator bearbeiteten Satellitenbild zeigt, dass die Bäume und Baumgruppen in ihren Außengrenzen gut erfasst worden sind (Abb. 7.1.5.1-1, Bild links). Einschlüsse resultieren aus Wegen und Schatten. Auch kleine Wiesenflächen wurden klassifiziert.

Bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene werden viele einzelne, kleine Vegetationsflächen nicht erfasst (Abb. 7.1.5.1-1, Bild rechts). Dies trifft vor allem auf kleine Flächen mit lockerer und/oder trockener Vegetation zu (Abb. 7.1.5.1-2). Einzelne Pixel sind anderen Klassen, vor allem der Klasse *Brachflächen* und *Straßen* zugeordnet. Durch eine Nachbearbeitung werden kleine Flächen entfernt (siehe Unterabschnitt 6.2.4) und Lücken geschlossen (Abb. 7.1.5.1-3). Die Herstellergenauigkeit erhöht sich von 77% auf 79%. Die Nutzergenauigkeit liegt vor und nach der Nachbearbeitung bei beiden pixelbezogenen Klassifikationen bei bzw. fast bei 100% (siehe Anhang I, Tab. I.4). Nach der Nachbearbeitung ist die von der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene erfasste Vegetationsfläche mit 332,771 ha um 3,8% größer als die von der Klassifikation auf Klassenebene erfasste Fläche von 319,992 ha (Anhang II, Abb. II.1 und Tab. II.1).

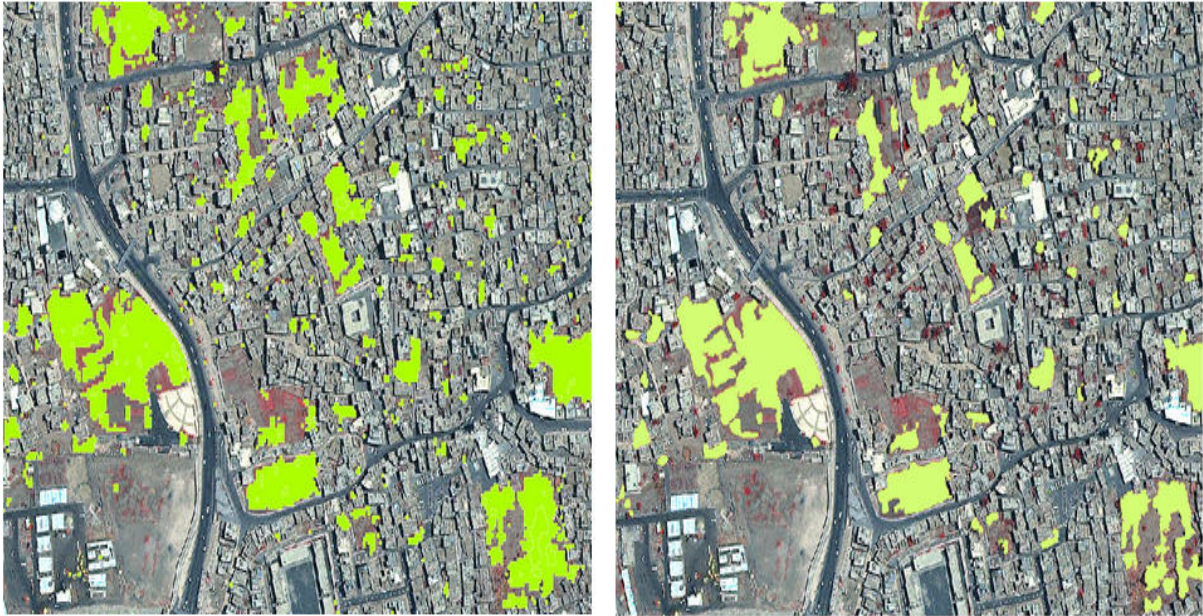


Abb.: 7.1.5.1-1: QuickBird-Aufnahme von Sanaa bearbeitet mit Laplace-Operator, *Image Add Back 40*, Vergleich der Klasse *Vegetation* bei den pixelbezogenen Klassifikationen auf Klassenebene (Bild links) und auf Bildebene (Bild rechts).



Abb. 7.1.5.1-2: Vergleich der Klasse *Vegetation* auf dem Satellitenbild (Bild links) und bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild rechts).

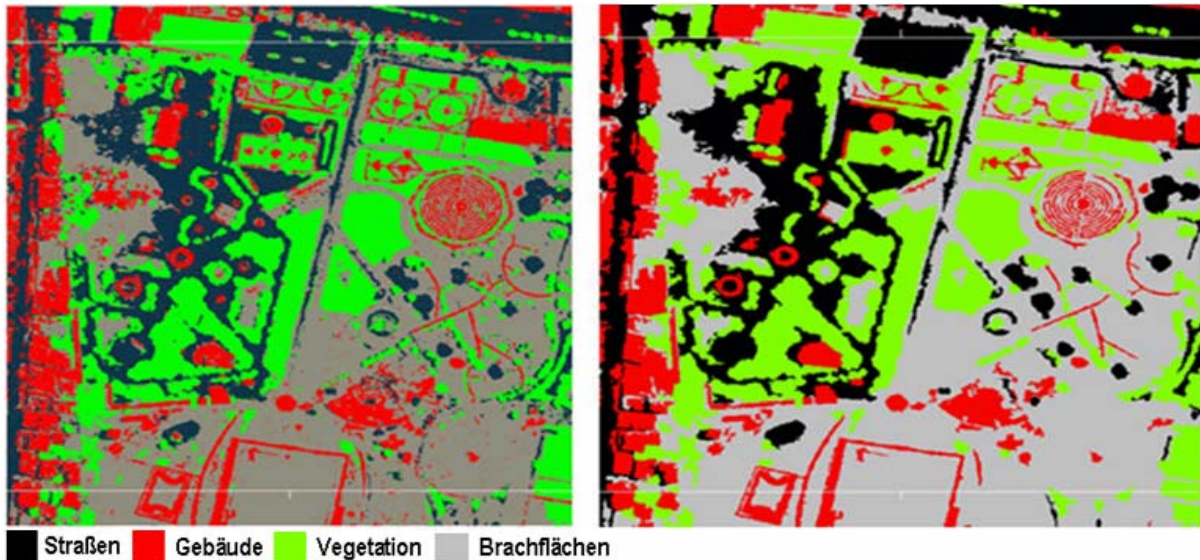


Abb.: 7.1.5.1-3: Vergleich der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene der QuickBird-Aufnahme vor und nach der Nachbearbeitung.

Beim Vergleich der objektorientierten Klassifikation mit den pixelorientierten Klassifikationsverfahren ist zu erkennen, dass sowohl mehr Fläche der Klasse *Vegetation* zugeordnet wird (Abb. 7.1.5.1-4) als auch Flächen mit *Vegetation* nicht von der Klassifikation erfasst werden (Abb. 7.1.5.1-5). Der Grund liegt in der im Rahmen der Segmentierung erfolgten Generalisierung durch Bildung homogener Objekte (Koch et al., 2003). Bei der objektorientierten Klassifikation werden die Flächen ohne Einschlüsse, als kompakte Einheit, wiedergegeben und Objekte werden mit einer geraden Linie abgegrenzt. Schatten von Bäumen haben hier im Gegensatz zu den pixelorientierten Verfahren keinen Einfluss auf die Klassifikation und stellen somit keinen Grund für Fehlklassifikationen dar.

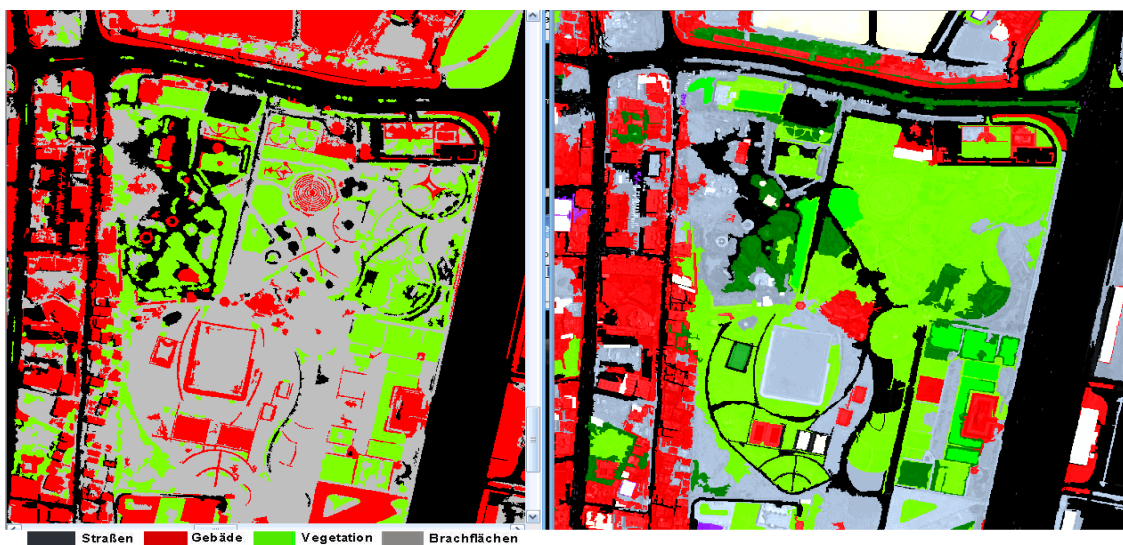


Abb. 7.1.5.1-4: Vergleich der Klasse *Vegetation* bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild rechts).

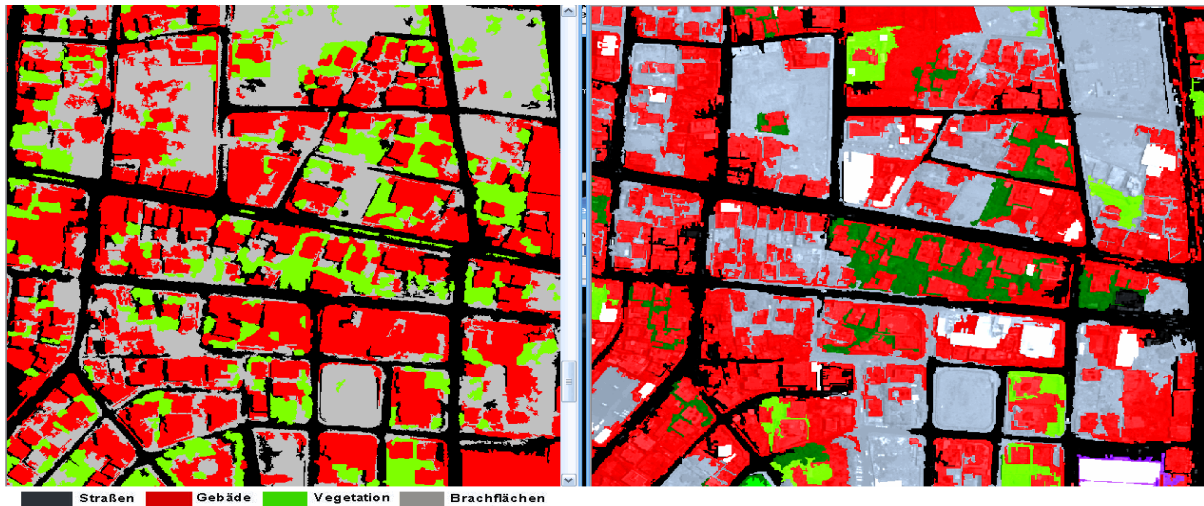


Abb. 7.1.5.1-5: Vergleich der Klasse *Vegetation* bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild rechts).

7.1.5.2 Klasse *Straßen*

Bei allen drei Klassifikationsverfahren sind die Haupt- und Nebenstraßen gut erfasst. Fehlklassifikationen müssen vor allem bei nicht oder wenig befahrenen Straßen festgestellt werden. Der Grund sind Ablagerungen aus Sand, Lehm etc., die ein anderes spektrales Reflektionsverhalten als Asphalt aufweisen (Abb. 7.1.5.2-1 und Abb.7.1.5.2-4). Diese Ablagerungen haben bei der objektorientierten Klassifikation den größten Einfluss, weshalb dort auch weniger Straßen als bei den pixelorientierten Verfahren erfasst wurden. Das beste Ergebnis für asphaltierte Straßen wurde bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene erzielt. Bei ihr sind allerdings die Straßenabgrenzungen am meisten ausgefranst.

Nicht asphaltierte Straßen werden nicht als *Straßen* erkannt und der Klasse *Gebäude* zugeordnet (Abb. 7.1.5.2-2 und Abb. 7.1.5.2-5). Dies kann daran liegen, dass sie aus einem Material bestehen, das ein anderes Spektralverhalten als Asphalt hat und von diesem keine Trainingsklassen erstellt wurden, da sonst auch die Gebäude als *Straßen* klassifiziert worden wären.

Die Sackgassen in der Altstadt werden von den verschiedenen Klassifikationsverfahren nicht erfasst. Außerhalb fällt das Ergebnis besser aus. Die Gründe sind weniger hohe Häuser, breitere und zum Teil asphaltierte Straßen.

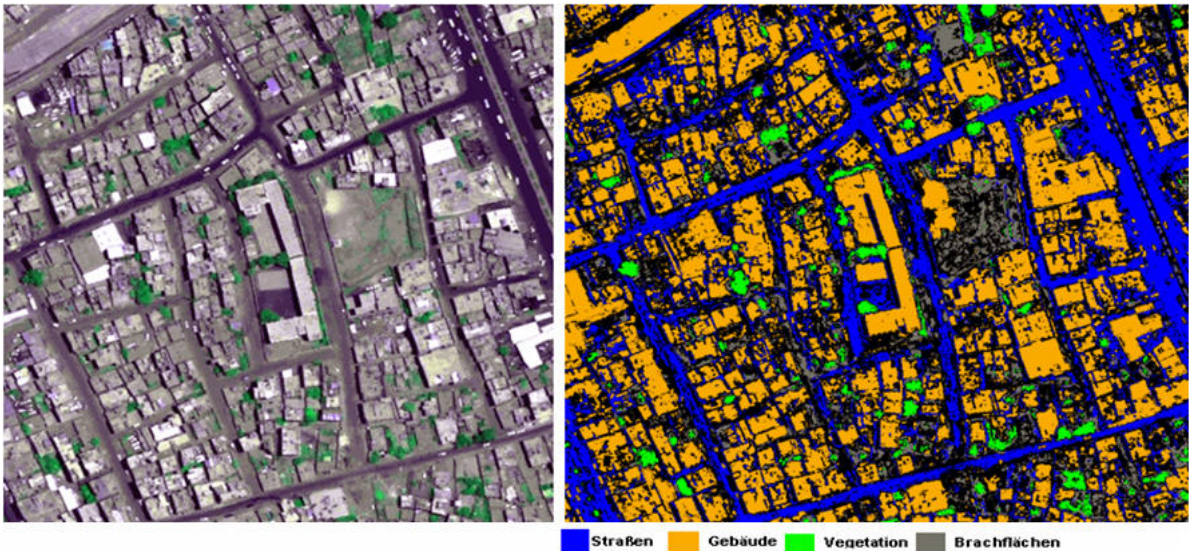


Abb. 7.1.5.2-1: Vergleich der Klasse *Straßen* bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene (Bild rechts) und auf dem Originalsatellitenbild (Bild links).



Abb. 7.1.5.2-2: Vergleich der Klasse *Straßen* bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild rechts) und auf dem Originalsatellitenbild (Bild links).

Bei den pixelorientierten Klassifikationsverfahren sind im Gegensatz zu der objektorientierten Klassifikation die einzelnen Fahrzeuge auf den Straßen zu erkennen. Durch die Nachbearbeitung werden diese Lücken zum Teil geschlossen (Abb. 7.1.5.2-3). Fehlklassifikationen, d.h. der falschen Klasse zugeordnete Flächen, entstehen bei den pixelorientierten Verfahren auch an Stellen, wo Gebäude Schatten werfen. Diese können durch eine Nachbearbeitung beseitigt werden. Die sich am Stadtrand auf den Brachflächen befindenden und der Klasse *Straßen* zugeordneten großen Steine bleiben auch nach einer Nachbearbeitung falsch klassifiziert, sind jedoch etwas geschrumpft. Bei der objektorientierten Klassifikation können diese Objekte durch eine manuelle Zuordnung zur richtigen Klasse zum Teil beseitigt werden. Durch die Nachbearbeitung konnte die Nutzergenauigkeit (UA, siehe

Anhang I, Tab. I.4) bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene von 75,00% auf 96,67% und auf Bildebene von 71,00% auf 77,00% erhöht werden. Die als *Straßen* erfasste Fläche liegt bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene um 130,574 ha (ca. 12,4%) höher als bei der Klassifikation auf Klassenebene (siehe Anhang II, Abb. II.1 und Tab. II.1)

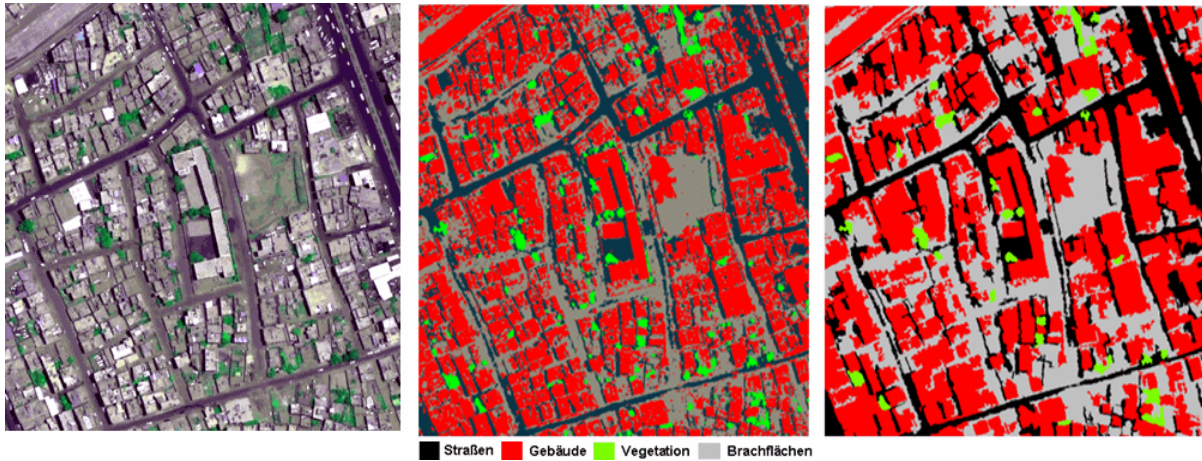


Abb. 7.1.5.2-3: Vergleich der Ergebnisse aus der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene vor (Bild links) und nach der Nachbearbeitung (Bild rechts).

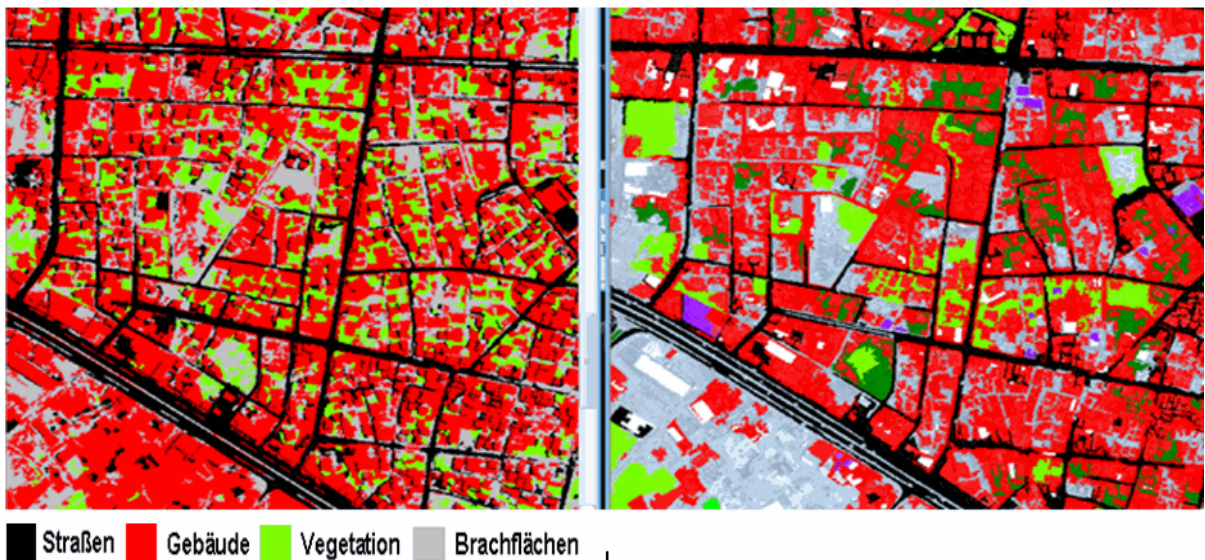


Abb. 7.1.5.2-4: Vergleich der Klasse *Straßen* bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (nachbearbeitet), (Bild links) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild rechts).

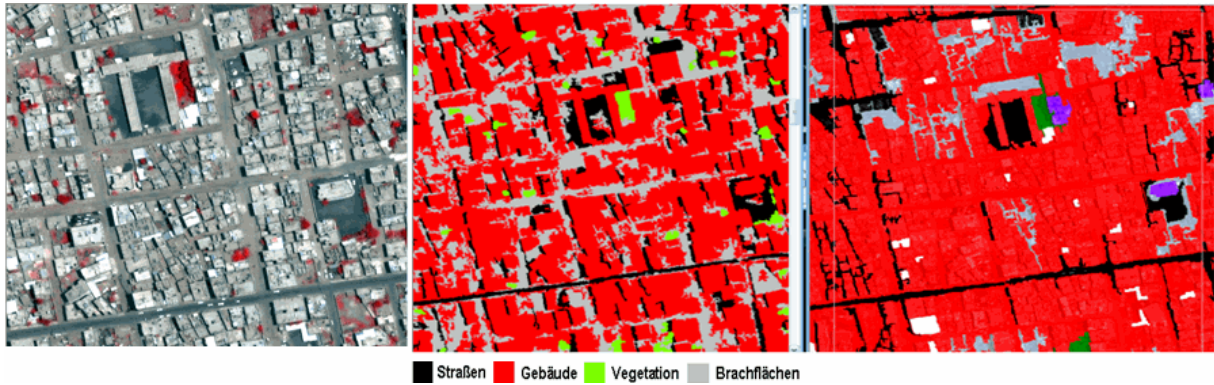


Abb. 7.1.5.2-5: Vergleich der Klasse *Straßen* bei der pixelbezogenen Klassifikation, auf Bildebene nachbearbeitet (Bild Mitte) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild rechts).

Ergebnisse der Nachbearbeitung der Linien (siehe 6.2.4 b)

In Großbereich C wurden versuchsweise, einige Straßen einer zusätzlichen Generalisierung unterzogen. Abb. 7.1.5.2-6 zeigt die Klasse Straßen von der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene zu Beginn der Nachbearbeitung als Fläche (Bild a), nach der Umwandlung als Linie (Bild b), nach der Generalisierung (Bild c) und als Vergleich vor und nach der Generalisierung zusammen in einem Bild (Bild d). Zu erkennen ist die deutliche Glättung der Straßenabgrenzungen nach dem Generalisierungsprozess (Bild c).

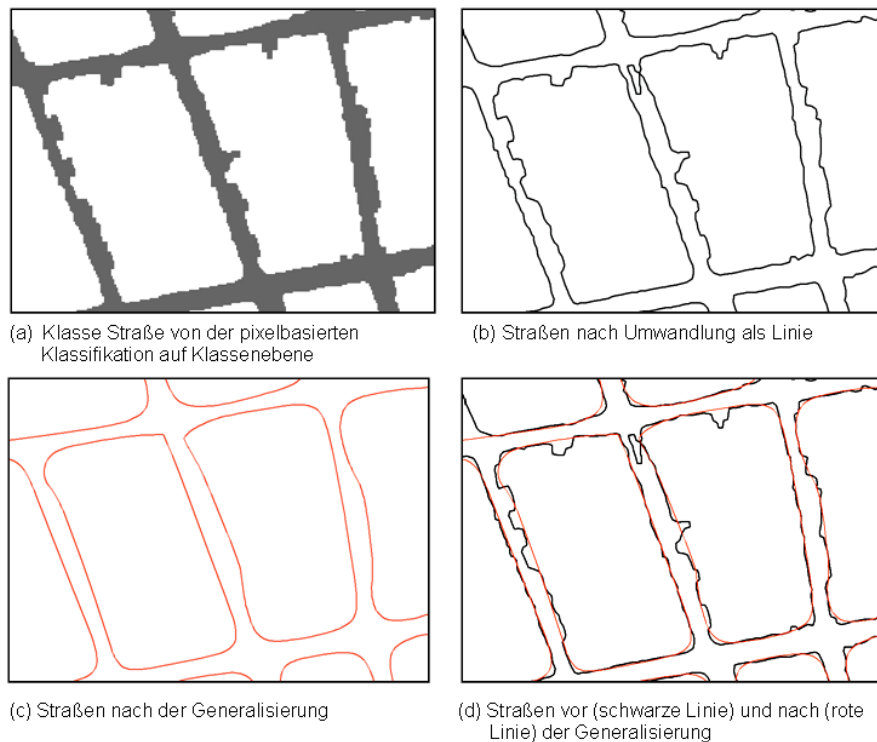


Abb. 7.1.5.2-6: Ablauf des Generalisierungsprozesses der Klasse *Straßen* von der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene.

7.1.5.3 Klasse *Gebäude*

Im Allgemeinen werden einzeln stehende Gebäude gut klassifiziert (Abb. 7.1.5.3-1). Dies trifft vor allem dann zu, wenn folgende Bedingungen gegeben sind:

- die Gebäude und die an sie angrenzenden Flächen unterscheiden sich stark in ihrem Reflektionsverhalten,
- die Gebäude haben ein großes Dach,
- die Dächer sind weiß gestrichen
- auf den Dächern befinden sich keine Objekte wie z.B. Wasserbehälter oder Satellitenantennen,
- es handelt sich um neu gebaute Häuser, da dort noch keine oder nur geringe Ablagerungen von Sand und Lehm zu finden sind.

Da in der Altstadt diese eben genannten Bedingungen nicht gegeben sind, werden die Gebäude dort nur ungenügend klassifiziert. Anhand eines visuellen Vergleichs können in der Altstadt die meisten Fehlklassifikationen festgestellt werden. Bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene werden häufig Flächen, die zur Klasse *Gebäude* gehören nicht als Gebäude erfasst. Bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene werden dagegen Flächen, die zu anderen Klassen gehören der Klasse *Gebäude* zugewiesen. Die meisten falsch zugeordneten Pixel kommen aus der Klasse *Brachflächen* (Abb. 7.1.5.3-2 und Abb. 7.1.5.3-3).

Auch bei der objektorientierten Klassifikation gibt es, besonders in dem ältesten Teil der Stadt, viele Falschzuweisungen. In Abb. 7.1.5.3-4 ist zu erkennen, dass die nur durch Gassen voneinander getrennten Gebäude als eine zusammenhängende Fläche klassifiziert werden. Abb. 7.1.5.3-5 zeigt die um mehrere Häuser liegenden und nicht geschlossenen Segmentgrenzen. Die der Klasse *Gebäude* falsch zugewiesenen Flächen kommen vor allem aus den Klassen *Straßen* und *Brachflächen*.

Auch bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene gibt es Flächen, die der Klasse *Gebäude* fälschlicherweise zugeordnet werden. Diese Gebiete liegen jedoch außerhalb der Altstadt. Es handelt sich dabei meist um Flächen auf denen sich Sand oder liegen gebliebenes Baumaterial befindet oder um weiß lackierte Autos. Die Nachbearbeitung (siehe dazu Unterabschnitt 6.2.4) für die beiden pixelbasierten Klassifikationsverfahren bringt nicht das gewünschte Ergebnis. Durch die Funktion *Eliminate* werden viele Gebäude entfernt. Dies liegt sicherlich daran, dass sich auf den Dächern Staub und andere Dinge, wie z.B. Satellitenantennen, Wasserbehälter etc. befinden und dadurch die zu klassifizierende Dachfläche klein ist. Durch

die Funktion *Dilatation* können diese Flächen ausgeweitet werden. Die dann anschließende Eliminierung aller Objekte ≤ 400 Pixel erhöht die Klassifikationsgenauigkeiten.

Durch die Nachbearbeitung der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene können nur die Unterlassungsfehler reduziert werden. Die Nutzergenauigkeit steigt von 86,11% auf 96,50%. Auch bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene nimmt durch die Nachbearbeitung die Anzahl der richtig klassifizierten Pixel zu und die Nutzergenauigkeit steigt von 82,00% auf 89,00%. Auch die Herstellergenauigkeit steigt von 90% auf 97%. Die der Klasse *Gebäude* zugeordnete Fläche bei der Klassifikation auf Bildebene nach der Nachbearbeitung liegt mit 110,781 ha um 6,5% höher als bei der Klassifikation auf Klassenebene (Abb. II.1, Tab. II.1).

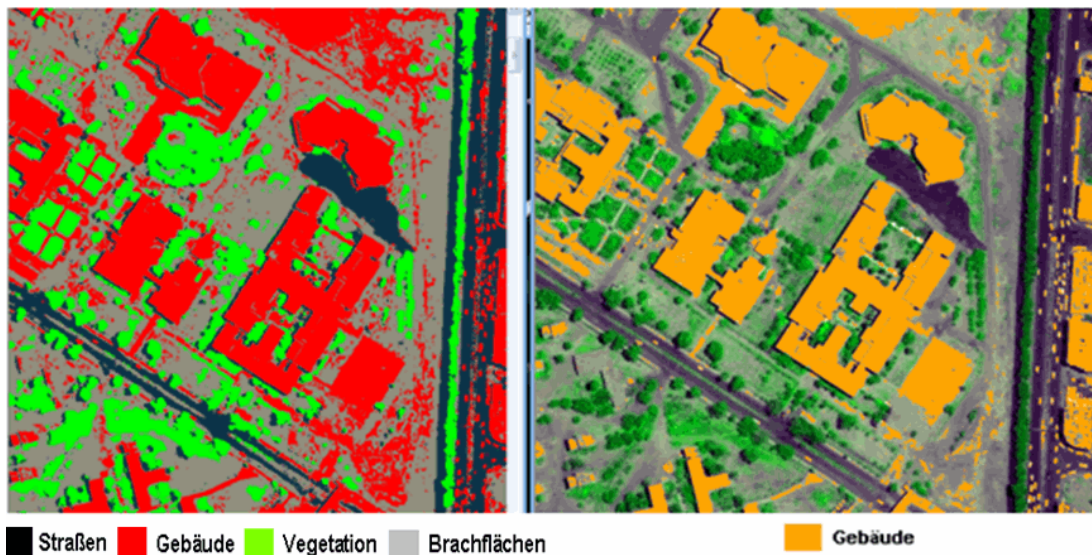


Abb. 7.1.5.3-1: Vergleich der Klasse *Gebäude* bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und auf Klassenebene (Bild rechts), beide vor der Nachbearbeitung.

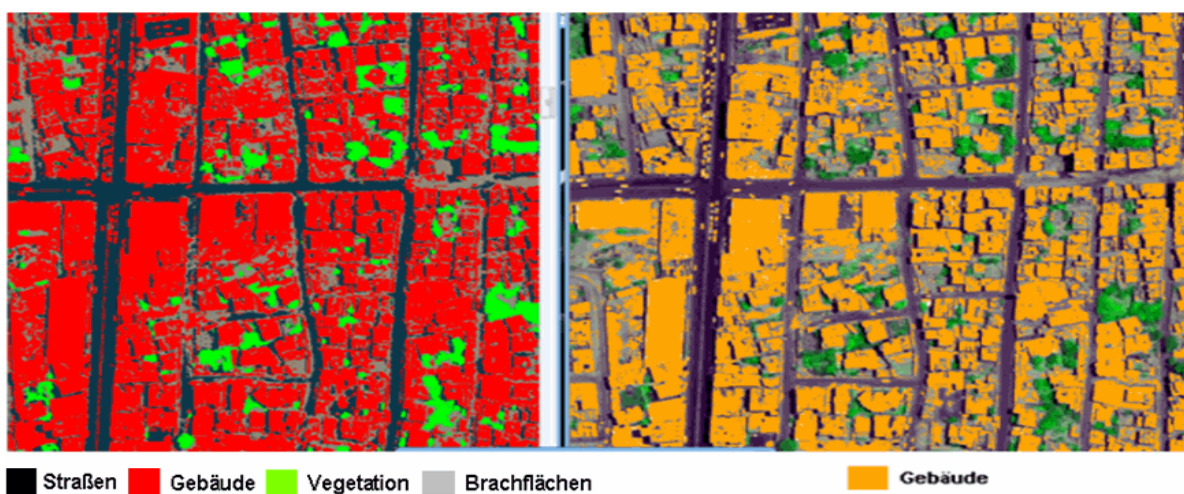


Abb.7.1.5.3-2: Vergleich der Klasse *Gebäude* bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und auf Klassenebene (Bild rechts), beide vor der Nachbearbeitung.

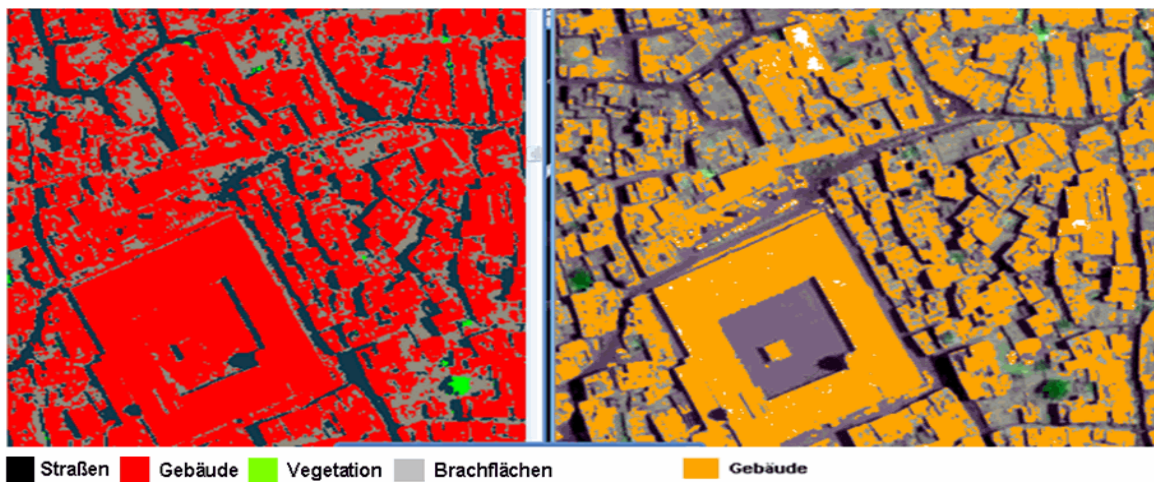


Abb. 7.1.5.3-3: Vergleich der Klasse *Gebäude* bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene (Bild links) und auf Klassenebene (Bild rechts), beide vor der Nachbearbeitung.

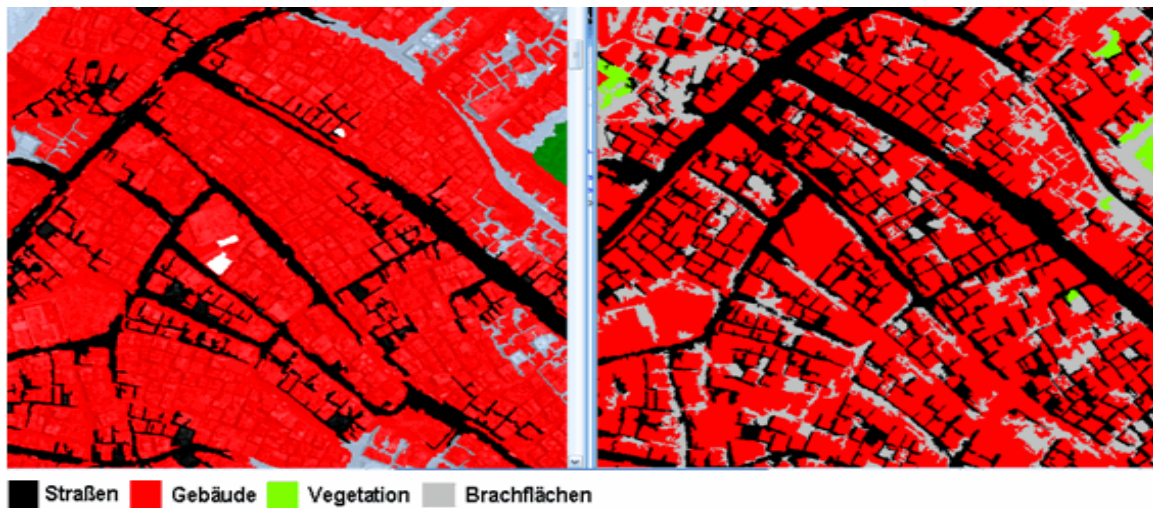


Abb. 7.1.5.3-4: Vergleich der Klasse *Gebäude* bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene, nachbearbeitet (Bild rechts) und bei der objektorientierten Klassifikation (Bild links).

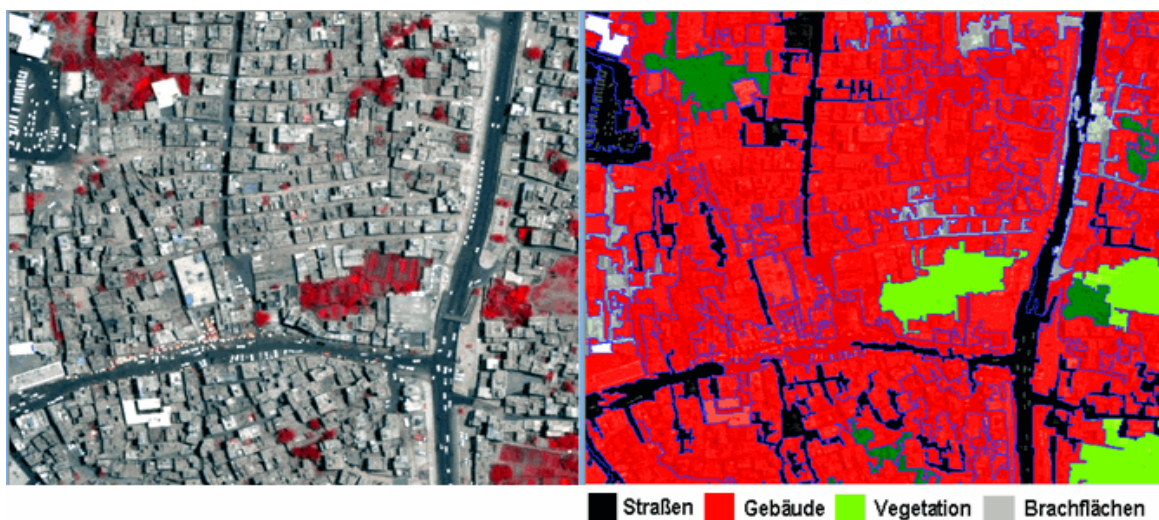


Abb. 7.1.5.3-5: Vergleich der Klasse *Gebäude* bei der objektorientierten Klassifikation, nachbearbeitet (Bild rechts) und zum Originalsatellitenbild (Bild links).

7.1.5.4 Klasse *Brachflächen*

Die zu der Klasse *Brachflächen* gehörenden Spiel- und Sportplätze, sowie Friedhöfe werden bei den pixelorientierten Verfahren oft nicht oder mit nur wenigen Pixels als Brachfläche klassifiziert (Abb.7.1.5.4-1 und 7.1.5.4-2). Dies lässt sich damit erklären, dass Trainingsgebiete nur auf Freiflächen aufgestellt wurden, die aus kleinen und größeren Steinen, wie Kies, bestehen. Der Grund besteht in den Ablagerungen von Sand auf den Spiel- und Sportplätzen und Betonplatten, mit denen viele Gräber abgedeckt werden, die ähnlich wie die Dächer der Gebäude reflektieren.

Bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene erscheinen die *Brachflächen* als viele kleine vereinzelt liegende Flächen, nicht so bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene. Die zu der Klasse *Brachflächen* gehörenden Gebiete sind zu einer größeren Fläche zusammengefasst. Dieses Erscheinungsbild wird durch die Nachbearbeitung noch verstärkt. Die Nutzergenauigkeit unterscheidet sich bei beiden pixelorientierten Klassifikationen nicht viel voneinander. Sie liegt vor der Nachbearbeitung bei 85,00% und danach bei 90,00% auf Bildebene bzw. bei 90,5% auf Klassenebene.

Spiel- und Sportplätze, sowie Friedhöfe werden auch bei der objektorientierten Klassifikation nicht identifiziert. Sie wurden dann manuell der richtigen Klasse zugeordnet. Danach erscheinen die *Brachflächen* als eine zusammenhängende Fläche. Es sind noch weniger Einschlüsse als bei der bildbezogenen Klassifikation vorhanden.

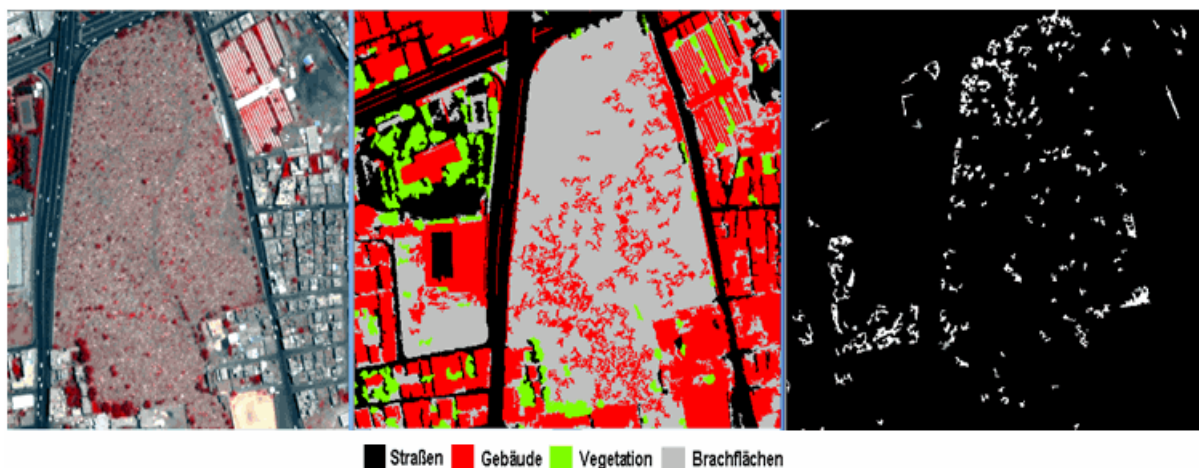


Abb. 7.1.5.4-1: Vergleich eines Friedhofs bei den pixelorientierten Klassifikationsverfahren, nachbearbeitet (Bild Mitte – Bildebene), (Bild rechts – Klassenebene) (im Hintergrund ist das Fenster in schwarzer Farbe und nicht wie in den anderen Abbildungen das Originalsatellitenbild) mit dem Originalsatellitenbild (Bild links).

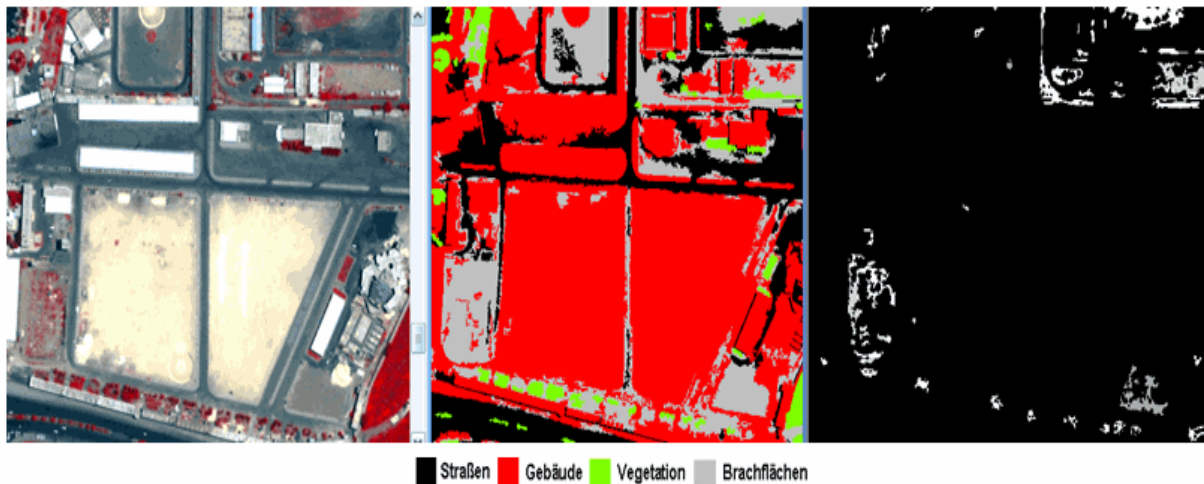


Abb. 7.1.5.4-2: Vergleich von Sportplätzen bei den pixelorientierten Klassifikationsverfahren, nachbearbeitet (Bild Mitte – Bildebene), (Bild rechts – Klassenebene) mit dem Originalbild (Bild links).

7.1.6 Anwendung der Entscheidungsregeln

Nach Vorstellung der bisherigen Ergebnisse aus den textur-, kantenorientierten und Klassifikationsverfahren sollen, nach den in Abschnitt 6.4 aufgestellten Regeln, die Entscheidungen getroffen werden, welche Informationen in die Erstellung des Stadtmodells eingehen werden. Folgende Entscheidungen wurden getroffen.

- 1.) Das DGM wird nicht käuflich erworben, sondern selbst erstellt. Dazu werden die Konturlinien abdigitalisiert. Das weitere Vorgehen ist in Unterabschnitt 6.3.5 beschrieben. Die Gebäudehöhen werden von der Stockwerksanzahl abgeleitet, siehe Abschnitt 6.5.
- 2.) Nach einem visuellen Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Klassifikationen mit dem bearbeiteten Satellitenbild und der Grundrisskarte wird entschieden, die objektbasierte Klassifikation für die Erstellung des Stadtmodells nicht zu nehmen, da Lage und Form der meisten Gebäude nicht mit denen auf dem mit textur- und kantenorientierten Verfahren bearbeiteten Satellitenbild und der Grundrisskarte übereinstimmen.
- 3.) Die Gesamtgenauigkeit (OA) und der Kappa-Koeffizient (KK) liegen bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene mit 95,88% höher als bei der Klassifikation auf Bildebene mit 87,67%. Auch die Nutzer- und Herstellergenauigkeit (UA und PA) für die einzelnen Klassen zeigen im Fall der Klassifikation, bei der jede Klasse einzeln klassifiziert wurde, die höchsten Werte (Anhang I, Tab. I.3 – Tab. I.5).
- 4.) Für die Erstellung der Stadtkarten sind nur bestimmte Klassen erforderlich. Dazu zählen: die Klasse *Gebäude*, die Klasse *Straßen* und die Klasse *Vegetation*. Auf die

Klasse *Brachflächen* kann verzichtet werden, da sich die zu dieser Klasse gehörenden Flächen hauptsächlich am Rand der Stadt bzw. des Untersuchungsgebietes befinden. Außerdem ist nicht gewährleistet, dass Nutzung bzw. Bodenbedeckung der Flächen, die in dieser Klasse zusammengefasst wurden, unverändert geblieben sind.

7.1.7 Visuelle Auswertung des von den Klassifikationsergebnissen erstellten 2D-Stadtmodells

Die von den Ergebnissen aus der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene erstellte Stadtkarte wurde, wie auch das visuell ausgewertete Satellitenbild, in drei Großbereiche unterteilt (siehe dazu Abschnitt 6.6 -Visuelle Bildinterpretation). Diese werden durch verschiedene Farbtöne voneinander abgegrenzt, die in ihrer Sättigung von Bereich A, über B hin zu C abnehmen und heller erscheinen. Für die Darstellung der Vegetation wurde in allen Bereichen einheitlich die grüne Farbe gewählt.

Das traditionelle Zentrum von Großbereich A, der Sūq, erhält mit einem dunklen Rot seine eigene Farbgebung. Dadurch soll seine ehemalige Bedeutung in der traditionellen orientalischen Altstadt kenntlich gemacht werden. Der Sūq wird von den Zubringerstraßen erschlossen. Diese sind von der Klassifikation gut erfasst worden. Sie werden, wie das gesamte Straßennetz, in Bereich A in schwarzer Farbe dargestellt. Die kleineren Straßen und Sackgassen in der Altstadt sind nicht zu erkennen. Die bebaute Fläche erscheint in roter Farbe. Dabei können die Funktionen der einzelnen Gebäude, wie z.B. Schule oder Moschee, nicht abgeleitet werden. Die Freiflächen mit Vegetation, wurden von der Klassifikation als *Vegetation* erfasst und in dem Stadtmodell in grüner Farbe wiedergegeben. Sandige Flächen, wie Spiel- und Sportplätze wurden als *Brachflächen* klassifiziert und werden somit nicht in dem Modell dargestellt. In Großbereich B und C sind alle asphaltierten Straßen und Gassen von der Klassifikation erfasst wurden.

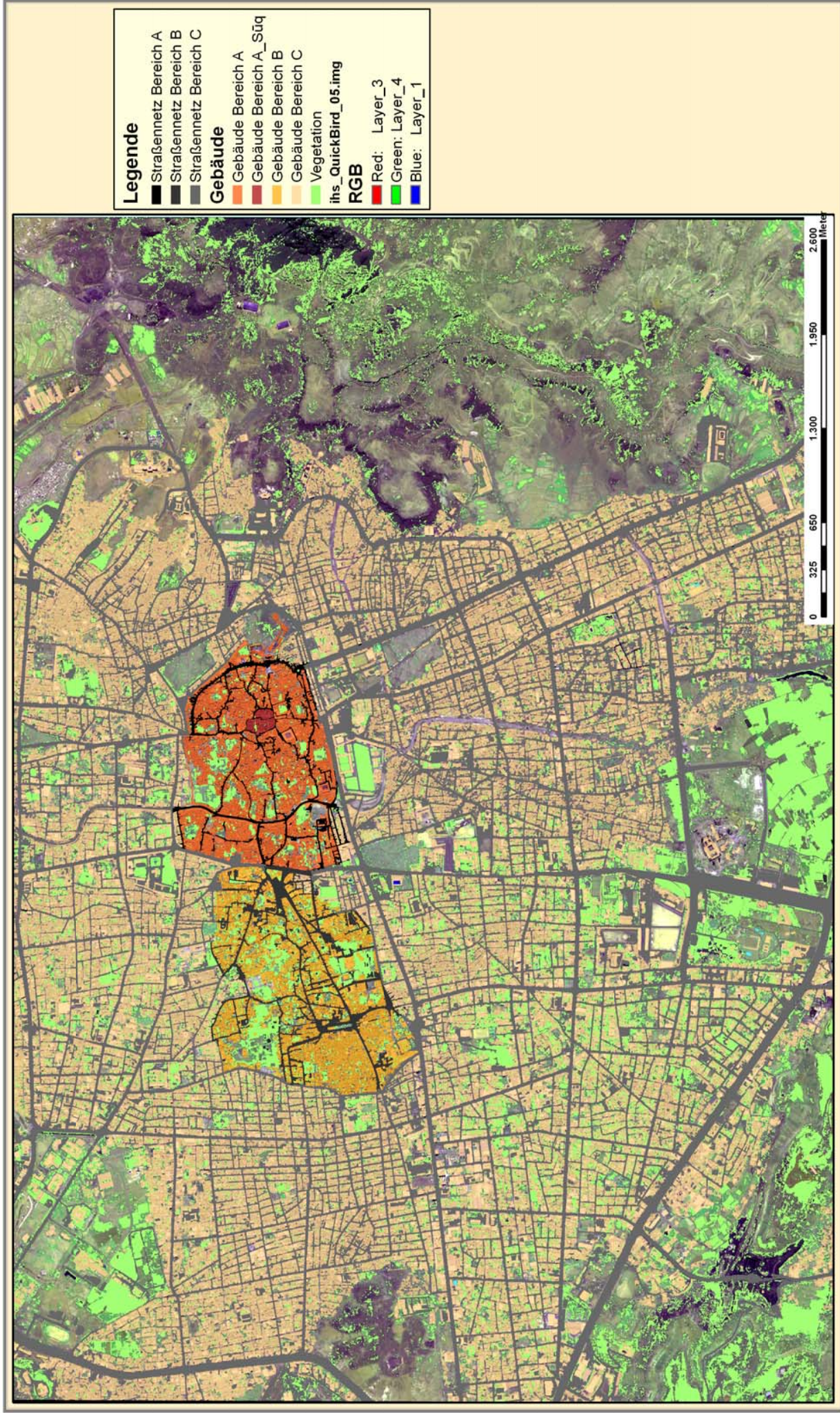


Abb. 7.1.7-1: Satellitenbildkarte erstellt aus den pixelbezogenen Klassifikationsergebnissen auf Klassenebene.

7. 2 Ergebnisse der visuellen Interpretation der Satellitenbilddaten

7.2.1 Kenndaten der Interpretation

Die nachfolgend aufgelisteten Objekte haben charakteristische Merkmale, anhand derer sie der Interpret auf dem Satellitenbild erkennen kann.

Bebaute Flächen:

1- Moscheen:

- a- **Form:** fast alle Moscheen sind quadratisch oder rechteckig
- b- **Material und Farbe:** die Dächer sind aus Beton und in weißer Farbe
- c- **Struktur:** eine Moschee hat ein oder mehrere Minarette, eine oder mehrere Kuppeln, Ausrichtung nach Mekka (= Nordwesten)

2- Schulen :

- a- **Form:** die meisten Schulen entsprechen folgender Form: L, Г, ⊥ und Π, so dass die Schule einen Hof innerhalb einer Mauer hat
- b- **Material:** die Dächer sind aus Beton
- c- **Höhe:** mehrgeschossig

3- Industriegebäude:

- a – **Form:** sind groß und breit
- b – **Material:** ihre Dächer sind meistens aus Blech

4- öffentlichen Gebäude:

- a – **Form:** haben unterschiedliche Größe und Formen
- b – **Material:** Dächer können aus Beton oder aus anderen Materialien bestehen, abhängig von der Lage und dem Zeitpunkt des Baus

5- Wohnhäuser:

- a – **Form:** zeigen eine dichte oder lockere Bebauung, mit oder ohne Garten
- b – **Material und Farbe:** sind meist aus Beton, in grauer oder weißer Farbe, andere Materialien sind Erde und/oder Blech
- c – **Höhe:** ist je nach Lage verschieden, in der Altstadt sind es mind. 2 Etagen, am Stadtrand und in den Armenvierteln sind sie eingeschossig

Freiflächen:

- 1- Die Bäume unterscheiden sich von den Wiesen hinsichtlich der Farbintensität. Sie erscheinen in einem dunkleren Grün.
- 2- Ackerflächen werden bewirtschaftet oder liegen brach. Dies ist zu erkennen an den eventuell vorhandenen Ackerfurchen und der Bewässerung.
- 3- Die Farben von Spiel- und Sportflächen sind grün oder sandfarben. Sie ändern sich entsprechend der Nutzungsintensität. Bei häufiger Nutzung erscheinen die Flächen heller.

Straßen:

- 1- **Breite:** sind mehr- oder einspurig, Fahrbahninseln zwischen den Spuren
- 2- **Material:** bestehen aus Sand, Pflastersteinen oder Asphalt
- 3- **Funktion:** Haupt- und Nebenstraßen, Sackgassen, Stadtring oder die Straße, die sich in einem offenen Kanal befindet. Der Kanal wird seiner eigentlichen Zweckbestimmung entsprechend nur kurzzeitig in der Regenzeit genutzt, um das Regenwasser aus der Stadt heraus zu leiten.

7.2.2 Visuelle Auswertung

7.2.2.1 Großbereich A: Altstadt, Kernbereich

a) Straßen

In der Karte 7.2.2-1 sind die, die Altstadt erschließenden Durchgangsstraßen, mit braunen Linien gekennzeichnet. Sie führen von den ehemaligen Stadttoren (in Abb. 7.2.2.1-1 mit Nummern gekennzeichnet) zu dem Altstadtzentrum. Dort befindet sich der große Sūq, ehemaliger Mittelpunkt des Groß- und Einzelhandels und des Handwerks, sowie die Freitagsmoschee. Von Bāb al Yemen (Nr. 1), südlich vom Zentrum, geht eine relativ schmale und nur zu Beginn asphaltierte Straße aus. Auf ihrem weiteren Weg hin zum Zentrum besteht sie, wie die meisten Straßen in der Altstadt, aus Pflastersteinen. Es ist eine Einkaufstraße mit vielen kleinen Geschäften, die nicht von Autos befahren wird.

Vom ehemaligen Stadttor Bāb As-Salam (Nr. 2) führt eine breite, asphaltierte Straße, entlang der alten Stadtgrenze, von Süden Richtung Norden. Auch sie wird nicht von Autos befahren, ausgenommen sind die Lieferfahrzeuge. Von dieser Straße gehen

mehrere, schmalere, gepflasterte Straßen zum Markt hin ab. Eine weitere, breite, von Autos befahrene Straße führt nach Süden und kreuzt sich mit der Straße, die von Bāb al-Yemen zum Markt führt.

Die von Bāb el Qa'sr (Nr. 3) ausgehende Straße ist mit dem Auto befahrbar, was jedoch nur selten getan wird. Die meisten Sūqbesucher stellen ihr Auto am Anfang der Straße auf einem Parkplatz ab.

Von Bāb Shu'ūb (Nr. 4) führt eine relativ breite, von Autos befahrene, gepflasterte Straße von Norden Richtung Süden bis kurz vor dem Sūq. Danach teilt sie sich in mehrere schmale, nur von Fußgängern genutzte, zum Markt führende Straßen, auf. Die große Straße ist zu beiden Seiten von Geschäften gesäumt.

Weitere Durchgangsstraßen gehen von Bāb el Sabah (Nr. 5), Bāb el Shqa'dyf (Nr. 6) und Bāb Khu'zma'h (Nr. 7) aus und treffen in östlicher Richtung auf die Kanalstraße. Von dort führen mehrere, schmale von Autos befahrene Straßen zum Sūq. Die vom Westtor ausgehenden Gassen stellen die Verbindung zwischen den modernen Geschäftsvierteln im Westen und den traditionellen Einkaufsmöglichkeiten im Osten her.

Neben den beschriebenen großen Straßen, gibt es weitere kleinere Straßen, die zum Sūq führen und in der Abb. 7.2.2.1-1 als Gassen mit weißer Linie gekennzeichnet wurden. Eine breite, viel befahrene Straße liegt westlich des Stadtkerns, in Nord-Südrichtung und ist in Abb. 7.2.2.1-1 mit einer roten Linie und blauem Rahmen gekennzeichnet. Sie befindet sich in einem Wadibett, das in der Regenzeit, für ein paar Stunden oder Tage im Jahr, zur Ableitung des Regenwassers aus der Stadt genutzt wird. Die für die orientalische Altstadt typischen Sackgassen stellen die Verbindung der einzelnen Wohnhäuser mit dem Quartierszentrum und den größeren Sammelstraßen her.

b) Bebaute Flächen

Die Wohnhäuser der Altstadt zeigen eine dichte Bebauung mit unterschiedlichen, mindestens aber zwei Etagen. Die Anordnung der Häuser ist unregelmäßig, besonders innerhalb von Gebäudekomplexen. Der nordwestliche Teil der Altstadt ist durch eine lockere Bebauung gekennzeichnet. Die vielfach jüngeren Wohnviertel zeigen eine regelmäßige Struktur.

Innerhalb der Altstadt findet man keine Fabrikgebäude, jedoch kleinere Handwerksbetriebe, die sich hauptsächlich um den Sūq herum angesiedelt haben.

Neben der Freitagsmoschee im Stadtkern gibt es viele weitere, kleinere Moscheen in den Wohnvierteln. Das besondere der Moscheen in der Altstadt sind die etwas längeren Minarette, die dem Muezzin zum Gebetsaufruf dienen. Heute werden Lautsprecher eingesetzt, die es erlauben, die Minarette weniger hoch zu bauen. Außerdem dienten sie der Orientierung der Bewohner und Besucher z.B. auf der Suche nach den Märkten.

Innerhalb der ehemaligen Stadtmauer gibt es sechs öffentliche Schulen, die die Schüler von der ersten bis zur zwölften Klasse unterrichten. Sie sind in dem äußeren Altstadtbereich relativ gleichmäßig verteilt angeordnet. Neben den staatlichen gibt es einige Privat- und Sprachschulen. Im südwestlichen Teil, am Kanal, ist ein Freilufttheater erbaut worden. Das einzige öffentliche Krankenhaus befindet sich direkt im Zentrum, westlich vom Sūq und ist auf den von Westen und Norden kommenden Durchgangsstraßen gut zu erreichen. Im Osten, am Rand der Altstadt, liegen auf einer Erhebung die Gebäudekomplexe der Zitadelle.

c) Freiflächen

Innerhalb der Altstadt gibt es den größten Flächenanteil an Gärten. In ihnen wird hauptsächlich Gemüse angebaut. Die meisten Gärten liegen westlich vom Stadtzentrum und sind größer als die östlich gelegenen. Die Gärten werden mit Wasser aus dem sich in jedem Wohnquartier befindenden Brunnen bewässert. Ist dieses aufgebraucht, liegt der Garten trocken.

Bäume gibt es in der Altstadt weniger als in den anderen Stadtbereichen. Außer dem im nordwestlichen Teil der Altstadt, in einem Park gelegenen Spielplatz, gibt es keine weiteren, dafür eingerichteten Spiel- und Sportmöglichkeiten.

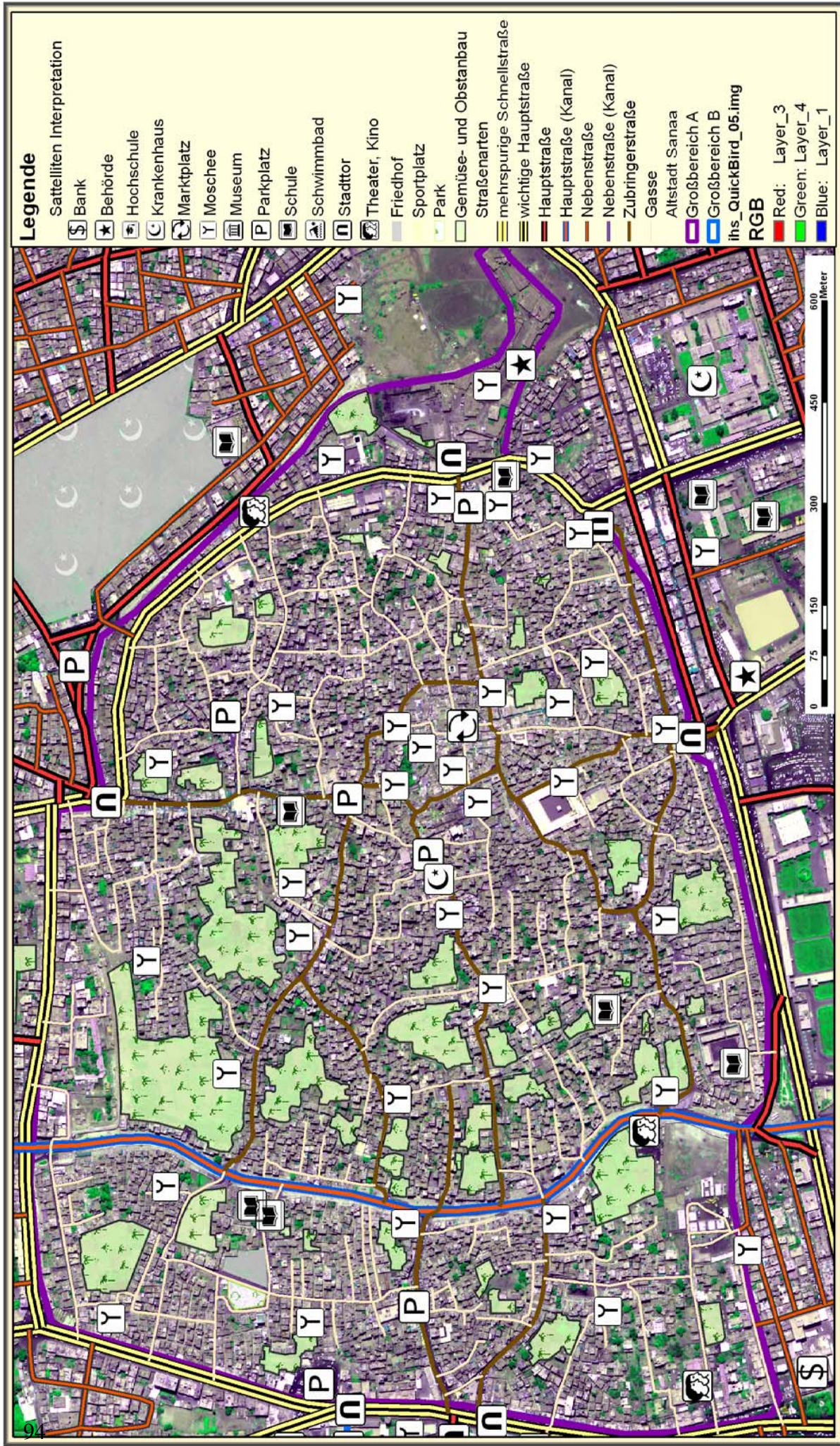


Abb. 7.2.2.1-1: Satellitenbildkarte von Großbereich A – Altstadt von Sanaa. Erstellt durch visuelle Interpretation der QuickBird-Satellitenbildaufnahme von 2005, Auflösung 0,6m.

Friedhöfe befinden sich normalerweise außerhalb der ehemaligen Stadtmauer. Östlich des zuvor beschriebenen Parks gibt es jedoch einen kleinen Friedhof. Eine freie, nicht genutzte Fläche liegt am Kanal, im südwestlichen Teil.

7.2.2.2 Großbereich B: ehemalige Garten- und Vorstadtquartiere

a) Straßen

Alle Straßen sind asphaltiert und entsprechen zumeist in ihrer Breite den Straßen in der Altstadt. Ausgenommen davon sind einige in der Abb. 7.2.2.2-1 in rot mit schwarzer Umrandung gekennzeichneten Straßen. Dazu zählen die vom Westen kommenden Beruit-Straße und die von der Ziraah-Straße, im Norden ihren Anfang nehmende und bis zur Zobairi-Straße führende namenlose Straße. Die unter dem Namen Jamal-Straße bekannte Durchgangsstraße ist nur in eine Richtung, nach Osten, befahrbar. Richtung Westen benutzt man die etwas weiter nördlich gelegene Straße. Beruit- und Jamal-Straße sind bevorzugte Handels- und Dienstleistungsstandorte.

Großbereiche A und B werden von der Ali-Abdul-Mughni-Straße getrennt. Sie ist in jede Richtung zweispurig befahrbar und verbindet den südlichen mit dem nördlichen Teil der Stadt. In der Abb. 7.2.2.2-1 ist sie in gelber Farbe mit schwarzer Umrandung gekennzeichnet.

Sackgassen findet man nur in dem ehemaligen Judenviertel. Dort sind die Straßen enger als in den anderen Bereichen von B. Dieses Wohnviertel wird von einer von West nach Ost führenden, etwas breiteren, aber wenig befahrenen Straße durchtrennt.

b) Bebaute Flächen

Der als B bezeichnete Stadtteil ist weniger dicht bebaut als die traditionelle Altstadt. Eine Ausnahme bildet das ehemalige Judenviertel. Südlich davon befindet sich ein großes staatliches Krankenhaus.

Seit den 80er Jahren findet ein Wegzug der sich in Bereich B, nach der Jemenitischen Revolution, angesiedelten Ministerien und Botschaften statt. Der Amtssitz des Ministerpräsidenten liegt im nördlichen Teil. Westlich davon befindet sich ein großer, zur Regierung gehörender Bezirk, auf dem sich zwei ehemalige Imam-Paläste befinden, die heute als Hotels genutzt werden.

Zwischen der großen Einkaufsstraße (Beruit- und Jamalstraße) und dem Westtor der Altstadt befinden sich Verwaltungs- und Militärbauten und ehemalige Imam-Paläste, die heute als Museum dienen.

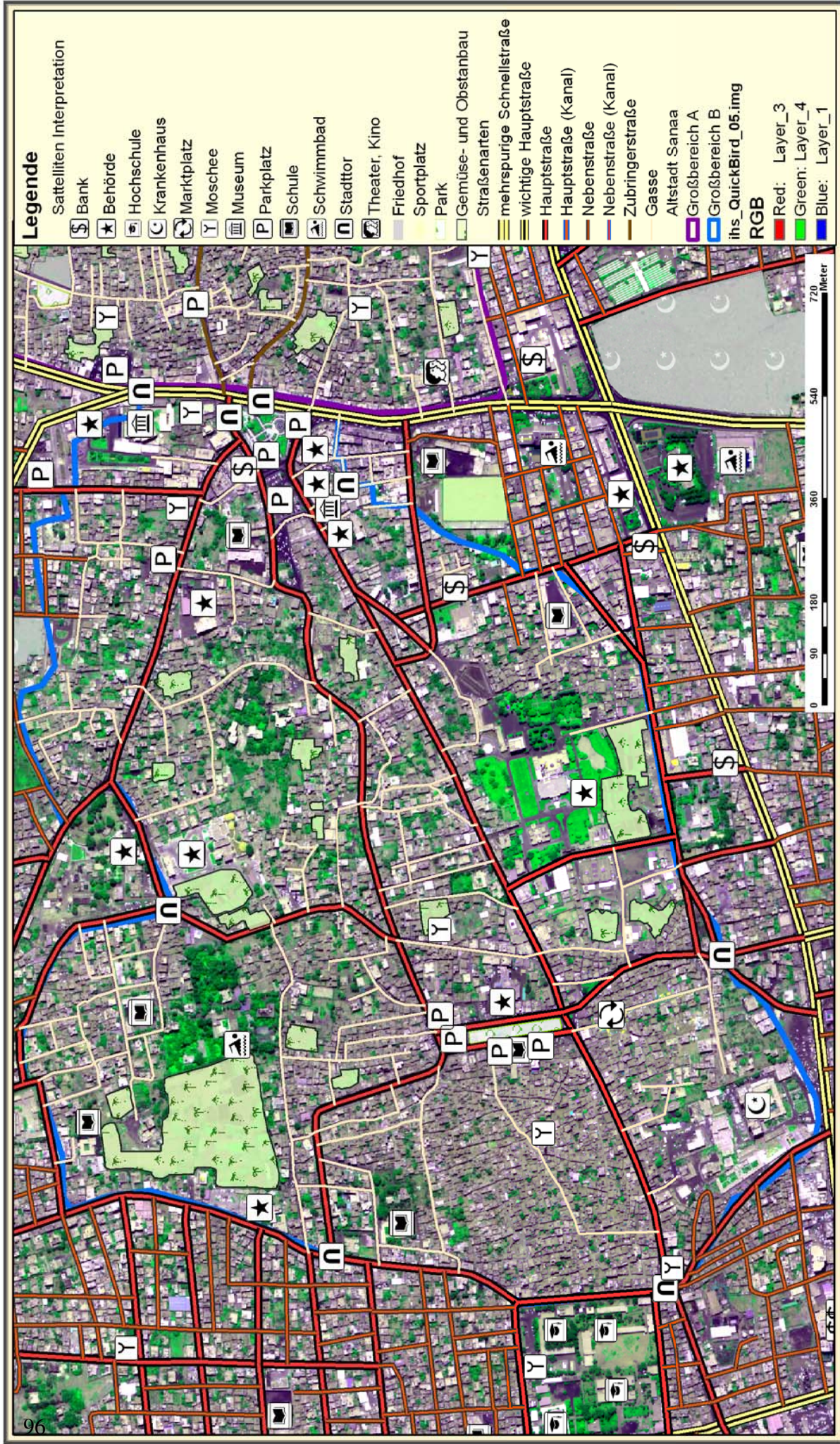


Abb. 7.2.2.2-1: Satellitenbildkarte von Großbereich B: ehemalige Garten- und Vorstadtquartiere von Sanaa. Erstellt durch visuelle Interpretation der QuickBird-Satellitenbildaufnahme von 2005, Auflösung 0,6m.

Südlich der Jamal-Straße und nördlich der Zobairi-Straße liegt der Palast der Republik, der dem Präsidenten von Jemen als Arbeitssitz dient.

Anhand der unter 7.2.1. aufgelisteten Merkmale können in diesem Bereich 5 Schulen und 5 Moscheen identifiziert werden. Die meisten kulturellen Einrichtungen, wie Museen, Theater und Kinos liegen im Grenzgebiet von Großbereich A und B.

c) Freiflächen

Im nordwestlichen Teil von B liegt ein Ackergrundstück, auf dem sich die ehemaligen Imam-Paläste befinden. Daneben gibt es acht weitere, kleinere, bewirtschaftete Ackerflächen. In Bereich B gibt es einige freie, nicht bebaute Gebiete. Diese und auch brachliegendes, nicht bewässertes Ackerland wurden in der Karte (Abb. 7.2.2.2-1) nicht ausgewiesen.

Sport- und Spielplätze existieren nicht. Gelegentlich wird aber das Brachland von Kindern und Jugendlichen zum Spielen genutzt. Einen Park (Al Qāa - Park) findet man östlich des ehemaligen Judenviertels (Al Qāa -Viertel).

7.2.2.3 Großbereich C: Stadterweiterungen nach 1970

a) Straßen

Die meisten im Bereich C sich befindenden Straßen sind asphaltiert und breiter als die Straßen in Großbereich A und B. Sie sind in einer regelmäßigen Struktur, schachbrettartig angeordnet und verlaufen dabei in nordsüdlicher und westöstlicher Richtung. In dieses Muster fügen sich einige diagonal verlaufende Straßen ein. Diese Straßen sind in der Abb. 7.2.2.3-1 an ihrer roten Farbe mit schwarzen Rahmen zu erkennen. Ausnahmen von dieser Struktur finden sich in den Unterschichtwohngebieten, wie z.B. im Osten der Stadt.

Um den westlichen und südlichen Teil der Stadt führt eine sechzig Meter breite (Sattin-) Straße. Sie ist aufgeteilt, in einen mittleren Bereich mit je drei Spuren in jede Richtung, wo man sehr schnell fahren kann und einen äußeren Bereich, der zweispurig ist und wo die Minibusse fahren und anhalten. In Abb. 7.2.2.3-1 ist sie mit gelber Farbe und schwarzem Rahmen gekennzeichnet. Ebenso die um den nördlichen und östlichen Teil der Stadt führende fünfundvierzig Meter breite Straße (Berlinstraße), mit vier Spuren in jede Richtung. Die Verbindung zwischen ihr und der Sattinstraße wird von der Taizstraße, die in nord-südlicher Richtung verläuft, hergestellt.

Durch den Bereich C verlaufen mehrere Straßen, die die Altstadt mit anderen Städten und Provinzen verbinden. Von Bāb al Yaman gelangt man auf der Taizstraße zu den im Süden von Sanaa liegenden Städte und Provinzen, wie z.B. Taiz, Dhamar und Aden. Die Zobairi Straße verbindet das Südtor mit der im Westen liegenden Stadt Al-Hūdaydah. Beide Straßen sind Geschäfts- und Dienstleistungsstandorte. In der Taizstr. befinden sich viele Hotels.

Im Norden, von Bāb Sh'uūp, führt eine Straße zu der im Osten liegenden Stadt und Provinz Ma'rib und Haḡramaūt. Eine zweite Straße führt nach 'Amran und S'adah. Im Nordwesten gelangt man auf der Al-Ameer-Str. zu der Stadt und Provinz Al-Mahweet. Alle sich dort befindenden großen Straßen sind Gewerbestraßen. Zu den bekanntesten zählen Al-Wahd-Straße, Al-'Ashrynstraße, Ar Riyā-Straße und die Ar Ribat-Straße. Im südlichen Teil von C befinden sich moderne Einkaufsmöglichkeiten, mit z. T. auch Waren aus dem europäisch-westlichen Ausland. Die für die Wohngebiete der Altstadt typischen Sackgassen sind in Bereich B weniger zahlreich.

b) Bebaute Flächen

Der Ausbau dieses Gebietes erfolgte ab 1970, nach Aufhebung des traditionellen Landverkaufsverbotes Guwara (siehe Unterabschnitt 5.1.1) auf Grundlage eines Stadtentwicklungsplanes. Es gibt Gebiete mit deutlich lockerer Bebauung, wie nördlich der Altstadt, west- und östlich des als Straße genutzten Wadibettes, wo die Mittelschicht meist in Mehrfamilienhäusern lebt und südwestlich der ehemaligen Gartenvorstadt. Bei dem letztgenannten Gebiet handelt es sich um ein Wohngebiet der Oberschicht mit vielen Villen. Die Grundstückspreise bzw. die Mieten sind entsprechend hoch.

Daneben gibt es dicht bebaute Gebiete wie östlich der Altstadt, wo die Unterschicht in Einfamilienhäusern lebt. Auch im Südosten und Süden der Altstadt, wo sich die Mittelschichtwohngebiete befinden, kann von einer dichten Bebauung gesprochen werden. Westlich und östlich des sich im Süden von Bereich B befindenden Kanals haben sich aufgrund der damals sehr geringen Grundstückspreise Menschen der Unterschicht angesiedelt. Ein weiteres sehr dicht bebautes und illegal besiedeltes Gebiet, in dem der ärmste Teil der Bevölkerung von Sanaa lebt, liegt im westlichen Teil von Bereich C, nördlich der Zobairi-Straße und östlich der Sattin-Straße.

Allgemein ist die Dichte der Bebauung entlang der großen Straßen am größten und nimmt, je weiter man sich von ihnen entfernt, ab.

Die Verteilung der sich in Gebiet C befindenden Moscheen erfolgt nach der Anzahl der in einem Wohngebiet lebenden Menschen. So stehen in Gebieten dichter Bebauung mehr Moscheen als in Gebieten mit lockerer Bebauung. Die Moscheen in Zone C sind meist von einer Mauer umgeben, die einen Hof einschließt, ihre Dächer sind aus Beton und sie besitzen einen Anbau, in dem sich eine Koranschule befindet. Manche sind zweigeschossig, wobei die obere Etage für die Frauen zum Beten genutzt wird.

Die sich in diesem Gebiet befindenden Schulgebäude und Schulhöfe sind größer als in den Bereichen A und B. Manche verfügen über einen Spiel- und Sportplatz für ihre Schüler. Es gibt auch größere Schulkomplexe, auf denen sich zwei Schulen, getrennt nach Jungen und Mädchen, befinden, die von einer Mauer getrennt werden. Neben diesen staatlichen Schulen, auf die die unter 7.2.1 beschriebenen Merkmale zutreffen, gibt es zahlreiche Privatschulen, die sich in normalen Gebäuden befinden und über keinen oder nur einen kleinen Pausenhof verfügen.

Die alte Universität grenzt westlich an Bereich B, an das ehemalige Judenviertel. Nordwestlich in Bereich C liegt die neu gebaute Universität auf einem Campus mit großen Freiflächen und Vegetation. Dort befinden sich die meisten Fakultäten, Wohnheime für Studenten und Wohnhäuser für Professoren und ihren Familien.

Die meisten Behörden liegen südlich von Bereich A und B und einige nördlich von B. Große amtliche Einrichtungen befinden sich am Rand von Bereich C. Bei den auf der Karte (Abb. 7.2.2.3-1) mit einem Symbol gekennzeichneten Behörden handelt es sich um zentrale Einrichtungen wie Verwaltungen und Ministerien. Verstreut liegende kleine Dienststellen wie z.B. die der Polizei oder der Post wurden nicht erfasst.

Von allen sich in dem Untersuchungsgebiet befindenden Banken liegen zwei in Bereich B und alle anderen in Bereich C, viele davon in der Zobairi Straße. Diese quert die Stadt von Ost nach West. Sie liegt somit zentral und ist für jeden gut zu erreichen.

Die Krankenhäuser sind recht gleichmäßig über das gesamte Gebiet in Bereich C verteilt und können meist gut durch eine der großen Verkehrsstraßen erreicht werden. Neben den staatlichen gibt es zahlreiche private Krankenhäuser.

Traditionelle Industrien und Leichtindustrien befinden sich in Sanaa außerhalb, aber in unmittelbarer Nähe der Altstadt. Ein Industriekomplex liegt südwestlich von Bereich B. Die modernen Großindustrien liegen außerhalb des Untersuchungsgebietes, entlang der großen Straßen.

c) Freiflächen

Nicht genutzte, brachliegende Flächen befinden sich im Osten, Westen und Südwesten, dort wo sich der Berg bzw. das Gebirge befinden. Dazu gehören auch das im nordöstlichen Teil liegende, ausgewiesene Bauland, der Universitätscampus und das im Westen sich in staatlichen Händen befindende Gebiet.

Der gesamte Bereich C ist mit Vegetation durchsetzt. Eine Ausnahme ist das Gebiet südlich und südöstlich der Altstadt, in dem Unterschichtwohngebiet. Dort wurde jede freie Fläche zum Aufbau von Wohnraum genutzt.

Die meisten Gärten in denen Obst- und Gemüse angebaut werden, liegen im Norden der Stadt. Dagegen sind die Parks mit Spielgelegenheiten für Kinder im Süden angesiedelt.

Ackerflächen befinden sich am Fuße des im Osten gelegenen Berges Ng'um, auf dem Universitätscampus und westlich davon. Eine große landwirtschaftlich genutzte Fläche liegt im Süden, nördlich der Sattin- und südlich der Salah-Straße und eine andere nordwestlich davon.

Die als Sportplatz hergerichteten Plätze sind gemessen an der in Sanaa lebenden großen Anzahl junger Menschen relativ gering. Ein Fußballfeld liegt südlich, in Altstadtnähe. Ein weiteres mit Rasen bewachsenes Sportfeld mit Rängen fürs Publikum befindet sich zwischen Großbereich A und B. Auch auf dem Universitätsgelände gibt es einen Fußball- und einen Volleyballplatz. Größere, der Polizei angehörende Sport- und Übungsplätze liegen im Süden.

Die Friedhöfe sind in Bereich C, in der Regel in Altstadtnähe angesiedelt. Wenige, kleinere liegen auch im Norden und Süden, am Rand von Bereich C.

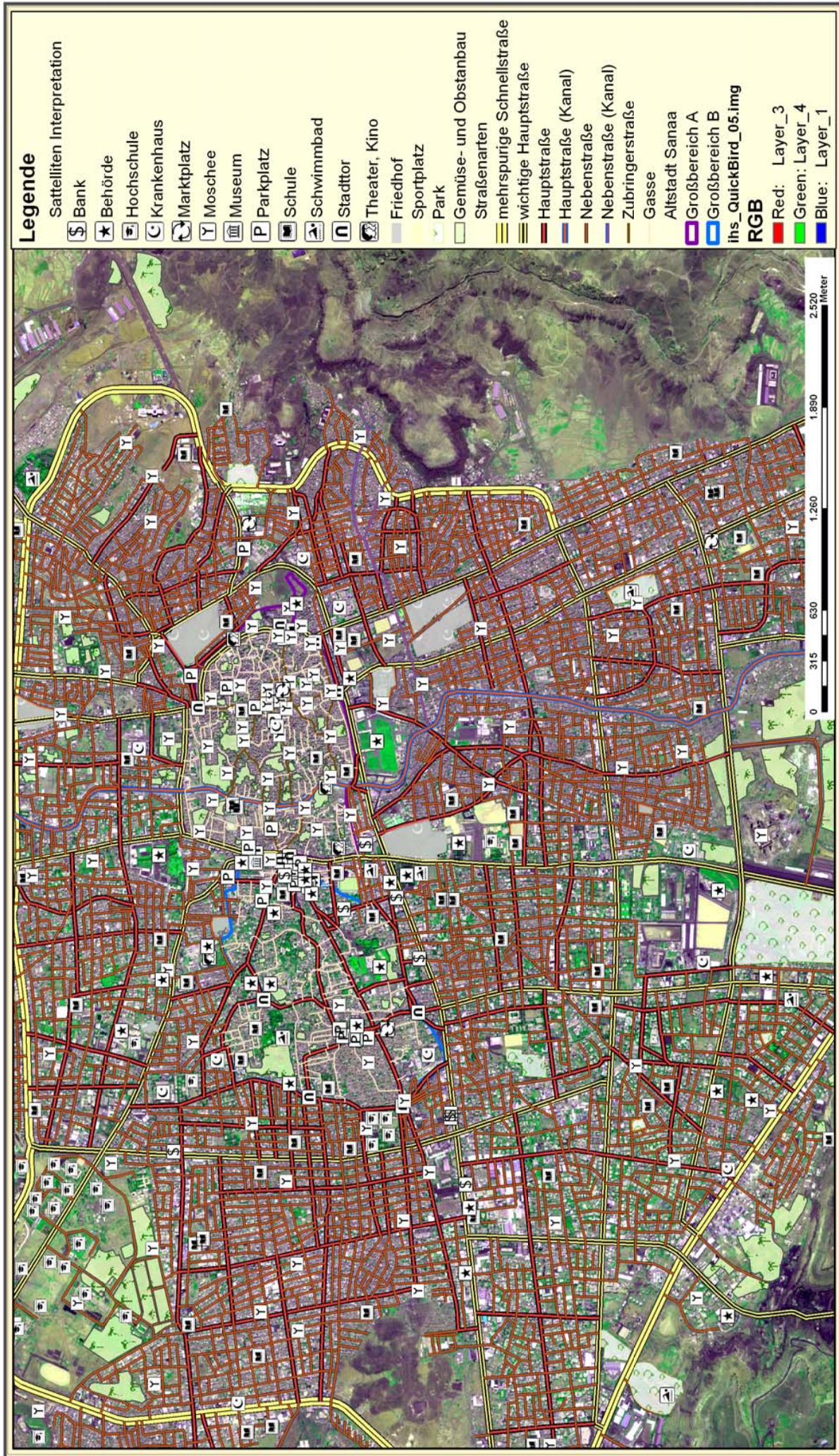


Abb. 7.2.2.3-1: Satellitenbildkarte vom Untersuchungsgebiet in Sanaa. Erstellt durch visuelle Interpretation der QuickBird-Satellitenbildaufnahme von 2005, Auflösung 0,6m.

7.3 Visuelle Auswertung des fusionierten 2D-Stadtmodells

Die Ergebnisse der visuellen Interpretation sind mit den Klassifikationsergebnissen zu einem Stadtmodell zusammengeführt worden, siehe Abb. 7.3-1 bis Abb. 7.3.3. Das Untersuchungsgebiet ist in drei Großbereiche unterteilt, die mit jeweils einer anderen Farbe markiert sind. Außerdem wurde der Bereich des Sūqs andersfarbig gekennzeichnet. Zu ihm führen die in braun dargestellten und manuell digitalisierten Zubringerstraßen. Ebenso wurden durch die visuelle Interpretation die sich in den Wohnvierteln von Großbereich A befindenden, von der Klassifikation nicht erfassten Gassen und Sackgassen und der in nordsüdlicher Richtung verlaufende Kanal, in der Funktion als Straße herausgearbeitet, siehe Abb. 7.3-1. Der Bereich östlich vom Sūq ist dicht bebaut. Zu erkennen ist dies an dem geringen Vegetationsbestand und dem dichten Straßenverkehrsnetz. Innerhalb der Klasse *Vegetation* kann differenziert werden zwischen den digitalisierten Feldern für Obst- und Gemüseanbau und anderen Bäumen bzw. Wiesen. Die visuelle Interpretation liefert Informationen über die Funktion einzelner Gebäude. Anhand von Symbolen sind in der Karte ein Lufttheater, die Stadttore, Sportplätze, Parkanlagen und Parkplätze zu erkennen.

Der westlich an Bereich A grenzende Großbereich B ist, mit Ausnahme des ehemaligen Judenviertels, weniger dicht bebaut, siehe Abb. 7.3-2. Anhand der von der visuellen Interpretation herausgearbeiteten Straßentypen, können die in Bereich B vorhandenen Straßen in Hauptstraßen und Gassen eingeteilt werden. Nebenstraßen gibt es nur wenige. Der Vegetationsbestand ist größer als in Bereich A. Aber es gibt weniger Flächen für den Obst- und Gemüseanbau.

In Großbereich C ist das Straßennetz gut von der Klassifikation erfasst worden, siehe Abb. 7.3-3. Die mehrspurige Schnellstraße ist durch ihre Breite identifizierbar. Nicht erfasst wurden die nicht asphaltierten Straßen. Durch die Digitalisierung sind diese herausgearbeitet und dadurch das Straßennetz ergänzt worden.

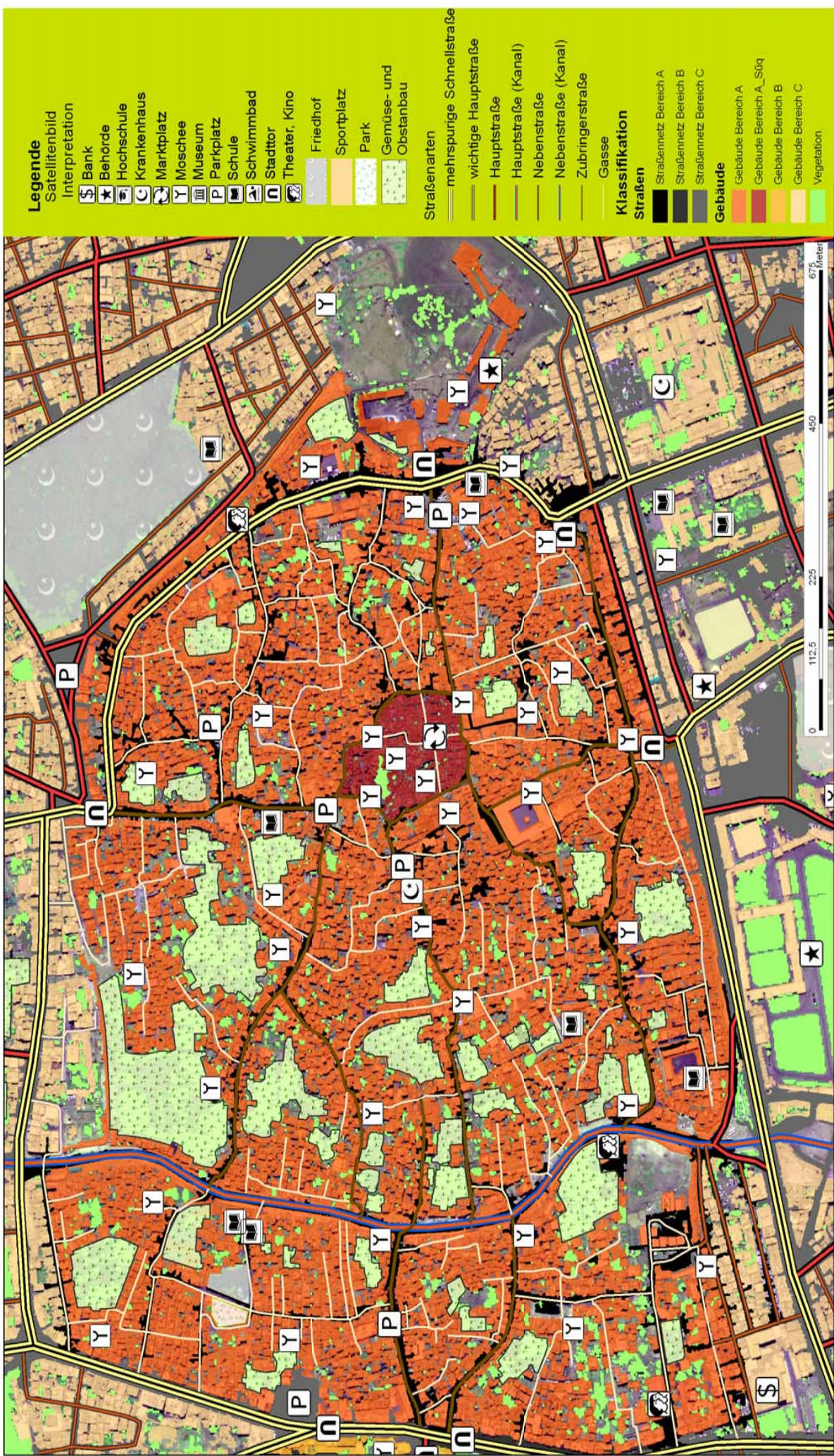


Abb.7.3-1: Satellitenbildkarte von Bereich A von Sanaa. Erstellt durch die Fusion der pixelbezogenen Klassifikationsergebnisse auf Klassenebene und der Ergebnisse der visuellen Interpretation der Satellitenbildaufnahme.

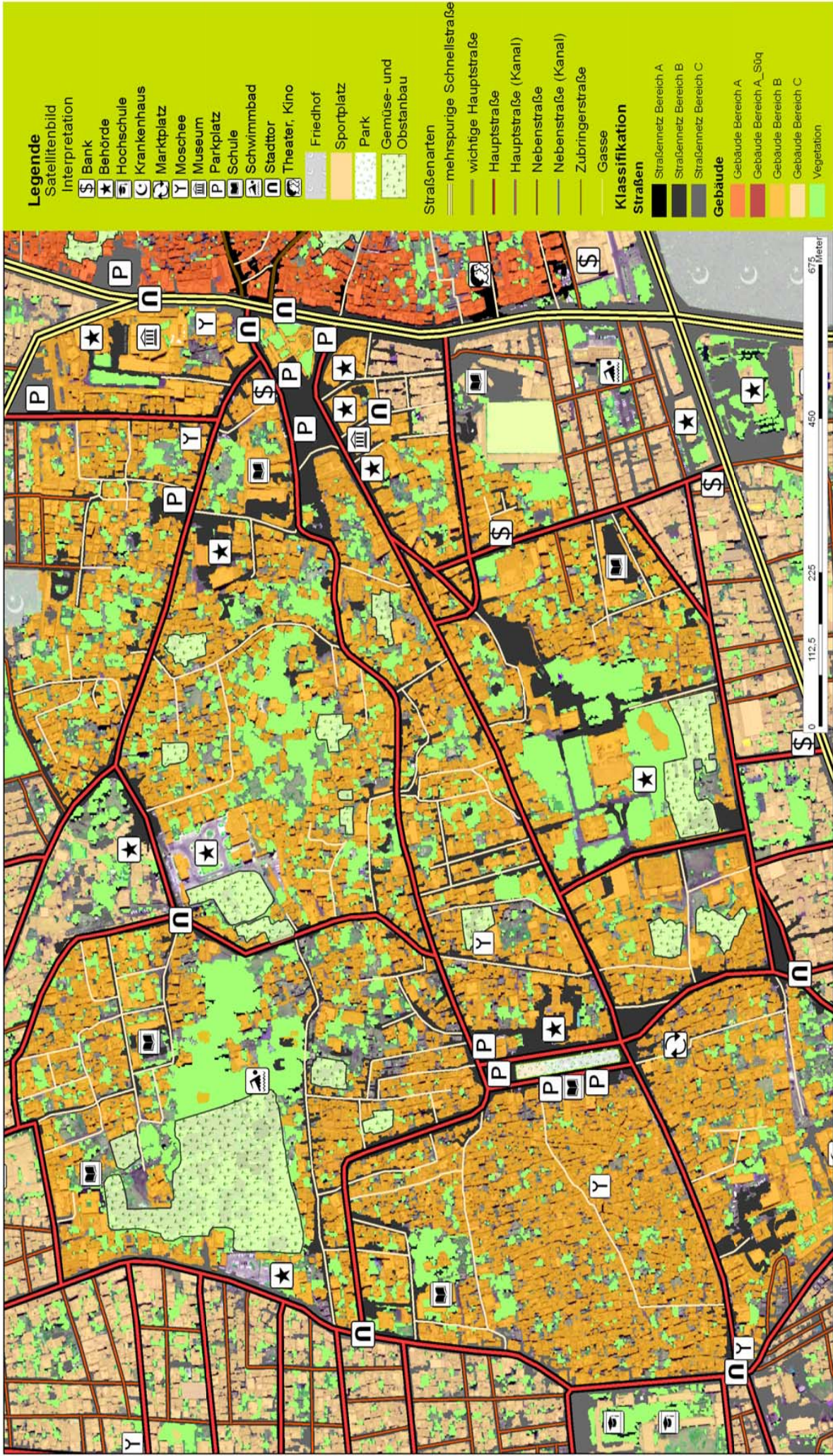


Abb. 7.3-2: Satellitenbildkarte von Bereich B von Sanaa. Erstellt durch die Fusion der pixelbezogenen Klassifikationsergebnisse auf Klassenebene und der Ergebnisse der visuellen Interpretation der Satellitenbildkarte.

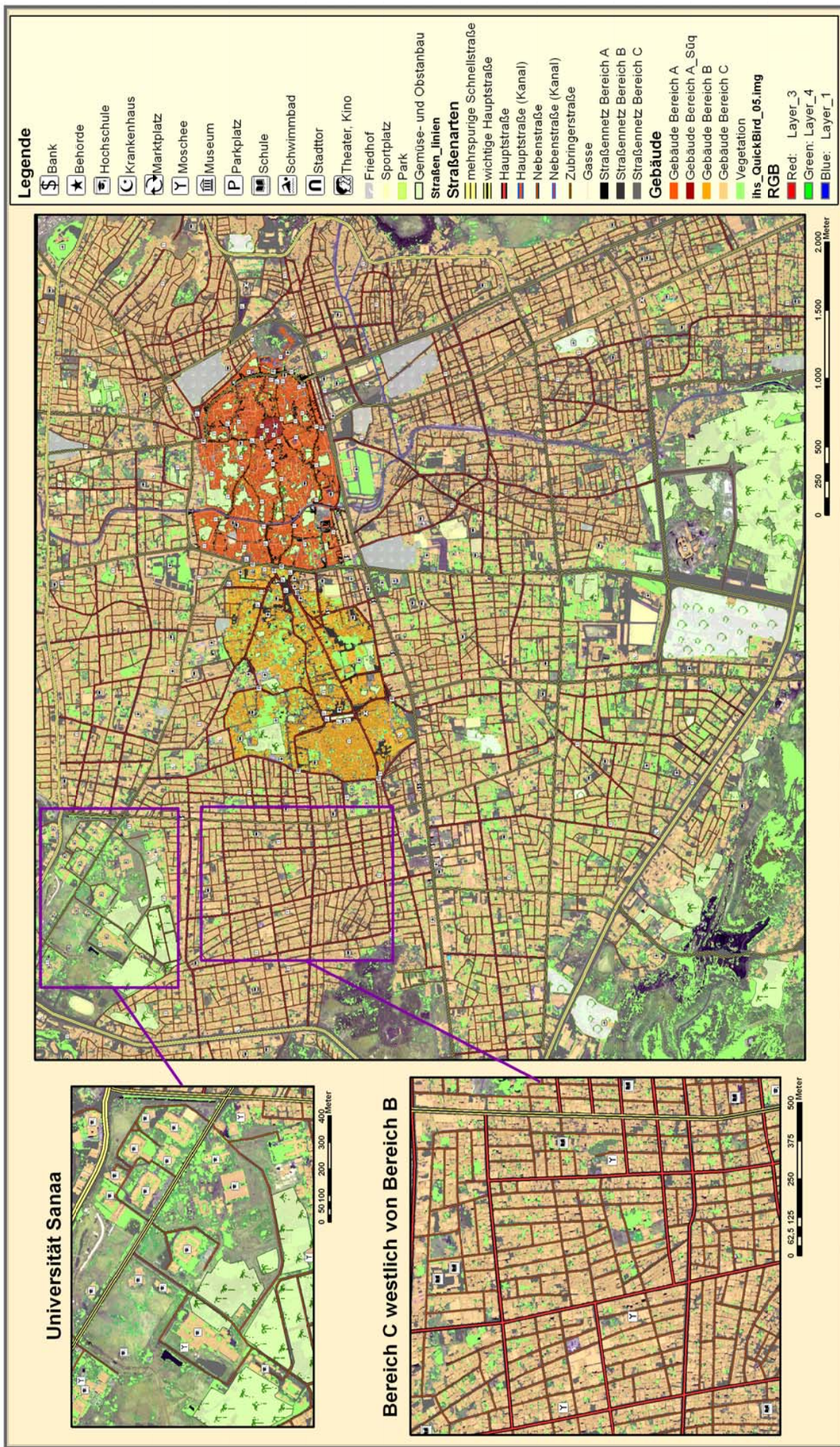


Abb. 7.3-3: Satellitenbildkarte vom Untersuchungsgebiet in Sanaa, von der Universität Sanaa, ein Ausschnitt von Bereich C und die Einordnung in die Gesamtkarte. Erstellt durch die Fusion der pixelbezogenen Klassifikationsergebnisse auf Klassenebene und der Ergebnisse der visuellen Interpretation der Satellitenbildkarte.

7.4 Ergebnisse der 3D-Visualisierung

Die kartographische Visualisierung der urbanen Raumstrukturen der jemenitischen Hauptstadt Sanaa erfolgte zusätzlich in 3D. Allerdings erlaubten die Möglichkeiten der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Soft- und Hardware die 3D-Darstellung nur für einen kleinen Bereich. Es wurde der Bereich der traditionellen Altstadt ausgewählt, die die wesentlichen Merkmale einer orientalischen Stadt, wie sie in den Stadtmodellen von Dettmann (1969) und Ehlers (1993) dargestellt sind (siehe Abb. 5.1.2-4 und 5.1.2-1), trägt. Die 3D-Visualisierung und die 2D-Stadtkarten sollen im Anschluss darauf hin überprüft werden, ob sich in ihnen diese wesentlichen Merkmale wiederfinden lassen.

Die 3D-Visualisierung wurde sowohl durch die Digitalisierung der Objekte als auch von den Klassifikationsergebnissen erstellt (siehe Abschnitt 6.5 und Abb. 6.5-1). Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt, siehe dazu Abb. 7.4-1. Im Anschluss werden die erstellten Datenprodukte zu einer 3D-Darstellung vereint und in Unterabschnitt 7.4.3 beschrieben und ein Ausschnitt davon in Abb. 7.4.3-1 dargestellt.

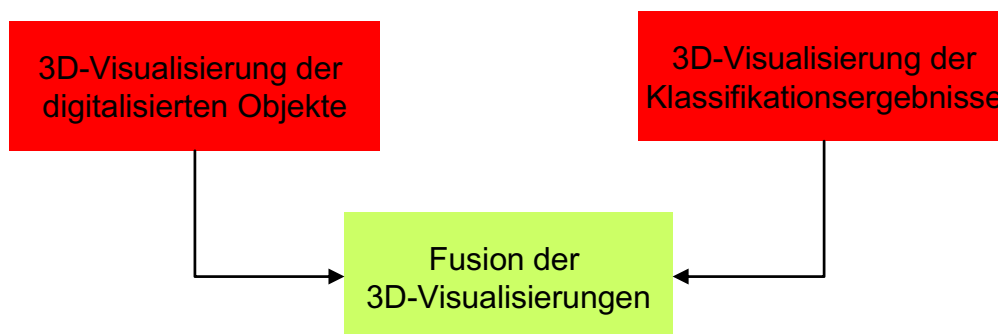


Abb. 7.4-1: Schematische Darstellung der erzeugten 3D-Visualisierungen.

7.4.1 3D-Visualisierung der digitalisierten Objekte

Für die 3D-Visualisierung wurden die bereits für die 2D-Stadtkarte digitalisierten Straßen, Friedhöfe, Sportplätze, Parkanlagen und Obst- und Gemüsegelder genutzt. Für die 3D-Darstellung wurden zusätzlich alle Gebäude und die Stadtmauer digitalisiert (siehe Abschnitt 6.5). Einen Ausschnitt des Ergebnisses der 3D-Visualisierung zeigt Abb. 7.4.1-1. Durch die Digitalisierung werden die realen Ausmaße, wie Größe, Form und Höhe der Objekte erfasst. Die engen Gassen und Sackgassen innerhalb der Altstadt werden gut herausgearbeitet. Nach außen werden die digitalisierten Objekte mit einer geraden Linie abgegrenzt.

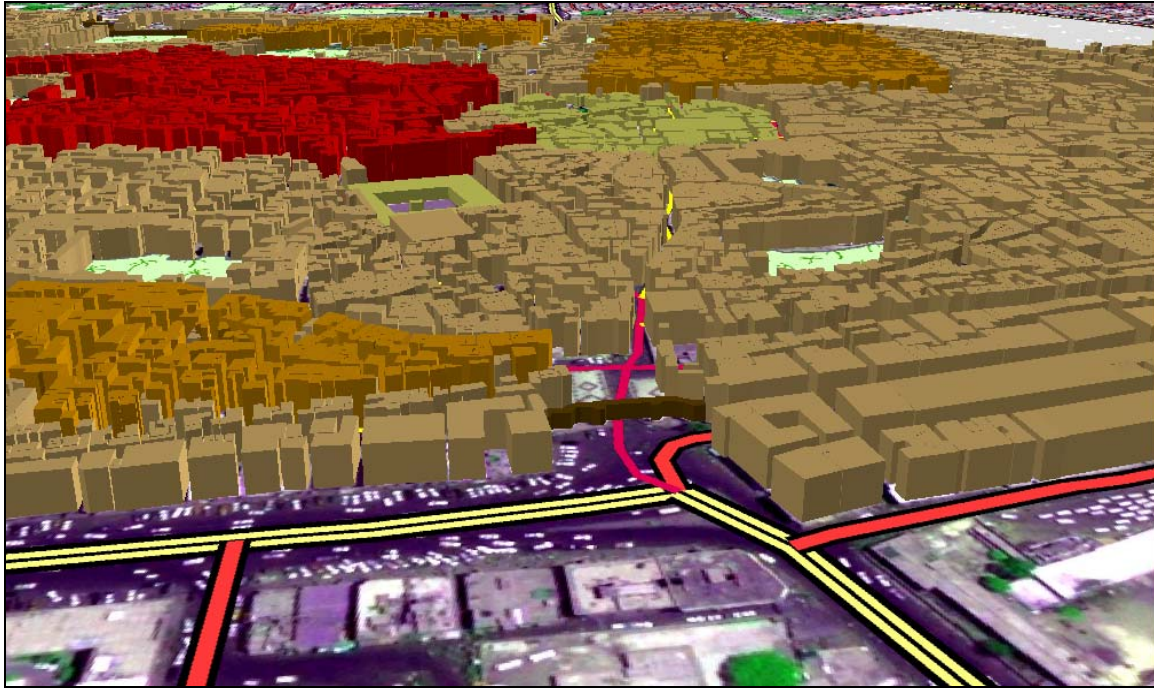


Abb. 7.4.1-1: 3D-Visualisierung der Altstadt von Sanaa. Erstellt durch Digitalisierung der Objekte.

7.4.2 3D-Visualisierung der Klassifikationsergebnisse

Des Weiteren wurde eine 3D-Darstellung aus den Ergebnissen der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene erstellt (siehe Abschnitt 6.5). In Abb. 7.4.2-1 ist ein Ausschnitt des Ergebnisses der 3D-Visualisierung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die nebeneinander stehenden Gebäude als Blöcke wieder gegeben werden. Lediglich einzeln stehende Häuser sind in ihrer Form und Größe von der Klassifikation erfasst wurden. Jedoch sind die Außengrenzen der Objekte nicht geradlinig. Die Stadtmauer wurde der Klasse *Gebäude* zugeordnet. Durch die Höhenangabe von 5m ist sie aber von den sie umgebenden Häusern unterscheidbar. An einigen Stellen, wo die Gebäude an die Mauer grenzen, wird sie breiter, als sie in Wirklichkeit ist, dargestellt.

7.4.3 Fusion der 3D-Visualisierungen

Nachdem die Ergebnisse aus den beiden verschiedenen Verfahren zur 3D-Visualisierung vorgestellt worden sind, werden sie in einer Darstellung vereint (Abb. 7.4.3-1). Dadurch werden die sich bei der Klasse *Gebäude* befindenden Lücken, entstanden durch Fremdobjekte auf den Dächern (wie z.B. Satellitenantennen und Wasserbehälter), geschlossen. Außerdem werden die an die Stadtmauer angrenzenden und zusammen mit der Mauer als eine zusammenhängende Fläche

klassifizierten Häuser sichtbar gemacht, so dass die Stadtmauer in ihrer realen Breite dargestellt wird.

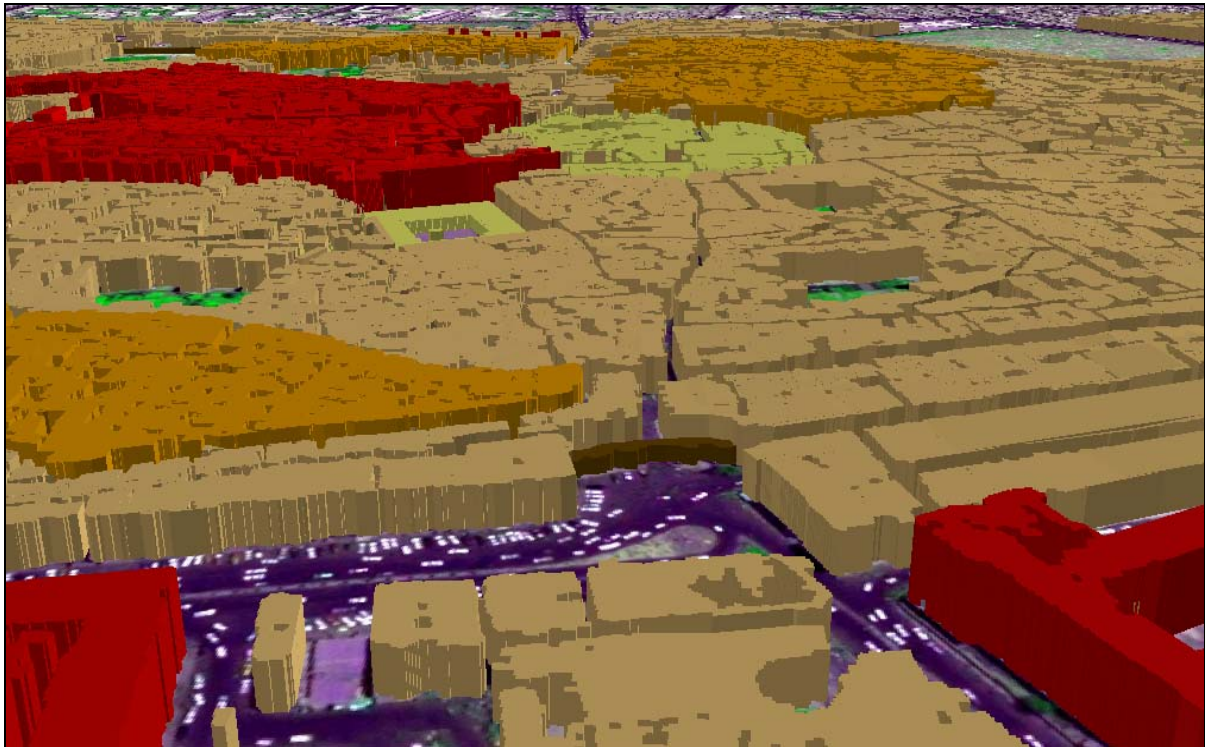


Abb.: 7.4.2-1: 3D-Visualisierung der Altstadt von Sanaa. Erstellt von den Ergebnissen der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene.

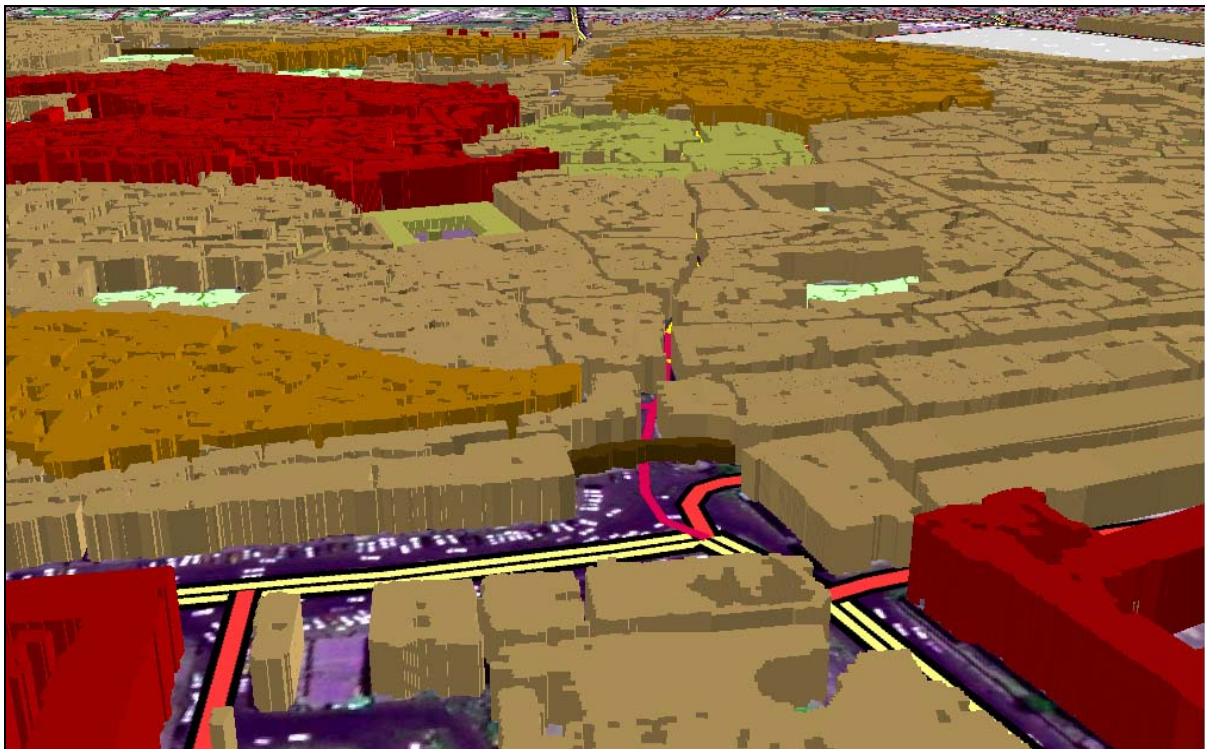


Abb. 7.4.3-1: 3D-Visualisierung der Altstadt von Sanaa. Erstellt aus der Fusion der 3D-Visualisierung der Digitalisierung und der 3D-Visualisierung der Klassifikationsergebnisse.

7.5 Vergleich der Satellitenbildkarten von Sanaa mit dem Modell der orientalischen Stadt

Im Folgenden soll überprüft werden, ob sich wesentliche Elemente einer orientalischen Stadt, wie sie in den Stadtmodellen von Dettmann (1969) und Ehlers (1993) abgebildet sind (siehe Unterabschnitt 5.1.2), in den von Sanaa erstellten Satellitenbildkarten wieder finden lassen.

Bei einem Vergleich sind einige wesentlichen Merkmale in den erstellten Satellitenbildkarten von Sanaa zu erkennen. Dazu zählen die die Altstadt umgebende und heute noch teilweise vorhandene Stadtmauer (Abb. 7.5-1, Bild F) und die darin integrierte Zitadelle (Bild C), auf deren Fläche sich auch eine Moschee befindet. Auch die Friedhöfe können, wie in dem Idealschema zur orientalischen Stadt, außerhalb der Altstadt verortet werden (Bild A). Der im Zentrum der Altstadt sich befindende Sūq (Bild E) ist mit einer, von den ehemaligen Stadttoren (Bild D) ausgehenden Verkehrsachse verbunden, die auch in den von den Klassifikationsergebnissen erstellten 2D/3D-Stadtkarten gut zu erkennen sind. In den Bereichen dazwischen liegen die Wohngebiete, die von Sackgassen erschlossen werden. Diese sind lediglich in den durch Digitalisierung erstellten Karten (7.2.2.1-1 und 7.4.1-1) sowie in den Karten der fusionierten Ergebnisse (Abb. 7.3-1 und Abb. 7.4.3-1) dargestellt. Innerhalb der Wohngebiete gibt es jeweils einen lokalen Bazar mit Moschee (Bild B). Dieser ist in der 3D-Visualisierung sehr gut herausgearbeitet worden. Auf dem Gebiet und am Rand des zentralen Sūqs befinden sich kleinere Moscheen. Die Große Moschee liegt nicht wie in dem Model von Dettmann (1969) mittig, sondern etwas von dem Sūq entfernt (Bild A und E). Weitere, die Altstadt von Sanaa prägende Besonderheiten sind die bis heute zum Anbau von Obst- und Gemüse genutzten, verhältnismäßig großen Gartenkomplexe und das in nord-südlicher Richtung verlaufende Wadibett, das in der Regenzeit als Abwasserkanal und in der übrigen Zeit als Hauptstraße genutzt wird. Diese Merkmale sind besonders gut in der 2D-Stadtkarte, die durch Digitalisierung und visuellen Interpretation erstellt wurde (7.2.2.3-1) und in der 3D-Visualisierung herausgearbeitet worden.

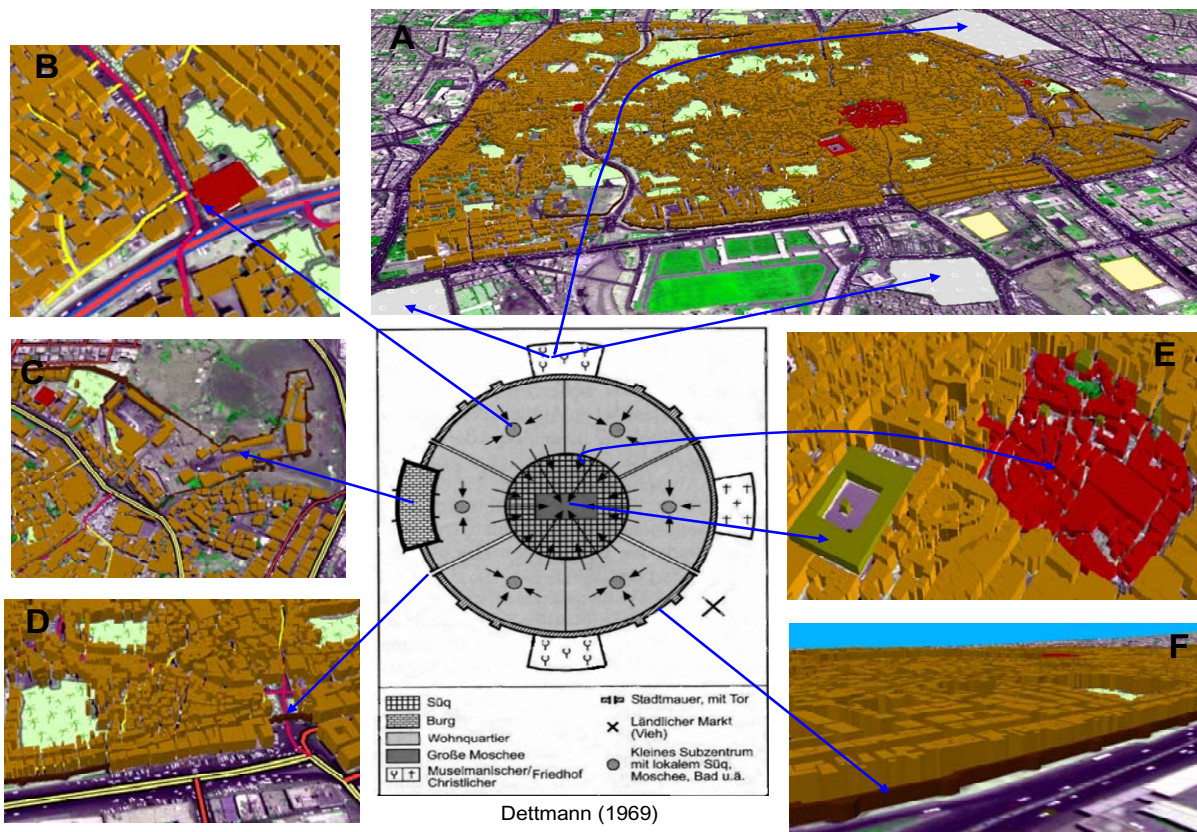


Abb. 7.5-1: Vergleich der 3D-Visualisierung von Sanaa mit dem Modell der orientalischen Stadt von Dettmann (1969). Eigene Darstellung.

7.6 Zusammenfassung

Nach einer visuellen Auswertung der Ergebnisse der textur- und kantenorientierten Verfahren wurde für die visuelle Interpretation des Satellitenbildes und für die Auswertung der Klassifikationsergebnisse der Texturoperator *Mean Euclidean Distance* und der Laplace-Operator ausgewählt.

Durch Berechnung des NDVI und Vergleich mit den Ergebnissen aus den verschiedenen Klassifikationsverfahren konnte festgestellt werden, dass bei der objektorientierten Klassifikation die als Vegetation ausgewiesene Fläche am größten ist. Dies liegt daran, dass bei dieser Klassifikation auch Bereiche mit nur einem sehr geringen NDVI erfasst werden.

Die Auswertung der Klassifikationen erfolgte für jede Klasse einzeln und brachte zusammenfassend folgende Ergebnisse:

- Bäume und Baumgruppen wurden in ihren Außengrenzen von den verschiedenen Klassifikationsverfahren gut erfasst. Ein Vergleich der beiden pixelbezogenen Klassifikationen zeigt, dass bei der Klassifikation auf Bildebene weniger die kleinen, vereinzelt Vegetationsflächen erfasst wurden. Bei der objektorientierten Klassifikation

gibt es im Vergleich zur pixelbasierten bei der Klasse *Vegetation* mehr Fehlklassifikationen.

- Asphaltierte Haupt- und Nebenstraßen wurden von allen Klassifikationsverfahren gut erfasst. Fehlklassifikationen zeigten sich vor allem bei der objektorientierten Klassifikation, bei den wenig befahrenen Straßen. Nicht asphaltierte Straßen wurden nicht als Straßen erkannt und der Klasse *Gebäude* zugeordnet.
- Einzel stehende Gebäude sind gut erfasst worden. Problematisch ist die Klassifikation in der Altstadt. Dort gibt es viele Fehlklassifikationen.
- Die zu der Klasse *Brachflächen* gehörenden Spiel- und Sportplätze sowie Friedhöfe werden nicht als solche erfasst. Lediglich die Freiflächen wurden als *Brachflächen* ausgewiesen.

Für die Erstellung der Stadtkarte aus den Klassifikationsergebnissen wurden, nach Anwendung der zuvor definierten Entscheidungsregeln die Ergebnisse der Klasse *Straßen*, *Vegetation* und *Gebäude* aus der pixelbasierten Klassifikation auf Klassenebene genommen. Das Untersuchungsgebiet dieses Modells und des zusätzlich interaktiv aus der visuellen Interpretation erstellten Modells wird in drei Großbereiche unterteilt und mit den Großbuchstaben A (für Altstadt, Kernbereich), B (für ehemalige Garten- und Vorstadtquartiere) und C (für Stadterweiterungen nach 1970) gekennzeichnet und verschiedenfarbig markiert. Innerhalb dieser Bereiche werden die Objekte den Gruppen Straßen, bebaute Flächen und Freiflächen zugeordnet, mit einem Symbol versehen und verschiedene Flächen sowie die Straßen digitalisiert. Nach einem visuellen Vergleich der beiden erstellten Stadtmodelle werden ihre Ergebnisse zu einem fusioniert.

Für den Altstadtbereich wurde aus dem Modell der Klassifikationsergebnisse und dem Modell der visuellen Interpretation jeweils eine 3D-Visualisierung erzeugt und die Ergebnisse vorgestellt. Anschließend werden beide 3D-Visualisierungen in einer Karte zusammengeführt. Zum Schluss werden die erstellten Stadtkarten von Sanaa einem visuellen Vergleich mit den Modellen der orientalischen Stadt unterzogen.

8. Bewertung und Ausblick

Die Ergebnisse der Bildverarbeitung und der erzeugten Bild- und Kartenprodukte werden im Folgenden vor dem Hintergrund der Zielsetzung der Arbeit (Abschnitt 2.1) bewertet. Im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht die Entwicklung und Implementierung eines generischen Verfahrens zur Erfassung, Verarbeitung, Auswertung und kartographischen Visualisierung des urbanen Raumes der jemenitischen Hauptstadt Sanaa aus operationellen Fernerkundungsdaten.

8.1 Bewertung

8.1.1 Ergebnisse aus den objekt- und pixelbezogenen Klassifikationsverfahren

Die Verkehrsinfrastruktur und die Vegetation auf der QuickBird – Satellitenbildaufnahme sind bei allen durchgeführten Klassifikationen sehr gut erfasst worden. Insbesondere bei der pixelbezogenen Klassifikation, bei der jede Klasse einzeln klassifiziert wurde. Fast alle zwischen den Häusern stehenden Bäume wurden bei der Klassifikation auf Klassenebene wiedergegeben. Schwierigkeiten gab es mit den sich auf den Fahrbahnen befindenden Fahrzeugen. Bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene entstanden dadurch Lücken auf den Straßen, die aber durch eine Nachbearbeitung beseitigt werden konnten. Bei der Klassifikation auf Bildebene wurden die Fahrzeuge der Klasse *Gebäude* zugeordnet. Durch eine Verlagerung des Aufnahmezeitpunktes außerhalb der Hauptverkehrszeit oder auf das verkehrsberuhigte Wochenende (Freitag) könnte dieses Problem minimiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Lösung des Problems wäre, wenn man den Datensatz von mehreren sich überlappenden Luftbildern hätte und von diesen mit Hilfe eines bestimmten Algorithmus die beweglichen Objekte, wie die Autos auf den Fahrbahnen, entfernen würde.

Auch die Klassifikation der Gebäude, vor allem in der Altstadt, hat unter Berücksichtigung der dort herrschenden Bedingungen, wie dichte Bebauung, kleine Grundfläche und große Höhen der Wohnhäuser, gleiche Materialien von Dächern und Gassen sowie Fremdkörpern auf den Dächern, bei der Klassifikation auf Klassenebene gute Ergebnisse erzielt, deren Genauigkeitswerte über denen der Klassifikation auf Bildebene liegen. Die automatische Erfassung von Einzelgebäuden in der Altstadt ist aufgrund fließender Übergänge zwischen den Gebäuden und kaum vorhandener Schatten oder Gassen zur Abgrenzung, kaum möglich. Durch ein selbst

ausgearbeitetes Nachbearbeitungsverfahren konnten Fehlklassifikationen beseitigt werden. In ihren Außengrenzen sehr gut abgegrenzt wurden Gebäude, die eine große Grundfläche aufzuweisen haben und an breiten, asphaltierten Straßen liegen. Entgegen der in der Literatur oft genannten Probleme bei den pixelbasierten Auswerteverfahren von sehr hochauflösenden Satellitendaten, wie dem „Salt and Pepper Effect“, der die Interpretation der Klassifikationsergebnisse und die anschließende Anfertigung von Themendaten erschwert (Blaschke & Strobl 2001; Blaschke et. al. 2002, Ehlers 2002), wurden in dieser Arbeit die insgesamt besten Klassifikationsergebnisse bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene erzielt. Dadurch, dass jede Klasse einzeln für sich klassifiziert wurde, konnte die zu dieser Klasse gehörende Fläche besser erfasst und nachbearbeitet werden. Die Datenmenge wurde reduziert, die Bearbeitungszeit somit kürzer und die Speicherkapazität geringer. Die Kontrolle der Auswertung bzw. visuelle Validierung der pixelbezogenen Klassifikationsergebnisse auf Klassenebene mit dem Originalsatellitenbild gestaltete sich einfacher und erfolgte genauer als bei den anderen durchgeführten Klassifikationsverfahren. Außerdem war es durch die alleinige Erfassung der Klasse *Gebäude* möglich, eine 3D-Visualisierung zu erzeugen. Diese Art der Vorgehensweise bei der Klassifikation und die davon abgeleitete 3D-Darstellung sind bisher kaum gemacht wurden.

8.1.2 Vergleichende Analyse der erstellten Satellitenbildkarten

Neben der automatischen Auswertung der Satellitenbilddaufnahme boten die Daten die Möglichkeit der visuellen Interpretation. Dadurch konnten weitere Informationen über das Untersuchungsgebietes gewonnen werden.

Die Ergebnisse der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene und die Ergebnisse der visuellen Interpretation der Satellitenbilddaufnahme wurden jeweils in einer Stadtkarte dargestellt und sollen im Folgenden nach dem in dieser Arbeit verfolgtem Ziel, die Struktur des urbanes Raumes von Sanaa zu erfassen und kartographisch zu visualisieren, nach ihrem Arbeitsaufwand und der Kosten im Folgenden miteinander verglichen werden. Außerdem soll überprüft werden, wie gut die wesentlichen Elemente einer orientalischen Stadt, wie sie in den Modellen von Dettmann (1969) und Ehlers (1993) dargestellt sind, in den erstellten Stadtkarten herausgearbeitet wurden.

Die durch die visuelle Interpretation erstellte Stadtkarte enthält mehr Informationen als die durch die Klassifikation erstellte Karte. Die Menge an Informationen, die der Betrachter durch das Studieren der Karte erhält, ist jedoch abhängig vom Kenntnisstand des Interpreten über das auszuwertende Gebiet und seiner dafür zusätzlich hinzugezogenen Materialien. Bei der Klassifikation werden alle Objekte des Untersuchungsgebietes in vier Klassen eingeteilt (siehe Unterabschnitt 6.2.1). Durch die damit stattfindende Reduzierung und Beschränkung auf nur bestimmte Elemente ist es möglich, die Struktur und einige wesentlichen Merkmale einer orientalischen Stadt zu erkennen. Dies wird durch die manuelle Unterteilung des Gebietes in drei Großbereiche und ihre farbliche Markierung noch unterstützt. Der typische Aufbau mit dem sich im Zentrum der Altstadt befindenden Sūqs und den zu ihm führenden großen Durchgangsstraßen, das angrenzende, neu entwickelte moderne Einkaufs- und Geschäftszentrum und die schachbrettartig angeordneten Verkehrsstraßen in dem erst kürzlich erschlossenen Gebieten, außerhalb der ehemaligen Stadtmauer, werden durch das von den Klassifikationsergebnissen erstellte Stadtmodell gut wieder gegeben. Nicht bzw. nur schlecht zu erkennen sind die Sackgassen in der Altstadt und die nicht asphaltierten Straßen. In der 2D-Stadtkarte sind sie durch die Digitalisierung gut herausgearbeitet wurden. Weitere in dem Modell von Ehlers zu findende wesentlichen Merkmale einer orientalischen Stadt, wie die Moscheen in den Wohnvierteln, Mittel- und Unterschichtwohngebiete, Industrie, moderne Einkaufs- und Gewerbestraßen sind dagegen aus dem automatisch erstellten Stadtmodell nicht ableitbar. Auch auf dem Satellitenbild sind sie, mit Ausnahme der Fabriken, nur durch Zusatzinformationen des Interpreten aufzufinden. Wohnviertel, die sich durch Villen mit Innenhöfen und Vegetation auszeichnen, einige Schulen mit großem Pausenhof und freistehende Bereiche der alten Stadtmauer sind sowohl auf dem automatisch wie auf dem visuell ausgewerteten Bild identifizierbar. Friedhöfe, die dem Idealschema entsprechend außerhalb, aber nicht weit von der Altstadt entfernt liegen, können auf den sich dort befindenden, nicht klassifizierten, großen Flächen vermutet werden. Bei der Klassifikation sind die verschiedenen Vegetationsformen zu einer Klasse zusammengefasst worden, weshalb die für Sanaa typischen Obst- und Gemüsegärten nicht zu erkennen sind. Auf dem Satellitenbild können sie auch ohne weitere Hilfsmittel identifiziert werden. Zur besseren kartographischen Visualisierung wurden diese Flächen digitalisiert.

Bei einem weiteren Vergleich der beiden erstellten Modelle hinsichtlich ihrer Kosten und des Zeitaufwandes ihrer Erstellung kann festgestellt werden, dass die detaillierte Auswertung des Satellitenbildes durch einen Interpretierenden mehr Zeit und Kosten verursacht als die automatische Auswertung durch die Klassifikation. So müssen für die visuelle Interpretation zusätzliche Daten beschafft und ausgewertet, Symbole für die Kartenerstellung ausgewählt bzw. selbst erstellt, manuell eingetragen und bestimmte Flächen, wie die Gärten und Friedhöfe digitalisiert und die Attributtabelle bearbeitet werden. Bei der Klassifikation erfolgt die Kartenerstellung automatisch. Neben der deutlichen Reduzierung des zeitlichen Bearbeitungsaufwandes führt die Klassifikation bei Verwendung gleicher Parameter und Ausgangsdaten zu gleichen Ergebnissen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch die aus der Klassifikation erstellte Stadtkarte die Struktur einer orientalischen Stadt am besten wiedergegeben wird.

Die Ergebnisse der beiden Stadtkarten wurden zu einer Stadtkarte zusammengeführt. Dabei findet eine Anreicherung der Datensätze statt. Die Vorteile beider Modelle werden miteinander vereint und die Nachteile des einen Modells werden durch das andere ausgeglichen.

8.1.3 3D-Visualisierung

Durch die auf Basis der 2D-Darstellung erzeugte 3D-Visualisierung werden die Stadtkarten ergänzt und dem Betrachter ein anderer räumlicher Eindruck vermittelt. Durch die Darstellung der Höhen der Objekte wird die Stadtmauer gut herausgearbeitet. Außerdem wird ersichtlich, dass das Zentrum der Stadt, d.h. der Süq und die Große Moschee, anders als in dem Modell von Ehlers (1993), niedriger als die es umgebenden Häuser ist. Die oft bis zu 10 Stockwerken oder mehr hohen Gebäude in der Altstadt sind das Besondere von Sanaa und können durch die 3D-Visualisierung gut erkannt werden. Die Gründe für die hohen Turmhäuser liegen in dem traditionellen Landverkaufsverbot (siehe Unterabschnitt 5.1.1) „Guwara“, dem Anstieg der Bevölkerungszahl innerhalb der Stadt und den für den Bau vorhandenen Bedingungen. Dazu zählen die die Basis der Häuser bildenden schweren Natursteine sowie die sich darauf befindenden leichteren Ziegel- und Basaltsteine und das aride Klima in der Region.

Außerdem werden die in der von den Klassifikationsergebnissen erstellten 2D-Stadtkarte nicht bzw. nur schlecht zu erkennenden Sackgassen in der Altstadt und

die nicht asphaltierten Straßen, anhand der Abgrenzung der Gebäude in der 3D-Visualisierung gut herausgearbeitet.

8.1.4 Zusammenfassung

Für die Verfahrensentwicklung waren folgende Rahmenbedingungen relevant:

1. Das Verfahren soll auf Standardverfahren und Systemen der raumbezogenen Informationsverarbeitung basieren und in seinen wesentlichen Prozessschritten automatisiert werden können;
2. der Erfassungs-, Verarbeitungs- und Visualisierungsprozess soll so konzipiert und umgesetzt werden, dass eine Übertragbarkeit auf die Erfassung und Dokumentation vergleichbarer urbaner Räume des altweltlichen Trockengürtels möglich ist.

Die automatische Auswertung der Satellitenbilddaufnahme durch die pixelbezogene Klassifikation auf Klassenebene hat gute Ergebnisse erbracht, anhand derer eine Stadtkarte erstellt werden konnte, die die wesentlichen Merkmale einer orientalischen Stadt wiedergibt. Dieses Modell wurde durch die interaktive Auswertung, wie z.B. der Digitalisierung der Straßen und einiger Flächen und der Kennzeichnung ihrer Funktionen mit Symbolen, noch verbessert. Das Endprodukt ist somit teilautomatisiert und entsprechend den Rahmenbedingungen mit Standardsoftware durchzuführen.

Das ausgearbeitete und auf die Stadt Sanaa angewendete Verfahren kann auf vergleichbare Städte (hinsichtlich der Größe) des altweltlichen Trockenraumes übertragen werden. Es ist sogar möglich, dass dort bessere Ergebnisse als in Sanaa erzielt werden. Da in Sanaa die Klassifikationsbedingungen durch die sehr dichte und hohe Bebauung (durchschnittlich 10 Stockwerke) innerhalb der Altstadt weniger gut sind.

Die voraus gegangenen Ausführungen dürften verdeutlichen, dass die Aufgabenstellung der Arbeit im Wesentlichen umgesetzt werden konnte. Einschränkungen ergaben sich bei der automatischen Auswertung der Altstadt von Sanaa. Dies liegt begründet in den dort für die Klassifikation herrschenden ungünstigen Bedingungen und an den Eigenschaften der Daten, deren geometrische Auflösung keine exakte Differenzierung kleiner Objekte garantiert. Durch die Digitalisierung von Straßen und Gebäuden und die Darstellung der automatisch durch die Klassifikation erfassten Gebäude in 3D konnte der Bereich der Altstadt gut herausgearbeitet und in seinen wesentlichen Strukturen erfasst werden.

Insgesamt wurde in der Arbeit ein generisches Verfahren entwickelt, das mit geringen Modifikationen auf die Untersuchung anderer städtischer Räume des Typus Orientalische Stadt im altweltlichen Trockengürtel angewendet werden kann.

8.2 Ausblick

Die Bearbeitung der Thematik hat eine Reihe zusätzlicher Fragestellungen aufgeworfen, deren Untersuchung die vorliegende Studie sinnvoll erweitern könnte.

Für bessere Ergebnisse bei der automatischen Erfassung der Objekte der Stadt wären bestimmte Algorithmen notwendig, die zu einer geradlinigen Abgrenzung der Gebäude führen. Bei besserer Datenlage, d.h. bei Daten mit einer höheren Auflösung wäre eine genauere Erfassung der Objekte möglich. Dadurch könnte die Klassifikationsgenauigkeit erhöht werden. Bei Hinzunahme weiterer Datenquellen, die Informationen über die Lage von Gewerbe, öffentliche Gebäude und Industrie liefern, ist eine detaillierte Auswertung der Realnutzung der Stadt möglich.

Auf Basis der von den Klassifikationsergebnissen und der visuellen Interpretation des Originalsatellitenbildes erstellten Stadtkarten wurden zusätzlich 3D-Visualisierungen erzeugt. Diese könnten zu einem 3D-Stadtmodell mit gemessenen Höhenangaben der Gebäude, gewonnen durch Auswertung von Stereobildern oder Laserscanner-messungen und einem höheren LOD ausgebaut werden.

Das an der Stadt Sanaa ausgearbeitete Verfahren ist auch auf andere Stadtstrukturen und Räume in humiden Gebieten anwendbar. Die dort herrschenden Bedingungen zur automatischen Erfassung der Stadtstrukturen sind gut bis sehr gut im Vergleich zu den Städten des ariden Raumes.

9. Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Konzeption, Entwicklung und exemplarische Implementierung eines generischen Verfahrens zur Erfassung, Verarbeitung, Auswertung und kartographischen Visualisierung urbaner Strukturen im altweltlichen Trockengürtel mittels hochauflösender operationeller Fernerkundungsdaten. Das Verfahren wird am Beispiel der jemenitischen Hauptstadt Sanaa einer Vertreterin des Typus der Orientalischen Stadt angewandt und evaluiert. Das zu entwickelnde Verfahren soll auf Standardverfahren und Systemen der raumbezogenen Informationsverarbeitung basieren und in seinen wesentlichen Prozessschritten automatisiert werden können.

Daten von hochauflösenden operationellen Fernerkundungssystemen (wie z.B. QuickBird, Ikonos u. a.) erlauben die Erkennung und Kartierung urbaner Objekte, wie Gebäude, Straßen und sogar Autos. Die mit ihnen erstellten Karten und den daraus gewonnenen Informationen können zur Erfassung von Urbanisierungsprozessen (Stadt- und Bevölkerungswachstum) herangezogen werden. Sie werden auch zur Generierung von 3D-Stadtmodellen genutzt. Diese dienen z.B. der Visualisierung für touristische Anwendungen, für die Stadtplanung, für Lärmanalysen oder für die Standortplanung von Mobilfunkantennen. Bei dem in dieser Arbeit erzeugten 3D-Visualisierung wurden jedoch keine Gebäudedetails erfasst. Entscheidend war vielmehr die Wiedergabe der Siedlungsstruktur, die im Vorhandensein und in der Anordnung der Gebäude liegt.

In dieser Arbeit wurden Daten des Satellitensensors Quickbird von 2005 verwendet. Sie zeigen einen Ausschnitt der Stadt Sanaa in Jemen. Die Fernerkundungsdaten wurden durch andere Daten, u.a. auch Geländedaten, ergänzt und verifiziert.

Das ausgearbeitete Verfahren besteht aus der Klassifikation der Satellitenbildaufnahme, die u.a. pixelbezogen und für jede Klasse einzeln (pixelbezogene Klassifikation auf Klassenebene) durchgeführt wurde. Zusätzlich fand eine visuelle Interpretation der Satellitenbildaufnahme statt, bei der einzelne Flächen und die Straßen digitalisiert und die Objekte mit Symbolen gekennzeichnet wurden. Die aus beiden Verfahren erstellten Stadtkarten wurden zu einer fusioniert. Durch die Kombination der Ergebnisse werden die Vorteile beider Karten in einer vereint und ihre jeweiligen Schwächen beseitigt bzw. minimiert.

Die digitale Erfassung der Konturlinien auf der Orthophotomap von Sanaa erlaubte die Erstellung eines Digitalen Geländemodells, das der dreidimensionalen Dar-

stellung des Altstadtbereichs von Sanaa diente. Die 3D-Visualisierung wurde sowohl von den pixelbezogenen Klassifikationsergebnissen auf Klassenebene als auch von der digitalen Erfassung der Objekte erstellt. Die Ergebnisse beider Visualisierungen wurden im Anschluss in einer Stadtkarte vereint.

Bei allen Klassifikationsverfahren wurden die asphaltierten Straßen, die Vegetation und einzeln stehende Gebäude sehr gut erfasst. Die Klassifikation der Altstadt gestaltete sich aufgrund der dort für die Klassifikation herrschenden ungünstigen Bedingungen am problematischsten. Die insgesamt besten Ergebnisse mit den höchsten Genauigkeitswerten wurden bei der pixelbezogenen Klassifikation auf Klassenebene erzielt. Dadurch, dass jede Klasse einzeln klassifiziert wurde, konnte die zu einer Klasse gehörende Fläche besser erfasst und nachbearbeitet werden. Die Datenmenge wurde reduziert, die Bearbeitungszeit somit kürzer und die Speicherkapazität geringer. Die Auswertung bzw. visuelle Validierung der pixelbezogenen Klassifikationsergebnisse auf Klassenebene mit dem Originalsatellitenbild gestaltete sich einfacher und erfolgte genauer als bei den anderen durchgeführten Klassifikationsverfahren. Außerdem war es durch die alleinige Erfassung der Klasse *Gebäude* möglich, eine 3D-Visualisierung zu erzeugen.

Bei einem Vergleich der erstellten Stadtkarten ergibt sich, dass die durch die visuelle Interpretation erstellte Karte mehr Informationen enthält. Die von den pixelbezogenen Klassifikationsergebnissen auf Klassenebene erstellte Karte ist aber weniger arbeits- und zeitaufwendig zu erzeugen. Zudem arbeitet sie die Struktur einer orientalischen Stadt mit den wesentlichen Merkmalen besser heraus.

Durch die auf Basis der 2D-Stadtkarten erstellte 3D-Visualisierung wird ein anderer räumlicher Eindruck vermittelt und bestimmte Elemente einer orientalischen Stadt deutlich gemacht. Dazu zählen die sich in der Altstadt befindenden Sackgassen und die ehemalige Stadtmauer. Auch die für Sanaa typischen Hochhäuser werden in der 3D-Visualisierung erkannt.

Insgesamt wurde in der Arbeit ein generisches Verfahren entwickelt, dass mit geringen Modifikationen auch auf andere städtische Räume des Typus orientalische Stadt angewendet werden kann.

Abstract

This study aims at the development and implementation of a generic procedure for the acquisition, processing, analysis and cartographic visualisation of urban space in arid zone cities based on operational remote sensing imagery. As a proof of concept the Yemeni capital Sanaa has been selected as a use case. The workflow developed is based on standard procedures and systems of spatial information processing and allows for subsequent automation of its essential processes. Today, high-resolution remote sensing data from operational satellite systems (such as QuickBird, Ikonos etc) facilitate the recognition and mapping of urban objects such as buildings, streets and even cars which, in the past could only be acquired by non-operational aerial photography. The satellite imagery can be used to generate maps and even 3D-representation of the urban space. Both maps and 3D-visualisations can be used for up-to-date land use mapping, zoning and urban planning purposes etc. The 3D-visualisation provides a deeper understanding of urban structures by integrating building height into the analysis.

For this study remote sensing data of the Quickbird satellite data of 2005 were used. They show a section of the city of Sanaa in Yemen. The remote sensing data were supplemented and verified by other data, including terrain data. The image data are then subjected to thorough digital image. This procedure consists of a pixel-oriented classification of the satellite image acquisition at class level. In addition, a visual interpretation of the satellite image has been undertaken to identify and label individual objects (areas, surfaces, streets) etc. which were subsequently digitised. The town maps created in both procedures were merged to one. Through this combination of the results, the advantages of both maps are brought together and their respective weaknesses are eliminated or minimized.

The digital collection of the contour lines on the orthophoto map of Sanaa allowed for the creation of a digital terrain model, which was used for the three-dimensional representation of Sanaa's historic district. The 3D-visualisation was created from the classification results as well as from the digital collection of the objects and the results of both visualisations were combined in a city map.

In all classification procedures, paved roads, vegetation and single buildings were detected very well. The best overall results with the highest accuracy values achieved in the pixel-oriented classification at class level. Because each class has been classified separately, size belonging to that class can be better understood and

optimised. The amount of data could be reduced, thus requiring less memory and resulting in a shorter processing time. The evaluation and validation of the pixel-oriented visual classification results at class level with the original satellite imagery was designed more simply and more accurately than other classification methods implemented. It was also possible by the separate recording of the class building to create a 3D-visualisation.

A comparison of the maps created found that the map created from visual interpretation contains more information. The map based on pixel-oriented classification results at class level proved to be less labor- and time-consuming, and the structure of an oriental city with the main features will be worked out better.

The 2D-maps and the 3D-visualisation provide a different spatial impression, and certain elements of an oriental city clearly detectable. These include the characteristic dead ends in the old town and the former city wall. The typical high-rise houses of Sanaa are detected in the 3D-visualisation.

This work developed a generic procedure to detect, analyse and visualise urban structures in arid zone environments. The city of Sanaa served as a proof of concept. The results show that the workflow developed is instrumental in detecting typical structures of oriental cities. The results achieved in the case study Sanaa prove that the process can be adapted to the investigation of other arid zone cities in the Middle East with minor modifications.

تعتمد علي مصفوفات ولغزومات رياضيه لحساب مدي دقه التصنيف والطريقهالثانيه تقليديه و تعتمد علي مقارنه النتائج ببعضها البعض.

اجمالا حاز تصنيف البكسل على أساس فردي لكل فئة علي حده علي اعلي قيم الدقه لنتائج التقييم. تميز هذا النوع من التصنيف والنادر عمله من قبل اختصاصي الاستشعار عن بعد بجعل كل فئه من التصنيف منعزله ومكون اساسي منفرد يسهل معالجته الياوبصريا كما انه تم خفض كميته البيانات الناتجه من هذه المعالجه اضافته الي قصر وسرعه المعالجه القدره من التقليل من السعه التخزينيه للبيانات الرقميه.

التقييم البصري لنتائج تصنيف البكسل على أساس فردي ولكل فئة علي حده، فقد قورنت كل فئه من فئات التصنيف مع البيانات الاصليه للقمر الصناعي من خلال وضعهما فوق بعض في برنامج ايرداس اميجن، من خلال هذه الطريقه يمكن تحديد مدي تطابق او تباين عمليه التصنيف الاليه.

من خلال هذا النوع من التصنيف تم عمل مجسمات تفاعليه ثلاثيه الابعاد وهذه العمليه تمت بطريقه اليه لم يتم التوصل لها من قبل، كل المجسمات ثلاثيه الابعاد تعد في اغلب خطواتها بطريقه يدويه بطيئه ومظنيه تكلف الكثير من الجهد والمال، علي عكس الطريقه التي تم تطويرها من قبل الباحث في هذه الدراسه.

خرائط 3D تعطي انطباعا وتصور يعكس الي حد ما الحيز المكاني الحقيقي والتباين في ارتفاعات المباني و التشكيل الهيكلية للمدن والتضاريس بتوعها واختلافها علي عكس خرائط 2D.

واخيرا الطريقه التي تم تنفيذها وتطويرها في هذه الدراسه يمكن تطبيقها علي اي مدينه.

في هذه الدراسة ، استخدمت بيانات من القمر الصناعي كويك بيرد التقطت في يوم 8 اغسطس عام 2005 م الساعة 10:51 بتوقيت اليمن لعرض جزء من مدينة صنعاء العاصمة اليمنية . الي جانب بيانات الاستشعار عن بعد استخدمت بيانات اخرى ، بما في ذلك DGM

الإجراء المتبعه في هذه الطريقه تتكون من وضع تصنيف لصور الأقمار الصناعية ، من بين أمور أخرى ، تم تنفيذ تصنيف البكسل على أساس فردي ولكل فئة علي حده وبشكل منفصل كما تم ايضا اجراء نوع اخر من التصنيف علي اساس البكسل ولكن لكل الفئات دفعه واحده بشكل غير منفصل. وبالإضافة إلى ذلك تم تفسير صوره القمر الصناعي ومن ثم تم تحديد المساحات المنفرده يدويا كالمقابر والمزارع والمساح والمواقف والحدائق كما تم تصنيف وتحديد شبكه المواصلات وتصنيفها الي 8 اصناف واخيرا صنف المباني الي 12 صنف حسب استخدامها وجعلها بيانات رقميه يمكن التعامل معها بشكل آلي. بعد ادخال كل هذه البيانات والمعلومات تم دمجها مع بعضها البعض و مع التصنيف الالي لان كل منهما يكمل الاخر والقضاء على نقاط الضعف الخاصة بكل منها و تقليلها. من اجل اخرج المنتج النهائي. يسمح التسجيل الرقمي للخطوط الكنتورية لصنعاء بواسطة Orthophotomap الي خلق نموذج التضاريس الرقميه ، والتي ساهمت في خلق تمثيل ثلاثي الأبعاد لمدينة صنعاء .

تم إنشاء خرائط ثلاثيه الابعاد تفاعليه معتمدا علي كل من نتائج تصنيف بكسل المستندة على مستوى الفئة الواحده وبشكل منفصل ، فضلا عن المباني المدخله والمحدده يدويا الي خارطه الرقميه. كما تم دمج نتائج خرائط الابعاد الثلاثيه التفاعليه لكل منهما الي خارطه واحده تفاعليه . الشوارع والنباتات وكذا المباني وخاصه المنعزله والكبيره منها كانت نتيجه تصنيفها ممتازه حسب نتائج التقييم ، لهذا الغرض تم استخدام طريقتين الاولي اليه

الخلاصه

هذه الأطروحة هي تنفيذ و تصميم وتطوير ونمذجة لطريقة اتوماتيكيه، فعالة لجمع ومعالجة وتحليل ورسم الخرائط ثنائيه وثلاثيه الابعاد للمدن والمعالم و التركيب الهياكلي للمناطق الحضرية في الحزام الجاف من العالم القديم باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد عالية الدقة. ويتجلى هذا الأسلوب على سبيل المثال في العاصمة اليمانية صنعاء كمثال علي انواع المدن الشرقية وتقييمها. هذا الاسلوب و الطريقه المطوره من قبل الباحث تعتمد علي عملية تقوم على إجراءات موحدة لبرمجيات وعمليات الاستشعار عن بعد ونظم معالجة المعلومات المكانية، والتي يمكن أن تتم بشكل ألي في خطواتها العملية الأساسية.

من البيانات عالية الدقة المتجدده في نظم الاستشعار عن بعد (مثل منتجات كويك بيرد ، ايكونوس ، إلخ.) تسمح بتحديد ورسم خرائط وعمل قياسات و تحليلات للمناطق الحضرية مثل المباني والشوارع وحتى السيارات. والتي يمكن استخدامها لاستخلاص انواع عده من عمليات التحضر (كالنمو والتطور الحضري والسكاني و تحديد وتمييز كثافه و نوع المعالم و التجمعات العمرانيه والبنويه و النباتيه كما يمكن تحديد شبكه الطرق والمواصلات و تصنيفاتها و تكويناتها)

كما أنها تستخدم لتوليد نماذج الابعاد الثلاثيه (3D) للمدن. وتستخدم هذه على سبيل المثال للتطبيقات في مجال السياحة لتخطيط المدن ، في تحليل الضوضاء ، أو من أجل التخطيط لوضع اماكن هوائيات الهواتف المحموله و البث الارضيه والفضائيه وغيرها.

نتج عن هذا العمل نموذج الابعاد الثلاثيه للمدن لكن لم تسجل أية تفاصيل للمباني. وكان العامل الحاسم هو البنيه الهيكلية للمباني

Quellenverzeichnis

- ABMAYR, W. 1994. Einführung in die digitale Bildverarbeitung, Stuttgart.
- AGGN. 2007. Standard arabic system for transliteration of geographical names from arabic alphabet to latin alphabet. *In: Third Arab Conference on Geographical Names*, 30-31.05. 2007 New York.
- AHMED, M., ASMAR, H. & ALI, E. 2009. Near-Real time land-use planning of the northern zone of the Nile delta coast, Egypt. *In: Survey of the Hydraulic Resources and of Desertification by Using the Geographic Information Systems, Remote Detection and Numeric Designing*, 16-20.12. 2009 Tunis, Tunesien. 70-72.
- AL ASHAWY, A. 1997. Die Stadt: Struktur und ihre Umlandbeziehungen, (Original arabisch) Sanaa.
- AL ASHWAL, A. 2008. Land evaluation using remote sensing and GIS technology for major crops grown in Amran valley, Yemen Republic. Diss., University of Pune.
- AL AWATHI, T. 2009. Einsatz der Fernerkundung und geographischen Informationssysteme in der Überwachung von Grünflächen in Dhofar Governorate, Oman. *In: Survey of the Hydraulic Resources and of Desertification by Using the Geographic Information Systems, Remote Detection and Numeric Designing*, 16-20.12. 2009 Tunis, (Original arabisch) Tunesien. 13-14.
- AL BALDAWI, A. 2009. Integration of RS & GIS to Study and Mapping Sand Encroachment and Mobile Dunes in Iraq. *In: Survey of the Hydraulic Resources and of Desertification by Using the Geographic Information Systems, Remote Detection and Numeric Designing*, 16-20.12. 2009 Tunis, Tunesien. 31-32.
- AL SAADY, A. 1988. Die Stadt Sanaa. *In: Geographische Zeitschrift der geographischen Gesellschaft in Kuwait*, (Original arabisch) Band 155.
- AL SAUD, M. 2009. Fernerkundung zum Studium der Sandbewegung und der Mittel zur Kontrolle und ihre Installation. *In: Survey of the Hydraulic Resources and of Desertification by Using the Geographic Information Systems, Remote Detection and Numeric Designing* 16-20.12 2009 Tunis, (Original arabisch) Tunesien. 21-22.
- ALBERT, J., BACHMANN, M. & HELLMEIER, A. 2003. *Zielgruppen und Anwendungen für Digitale Stadtmodelle und Digitale Geländemodelle - Erhebungen im Rahmen der Arbeitsgruppe „Anwendungen und Zielgruppen“ der SIG3D im Rahmen der Initiative GDI-NRW* [Online]. Bonn. http://www.ikg.uni-bonn.de/fileadmin/sig3d/pdf/Tabelle_Anwendungen_Zielgruppen.pdf [Accessed 03/2010].

- ALBERTZ, J. 2001. Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, Darmstadt.
- ALBERTZ, J. 2007. Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, Darmstadt.
- ALTMANN, D. G. 1991. Practical statistics for medical research, London.
- AWAWDEH, M. 2009. Integrated GIS and remote sensing for mapping groundwater potential zones in Tulul al Ashaqif highlands, NE Jordan. *In: Survey of the Hydraulic Resources and of Desertification by Using the Geographic Information Systems, Remote Detection and Numeric Designing* 16-20.12. 2009 Tunis, Tunisien. 60-61.
- BAATZ, M. U. & SCHÄPE, A. 2000. Multiresolution segmentation: An optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *In: STROBL, J., BLASCHKE, T., GRIESEBNER, G. (ed.) Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT Symposium Salzburg, Heidelberg.*
- BANZHAF, E., HANNEMANN, K., MARTINI, M., GRESCHO, V. & NETZBAND, M. 2007. *Monitoring the urban development with integrated system from rs observation and GIS information* [Online]. Paris, France: 4th IEEE GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (URBAN 2007). 6th int. Symp. Remote Sensing of Urban Areas (URS 2007). <http://www.ufz.de/data/Banzhaf-URS20075402.pdf> [Accessed 10/2009].
- BÄSSMANN, H. & BESSLICH, P. W. 1989. Konturorientierte Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung, Berlin, Heidelberg, New York.
- BAUER, T. & STEINNOCHER, K. 2000. Objektbasierte Auswertung von hochauflösenden Fernerkundungsdaten in urbanen Räumen. *In: STROBL, J., BLASCHKE, T., GRIESEBNER, G. (ed.) Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium. Heidelberg.*
- BAUER, W. & MOHL, H.-U. 2004. Das 3D-Stadtmodell der Landeshauptstadt Stuttgart. *In: COORS, V., ZIPF, A. (ed.) 3D-Geoinformationssysteme*
- BILL, R., ZEHNER, L. & NAUMANN, M. 2001. *Geoinformatik-Service* [Online]. Universität Rostock. <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/lexikon.asp> [Accessed 10/2008].
- BLASCHKE, T., GLÄßER, C. & LANG, S. 2002. Bildverarbeitung in einer integrierten GIS/Fernerkundungsumgebung - Trends und Konsequenzen. *In: BLASCHKE, T. (ed.) Fernerkundung und GIS - Neue Sensoren, innovative Methoden.* Heidelberg.
- BLASCHKE, T. & STROBL, J. 2001. *What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS* [Online]. <http://courses.washington.edu/cfr530/GIS200106012.pdf> [Accessed 04.2010].

- BORG, E., HOLZER-POPP, T., BITTNER, M., DECH, S., ERBERTSEDER, T., FICHELTMANN, B. & SCHROEDTER, M. 2000. Verfahren zur automatischen Atmosphärenkorrektur multispektraler Fernerkundungsdaten. *In:* 16. Nutzungsseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums der DLR/DLR-Mitteilungen 1999-03, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt. 145 -156.
- BRENNER, M. 2006. *3D-Stadtmodelle im Aufwind, von Matthias Merian zum Laserscanning* [Online]. scinexx - das Wissensmagazin. http://www.g-o.de/geounion-aws_basics-4723.html [Accessed 11/2009].
- BUNDESZENTRALE FÜR POLITISCHE BILDUNG. 2006. *Verstädterung* [Online]. <http://www.bpb.de/files/HBW2V2.pdf> [Accessed 01/2010].
- CAMA 2004. Klimadaten: Lufttemperatur, Niederschlag und Luftfeuchtigkeit für die Stadt Sanaa im Jahre 2004. *In:* GENERAL DIRECTORATE OF CLIMATE (ed.). Sanaa: Meteorological Service.
- CHEN, M. 1994. Spektrale Sonnenbestrahlungsstärke: Messungen, Modellrechnungen, aktinische Bewertung. Diss., Technische Universität Berlin.
- CONGALTON, R. G. & GREEN, K. 1999. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices, Boca Raton.
- COPPIN, P., JONCKHEERE, I., NACKAERST, K., MUYS, B. & LAMBIN, E. 2004. Review Article. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (9), 1565-1596.
- CSO (ed.) 2004. *Statistical year book by the general population housing and establishment census*, Sanaa: Central Statistical Organisation.
- CSO (ed.) 2007. *Statistical year book 2006, by the general population housing and establishment census*, Sanaa: Central Statistical Organisation.
- CYBERCITY. 2006. *CyberCity erstellt 3D Stadtmodelle aus Quickbird Satellitenbildern* [Online]. http://www.geobranchen.de/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=1979 [Accessed 11/2009].
- DETTMANN, K. 1969. Islamische und westliche Elemente im heutigen Damaskus. *Geographische Rundschau*, Band 21, Heft 2, 64-68.
- DIGITALGLOBE. 2008. *The world's highest resolution commercial satellite (QuickBird)* [Online]. <http://www.digitalglobe.com> [Accessed 01.02. 2008].
- DOLD, C., C., B. & JÜLGE K. 2003. *Integration von luftgestützten und terrestrischen Methoden zur Ableitung von 3-D Stadtmodellen* [Online]. http://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/publications/Konferenzbeitraege_abstract_review/DoldBrennerJuelge_2003.pdf [Accessed 11/2009].

- EHLERS, E. 1993. Die Stadt des islamischen Orients. Modell und Wirklichkeit. *Geographische Rundschau*, Band 45, Heft 1, 32-39.
- EHLERS, M. 2002. Fernerkundung für GIS-Anwender – Sensoren und Methoden zwischen Anspruch und Wirklichkeit. In: STROBL, J., BLASCHKE, T., GRIESEBNER, G. (ed.) *GIS und Fernerkundung: Neue Sensoren – Innovative Methoden*. Heidelberg.
- EHLERS, M., GÄHLER, M. & JANOWSKY, R. 2003. Automated analysis of ultra high resolution remote sensing data for biotope type mapping: new possibilities and challenges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 315-326.
- ERDAS 2008. *Erdas Imagine Field Guide™*. Atlanta, Georgia.
- ESCH, T., ROTH, A. & STRUNZ, G. 2004. Object-oriented approach towards a semi-automated classification of urban areas. In: Umweltbundesamt Texte 04/04, 20-21. 01. 2004 Berlin. Workshop CORINE Land Cover 2000 in Germany and Europe and its use for Environmental Applications, 260 - 264.
- GEOVILLE, G. 2009. *Satellitendaten unterstützen Maßnahmen gegen die Weltwirtschaftskrise, GeoVille verknüpft für die Weltbank satellitenbasierte Geoinformation mit Wirtschaftsdaten um Leben zu retten* [Online]. www.ffg.at/getdownload.php?id=3896 [Accessed 01/2010].
- GOTLIEB, C. & KREYSZIG, H. 1990. Texture descriptors based on co-occurrence matrices. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 51/1, 70-86.
- GRÖGER, G., KOLBE, T. H. & CZERWINSKI, A. 2007. *CityGML Implementation Specification* [Online]. http://portal.opengeospatial.org/modules/admin/license_agreement.php?suppressHeaders=0&access_license_id=3&target=http://portal.opengeospatial.org/files/index.php?artifact_id=22120 [Accessed 5.3.2010].
- GROTEPAß, H. J. 1992. Ein Verfahren zur dreidimensionalen Texturanalyse in Grauwertvolumina, Düsseldorf.
- HARALICK, R. M., SHANMUGAN, I. & DINSTEN, I. 1973. Textural Features for Images Classification. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 3(6), 610-621.
- HASSO-PLATTNER-INSTITUT FÜR SOFTWARESYSTEMTECHNIK. 2007 *3D-Elbflorenz im Netz, Weltgrößtes 3D-Stadtmodel auf Google Earth veröffentlicht* [Online]. <http://www.g-o.de/wissen-aktuell-6781-2007-07-10.html> [Accessed 11/2009].
- HAYDN, R., DALKE, G. W., HENKEL, J. & BARE, J. E. 1982. Application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement. In: Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands, 1982 Cairo, Egypt. 599–616.

- HEINEBERG, H. 2000. Stadtgeographie. Grundriss Allgemeine Geographie, Paderborn.
- HEINEBERG, H. 2006. Stadtgeographie. Grundriss Allgemeine Geographie, Paderborn.
- HEROLD, M., SCEPAN, J. & CLARKE, K. 2002. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. *Environment and Planning*, 34 (8), 1443–1458.
- HEROLD, M., SCEPAN, J. & CLARKE, K. 2006. Urban patterns and processes: a remote sensing perspective. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 4, 265-276.
- HILDEBRANDT, G. 1996. Fernerkundung und Luftbildmessung: für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie, Heidelberg.
- HOFFER, R. & JOHANNSEN, C. 1969. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: P. L. JOHNSON (ed.) *Remote Sensing in Ecology*. University of Georgia, Athens, USA.
- HOFFMANN, P. 2001. Detecting buildings and roads from ikonos data using additional elevation information. *GIS*, 6/01, 28–33.
- HOLZER-POPP, T., BITTNER, M., BORG, E., DECH, S., ERBERTSEDER, T., FICHELTMANN, B. & SCHROEDTER, M. 2001. Das automatische Atmosphärenkorrekturverfahren "DurchBlick". *Fernerkundung und GIS: neue Sensoren - innovative Methoden*. Heidelberg.
- HOLZER-POPP, T., BITTNER, M., BORG, E., DECH, S., ERBERTSEDER, T., FICHELTMANN, B. & SCHROEDTER, M. 2002. Process for correcting atmospheric influences in multispectral optical remote sensing data. US 6,484,099 B1.
- HÜNEFELD, K. 2010. Imam Yahya Hamid ad-Din und die Juden in Sanaa (1904-1948), Berlin.
- JÄHNE, B. 2002. Digitale Bildverarbeitung, Berlin.
- JANSA, J. & STANEK, H. 2003. *Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen* [Online]. http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/VGI%204_2003/Jansa_Stanek.pdf [Accessed 11/2009].
- KADA, M. 2007. Zur maßstabsabhängigen Erzeugung von 3D-Stadtmodellen. Diss., Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart.
- KLETTE, R. & ZAMPERONI, P. 1995. Handbuch der Operatoren für die Bildbearbeitung, Braunschweig/Wiesbaden.

- KOCH, B., JOCHUM, M., IVITS, E. & DEES, M. 2003. Pixelbasierte Klassifizierung im Vergleich und zur Ergänzung zum objektbasierten Verfahren. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Heft 3, 195-204.
- KOCH, W. 1995. Analyse und Visualisierung geowissenschaftlicher Daten mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung und eines Geo-Informationssystems. Diss., FU Berlin.
- KOPP, H. & WIRTH, E. 1990. Beiträge zur Stadtgeographie von Sanaa, Wiesbaden.
- KRAUS, K. & SCHNEIDER, W. 1988. Fernerkundung. Band 1. Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken, Bonn.
- LAKES, T., KIM, H. O. & KENNEWEG, H. 2005. Mapping sealed surfaces in metropolitan areas – applications in planning in Berlin and Seoul. *In: Proceedings of 1st International Congress on Environmental Planning and Management*, 11-15.09. 2005 Brasilia, Brazil.
- LANDIS, J. R. U. & KOCH, G. G. 1997. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159-174.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., & CHIPMAN, J. W. 2004. Remote sensing and image interpretation, New York.
- LO, C. P. & WATSON, L. J. 1998. The influence of geographic sampling methods on vegetation map accuracy evaluation in a swampy environment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64/12, 189-1200.
- LÖFFLER, E. 1994. Geographie und Fernerkundung, Stuttgart.
- LÜCKE, M. 1993. Stadtplanung Sanaa. *Jemen Report*, Band 24, Heft 2, 23-30.
- LUEBKE, D., REDDY, M., COHEN, J., D., VARSHNEY, A., WATSON, B. & HUEBNER, R. 2003. Level of Detail for 3D Graphics, San Francisco.
- LUHMANN, T. 2003. Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Heidelberg.
- MASHEE, H. & MALTHUS, T. 2009. Object-oriented image analysis for monitoring urban expansion in the city of Riyadh, Saudi Arabia. *In: SPIE Europe Remote Sensing*, 31.08–03.09 2009 Berlin, Germany.
- MCCARTHY, J. 1979. Ottoman sources on Arabian population. *Studies in the History of Arabia*, 1(2), 113 -133.
- MEYER, F. 2003. Die "islamisch-orientalische Stadt". Noch immer ein eigenständiger kulturgenetischer Stadttyp? *Bayreuther Kontaktstudium Geographie*, 2, 63-88.
- MOSCH, M. 2005. 3D-Gebäudeextraktion aus Satellitenbildern suburbaner Regionen. Diss., Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.

- NASA. 1999. *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)* [Online]. http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_1.php [Accessed 03/2009].
- ORTIZ, M. J., FORMAGGIO, A. R. & EIPHANIO, J. C. N. 1997. Classification of croplands through integration of remote sensing, gis and historical database. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 95-105.
- OUTAIBI, E. 2009. Satellite Remote Sensing Technologies for Water Studies, Assir Province; Saudi Arabia. In: Survey of the Hydraulic Resources and of Desertification by Using the Geographic Information Systems, Remote Detection and Numeric Designing 16-20.12. 2009 Tunis, Tunisien. 68-70.
- PERGANDE, G. 2008. *3D-Stadtmodell* [Online]. Bremerhaven: Vermessungs- und Katasteramt www.bremerhaven.de/downloads/397/21564/3d-Stadtmodell.pdf [Accessed 08.03.2010].
- POPP, T. 1993. Korrektur der atmosphärischen Maskierung zur Bestimmung der spektralen Albedo von Landoberflächen aus Satellitenmessungen. Diss., Universität München.
- POPP, T. 1995. Correcting Atmospheric Masking to Retrieve the Spectral Albedo of Land Surfaces from Satellite Measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 3483-3508.
- REDER, J. 2002. Automatische Detektion neuer Siedlungsflächen durch Vergleich hochauflösender Satellitenbilddaten. In: BLASCHKE, T. (ed.) *Fernerkundung und GIS: Neue Sensoren – innovative Methoden*. Heidelberg.
- REDER, J. 2004. Entwicklung eines halbautomatisierten Verfahrens zur Detektion neuer Siedlungsflächen durch vergleichende Untersuchungen hochauflösender Satelliten- und Luftbilddaten. Diss., Technische Universität Dresden.
- RIEHELMANN, L. 2009. *Forum Erdkunde* [Online]. <http://www.uni-kiel.de/ewf/geographie/forum/hintergr/NDVI/ndvitext.html> [Accessed 29.11.2009].
- SCHILLING, A., BLECHSCHMIED, H. & JASNOCH, U. 2004. Datenbank-basierte Visualisierung von Hamburg. In: COORS, V., ZIPF, A. (ed.) *3D-Geoinformationssysteme*.
- SCHLOTT-KOTSCHOTE, A. 2004. Transkription arabischer Schriften : Vorschläge für eine einheitliche Umschrift arabischer Bezeichnungen, Berlin.
- SCHWIDEFSKY, K. & ACKERMANN, F. 1976. *Photogrammetrie : Grundlagen, Verfahren, Anwendungen*, Stuttgart.
- SEGER, M. 1975. Strukturelemente der Stadt Teheran und das Modell der modernen orientalischen Stadt. *Erdkunde*, Band 29, Heft 1, 21-38.

- SEGER, M. 1997. Teheran von Schah zu Schia. Metropolitane Entwicklung unter gegensätzlichen Rahmenbedingungen. *Mega-Cities*.
- SIEBER, A. J. 1986. Physikalische Grundlagen der Fernerkundung. *In: FORSCHUNGSBERICHT* (ed.). Institut für Hochfrequenztechnik Oberpfaffenhofen.
- SOILLE, P. 1998. Morphologische Bildverarbeitung: Grundlagen, Methoden, Anwendungen, Berlin.
- STEINBRECHER, R. 1993. Bildverarbeitung in der Praxis, München/Wien.
- STONER, E. R., BAUMGARDNER, M. F. 1981. Characteristic variations in reflectances of surface soils. *Soil Science Society of America*, 45, 1161-1165.
- SWAIN, P. N. & DAVIS, S. M. 1978. Remote Sensing: The quantitative approach, New York.
- THIELEBEIN, J. 2000. Sanaa zwischen Tradition und Moderne. *Zeitschrift des Deutschen Entwicklungsdienstes*, 2, 29-30.
- TOMOWSKI, D., EHLERS, M., MICHEL, U. & BOHNMANN, G. 2006. Objektorientierte Klassifikation von Siedlungsflächen durch multisensorale Fernerkundungsdaten. *gi-Report*. Institut für Geoinformatik und Fernerkundung (IGF) ed. Osnabrück.
- UNDP. 2006. *World Urbanization Prospects: The 2005 Revision* [Online]. New York. http://www.un.org/esa/population/publications/WUP2005/2005WUPHighlights_Final_Report.pdf [Accessed 10.11.2009].
- UNDP. 2009. *United Nations Population Division Policy Brief No. 2009/1* [Online]. New York. http://www.un.org/esa/population/publications/UNPD_policybriefs/UNPD_policy_brief1.pdf [Accessed 9.10.2009].
- USGS. 2000. *United States Geological Survey, Global Visualization Viewer* [Online]. http://glovis.usgs.gov/lmgViewer/Java2lmgViewer.html?limitMissions=FALSE&mission=LANDSAT_ARCHIVE&sensor=SLCOFF&lat=14.8&lon=45.7 [Accessed 04.02. 2006].
- VAN DE VOORDE, T., CHORMANSKI, J., BATELAAN, O. & CANTERS, F. 2006. Multi-Resolution impervious surface mapping for improved runoff estimation at catchment level. *In: First Workshop of the EARSeL-SIG Urban Remote Sensing: Urban Remote Sensing, Challenges and Solutions*, 2-3.03. 2006 Berlin, Deutschland.
- WEBER, J. 1992. Erfassung vegetationsbestandener Flächen mittels hochauflösender Satellitensensoren – Untersuchungen in München. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 3, 79-84.
- WEITZIG, B. 2006. 3D-Stadtmodellierung auf heterogenen Ausgangsmodellen mittels evolutionärer Algorithmen. Diss., Institut für Kartographie und

Geoinformation. Hohe Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität zu Bonn.

WIRTH, E. 1975. Die orientalische Stadt. Ein Überblick aufgrund jüngerer Forschungen zur materiellen Kultur. *Saeculum*, Band 26, Heft 1, 45-94.

WIRTH, E. 2000. Die orientalische Stadt im islamischen Vorderasien und Nordafrika. Städtische Bausubstanz und räumliche Ordnung, Wirtschaftsleben und soziale Organisation, Mainz.

ZEUG, G. & ECKERT, S. 2009. Analyse zum Stadt- und Bevölkerungswachstum in Sanaa anhand von Satellitenbilddaten. *Jemen Report*, Band 40, Heft 1, 43-47.

ZHANG, Y. & ALBERTZ, J. 1998. Vergleich verschiedener Verfahren zur Kombination multisensoraler Satellitenbilddaten. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, Heft 5, 261-274.

Bilderverzeichnis

Abb. 6.2.1-3: Bild A - C: Kennzeichnung der verschiedenen Dachmaterialien, siehe Tabelle 6.2.1-1.; Bild D: Satellitenbildausschnitt als Zuordnung zu Bild B. Quellen: Bild A: Lampe, Bild B: Urbanalyst, Bild C: Arthus-Bertrand, Y. Eigene Darstellung.

Bild A: Lampe, R. 2004 Reise in den Jemen.

Bild B: Urbanalyst

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/1184725.jpg>, Uploaded Am March 5, 2007.

Bild C: Arthus-Bertrand, Y.,

http://yannarthusbertrand2.org/index.php?option=com_datsogallery&Itemid=27&func=detail&catid=101&id=1852&l=1280.

Abb. 6.2.1-4: Straßenstrukturen und Baumaterialien: A) Kanal aus Asphalt genutzt als Straße; B) Kanal führt Wasser; C) mehrspurige Asphaltstraße D) Pflasterstraße in der Altstadt Quellen: Bild A von Mofadhl Y., Bild B von Aljadaby A., Bild C von Alhameedy, Bild D von Urbanalyst. Eigene Darstellung.

Bild A: Mofadhl Y.,

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/14792874.jpg>, Uploaded Am October 7, 2008.

Bild B: Aljadaby A.

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/11575792.jpg>, Uploaded Am June 27, 2008.

Bild C: Alhameedy

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/6425062.jpg>, Uploaded Am December 11, 2007.

Bild D: Urbanalyst

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/4357931.jpg>, Uploaded Am September 3, 2007.

Abb. 6.2.1-5: Vegetationsarten: A) Bäume, B) und C) Ackerflächen, D) Wiese/ Park; Quellen: Bild A von Alsindi, Bild B und C von Urbanalyst, D: von Muhammed Saleh.

Bild A: Alsindi F.

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/3632341.jpg>, Uploaded Am July 30, 2007.

Bild B: Urbanalyst

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/1198798.jpg>, Uploaded Am March 6, 2007.

Bild C: Urbanalyst

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/1184498.jpg>, Uploaded Am March 5, 2007

Bild D: Muhammed Saleh

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/10973932.jpg>, Uploaded Am May 18, 2007.

Abb. 6.2.1-6: Brachflächen: A) Hügel am Stadtrand; B) Bauland; C) Friedhof; D) Sportplatz Quellen: Bild A von Alhashdi, Bild B von Urbanalyst, C von Alqafary, M., Bild D von Alkabus.

Bild A: Alhashdi

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/3421855.jpg>, Uploaded Am July 20, 2007.

Bild B: Urbanalyst

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/1198661.jpg>, Uploaded Am March 6, 2007.

Bild C: Alqafary, M.

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/24215107.jpg>. Uploaded Am July 7, 2009.

Bild D: Alkabus

<http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/10206813.jpg>. Uploaded Am May 14, 2008.

Anhang

Anhang I: Validationsergebnisse der Konfusionsmatrizen der pixelbezogenen Klassifikationen auf Bild- und Klassenebene

Tab. I.1: Fehlermatrix der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene vor der Nachbearbeitung

Klassen	Brachflächen	Gebäude	Vegetation	Straßen	Zeilen-summe	Nutzerge-nauigkeit (UA)
Brachflächen	181	15	6	13	215	85%
Gebäude	32	183	1	6	222	82%
Vegetation	0	0	34	0	34	100%
Straßen	28	7	3	91	129	71%
Spaltensumme	241	205	44	110	489/ /600	-----
Hersteller-genauigkeit (PA)	75%	90%	77%	83%	-----	81.50%

Overall Classification Accuracy (OA) = 81,50 %

Tab. I.2: Fehlermatrix der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene nach der Nachbearbeitung

Klassen	Brachflächen	Gebäude	Vegetation	Straßen	Zeilen-summe	Nutzerge-nauigkeit (UA)
Brachflächen	193	4	11	7	215	90%
Gebäude	18	193	2	4	217	89%
Vegetation	0	0	48	0	48	100%
Straßen	27	1	0	92	120	77%
Spaltensumme	238	198	61	103	526/ /600	-----
Hersteller-genauigkeit (PA)	81%	97%	79%	89%	-----	87.67%

Overall Classification Accuracy (OA) = 87,67%

Tab. I.3: KAPPA-Koeffizienten der pixelbezogenen Klassifikationen

Klassen	KK, Bildebene vor Verbesserung	KK, Bildebene nach Verbesserung	KK, Klassenebene, vor Verbesserung	KK, Klassenebene nach Verbesserung
Brachflächen	0.7357	0.8304	0,8333	0.7105
Gebäude	0.7332	0.8349	0,8529	0.8929
Vegetation	1.0000	1.0000	1.0000	0.9983
Straßen	0.6393	0.7183	0,7143	0.8513
Gesamt Kappa	0.7304	0.8228	0,8501	0.8633

Tab. I.4: Nutzer (UA)- und Gesamtgenauigkeiten (OA) der pixelbezogenen Klassifikationen

Klassen	UA vor der Verbesserung (Bildebene)	UA nach der Verbesserung (Bildebene)	UA/PU/OA vor Verbesserung (Klassenebene)	UA/PU/OA , nach Verbesserung (Klassenebene)
Brachflächen	85,00%	90,00%	85,00%	90,50%
Gebäude	82,00%	89,00%	86,11%	96,50%
Vegetation	100 %	100 %	100 %	99,83%
Straßen	71,00%	77,00%	75,00%	96,67%
Gesamtgenauigkeit, OA	81,50%	87,67%	Ø 86,53%	Ø 95,88%

Tab.I.5: Herstellergenauigkeiten (PU) der pixelbezogenen Klassifikation auf Bildebene

Klassen	PU vor der Verbesserung (Bildebene)	PU nach der Verbesserung (Bildebene)
Brachflächen	75%	81%
Gebäude	90%	97%
Vegetation	77%	79%
Straßen	83%	89%

Anhang II: Ergebnisse der Flächenberechnung der pixelbezogenen Klassifikationsverfahren im Vergleich

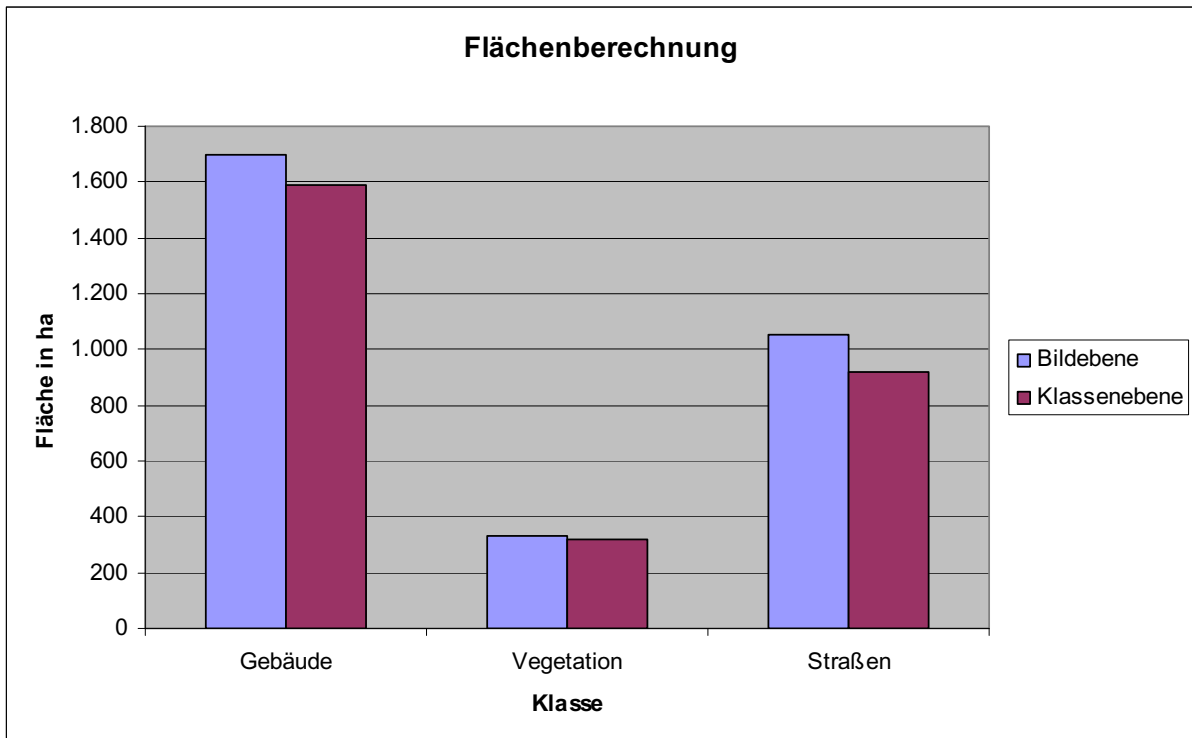


Abb. II.1: Flächenberechnung der Klassen der pixelbezogenen Klassifikationsverfahren auf Bildebene und auf Klassenebene nach der Nachbearbeitung

Tab. II.1: Flächenberechnung der pixelbezogenen Klassifikationen auf Bild- und Klassenebene nach der Nachbearbeitung. Angaben in ha.

Klasse	Auf Bildebene	Auf Klassenebene
<i>Gebäude</i>	1.698,543864	1.587,762000
<i>Vegetation</i>	332,771436	319,922064
<i>Straßen</i>	1.051,241688	920,666736
Summe	3.082,556988	2.828,350800

Anhang III: Zusammenstellung der Vorschläge zur Transkription arabischer Namen und Begriffe

Tab. III-1: Zusammenstellung der Vorschläge zur Transkription arabischer Begriffe und Namen. Eigene Darstellung.

المقابل Entsprechung				مثال Beispiel		المقابل Entsprechung		الحرف Zeichen
von Schlott-Kotschote (2004)				Romanize von LOAS1971	العربية	nach ADEGN		
NT ¹¹	DMG	IPA	EJPD			AGGN 2007	LOAS 1971	
ā	ā	a:	a	Arbīl	أربيل	A	A	أ
b	b	b	b	Banhā	بنا	B	B	ب
t	t	t	t	Tadmur	تدمر	T	T	ت
th	t	θ	th	Tharthār	ثرثار	TH	Th	ث
dj	ǧ	dʒ	j	Jabal	جبل	J	J	ج
h	ḥ	ħ	h	Hims	حمص	H	H	ح
kh	ḫ	x	kh	Khaybar	خيبر	KH	Kh	خ
d	d	d	d	Dammām	دمام	D	D	د
dh	d / z	ð	dh / z	Dhahbān	ذهبان	DH	Dh	ذ
r	r	r	r	Rafaḥ	رفح	R	R	ر
z	z	z	z	Zabīd	زبيد	Z	Z	ز
s	s	s	s	Sīna'	سيناء	S	S	س
sh	š	ʃ	sh	Shibīn	شبين	SH	Sh	ش
s	/ sʃ	ʃs	s	Ṣafad	صفد	S	S	ص
d	ḍ / ḏ	ʔd	d / z	Dab'ah	ضبعه	D	D	ض
t	t / t / d	ʔt	t	Tanṭa	طنطا	I	I	ط
z	ẓ	ʔz	z	Zhahrān	ظهران	DH	Zh	ظ
³	c	ʔ	'	A'kkā	عكا	A'	A'	ع بالفتحة
				I'rāq	عراق	I'	I'	ع بالكسرة
				U'mān	عمان	U'	U'	ع بالضممة
				Ba'labak	بعلبك	'	'	ع بالسكون (وسط الكلمة)
gh	ǧ	ɣ	gh	Ghadīr	غدير	GH	Gh	غ
f	f	f	f	Fālūjah	فالوجة	F	F	ف
q	q	q	q	Qaṭar	قطر	Q	Q	ق
k	k	k	k	Kūt	كوت	K	K	ك
l	l	l	l	Lībyā	ليبيا	L	L	ل
m	m	m	m	Miṣr	مصر	M	M	م
n	n	n	n	Njad	نجد	N	N	ن
h	h	h	h	Hīt	هيت	H	H	هـ

¹¹ Vorschläge von Schlott-Kotschote (2004)

w	w /v	w	w	Wahrān	وهران	W, Ū	W	و
iy	ī	i:	i	Yaman	يمن	Y, Ī	Y	ي
				Karblā	كربلاء	ā	ā	همزه اخر الكلمه
				Bi'r	بئر	‘i	‘i	همزه وسط الكلمه
a	a	a	a	Tal	تل	A’	A	الفتحة
i	i	i	i	Irbid	إربد	I’	I	الكسرة
u	u	u	u	Al Quds	القدس	U’	U	الضمة
ā	ā	a:	a	Bāb A Mandab	باب المنذب	ā	ā	الفتحة مع الألف
ā	ā	a:	a	Al Madīnah	المدينة	ī	ī	الكسرة مع الياء
uw	ū	u:	u	Sūr	صور	ū	ū	الضمة مع الواو
-a/- at/	-a/- ah/-at	-a/-at	ah/-a	Muṣrātah	مصراته	H	H	التاء المربوطة (ه)
				Birket as-Saba’	بركة السبع	T	T	التاء المربوطة (ة) في الجملة المركبة