

**Die automatische Identifizierung und Erfassung von tropischen
Bäumen an Probenflächen in Kolumbien und Ecuador anhand von
digitalen Bildinformationen und Oberflächenmodellen**

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

zur

**Erlangung des Doktorgrades der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf**

vorgelegt von

Javier Francisco Gonzalez Patiño

aus Segovia - Kolumbien

Düsseldorf

2011

Gedruckt mit der Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Referent: Prof. Dr. Ekkehard Jordan

Korreferente: Prof. Dr. Stephen Conrad

Tag der mündlichen Prüfung: 28.Juni.2011

Abstract

The photogrammetry has experienced rapid developments in the last few years. They include the introduction of digital cameras with different technical characteristics, which provide a much better image quality and higher resolution, and the move into digital analysis software with improved algorithms for the generation of digital surface models (DSM) and ortophotomosaics.

This work studies the use of digital photogrammetric methods for the automatic capture of different types of tropical forests by means of high resolution middle format cameras and digital elevation models. Different aspects of the photogrammetric process, like the utilization of control points from LANDSAT-satellite images and SRTM-data as well as the lens calibration, were evaluated. The accuracy of the generation of digital surface and terrain models (DSMs and DTMs) and the automatic tree height calculation was also assessed. A method for the delineation of tree crowns through the use of tree height and spectral information is presented. Linear discriminant analysis (LDA) and maximum likelihood (ML) methods were employed to classify tree species. Test areas include two forest stands from Colombia and an oil palm plantation from Ecuador.

The use of control points from satellite data for the triangulation resulted in accuracies for the localization of one object within 10-20 m range. This represents a viable alternative to the measurement of control points in field. The current photogrammetric software permits the user to obtain DOMs with errors within 1 m for the tree crowns. Factors like terrain slope and tree density have a large influence on the exactness of the generated DTMs. Mean errors below 1.5 m were measured for flat or slightly inclined terrains as opposed to values up to 5.3 m in hilly areas.

The tree height calculation from the difference between DSM and DGM resulted in underestimations of this parameter. An alternative method was developed to delineate tree crowns by searching for tree height peaks over different scales, growing-region techniques and the detection of height minima along tree borders. This method produced success rates of over 92% in the palm plantations. However, the crown extraction in natural stands was significantly poorer, with only half of the crowns correct delineated. The classification of tree species in different forest communities demonstrated that only some of them can actually be correctly identified. The best result came from the use of discriminant functions on the 10 cm-photos, which provided accuracies of over 80% for 7 out of the 11 evaluated tree species. The combination of features like texture, color and 2D tree form along with LDA yielded the best results with accuracies of 81%. The utilization of exclusively RGB channels in conjunction with ML methods, with a rate of 43%, did not produce statistically significant results.

In view of the lack of investigations on photogrammetric approaches and applications for the characterization of the tropical forests, this work contributes to the development and automatization of the methods for the future research and inventory of the vast forest resources of these regions.

Kurzfassung

Die Photogrammetrie hat in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung durchlaufen. Sie beinhaltet u.a. die Einführung digitaler Messkameras verschiedenster Technik mit ständig größeren Auflösungen und besserer Aufnahme-Qualität und die Umstellung auf digitale Auswertesoftware mit immer leistungsfähigeren Algorithmen für die Erstellung von Oberflächenmodellen (DOMs) und Orthophotomosaiken.

In Rahmen dieser Arbeit wurde die Anwendung von digital-photogrammetrischen Methoden zur automatischen Erfassung von verschiedenen tropischen Waldbeständen aus hochauflösenden mittelformatigen Luftbildern und DOMs untersucht. Aspekte des photogrammetrischen Prozesses wie die Verwendung von Passpunkten aus Landsat-Satelliten- und SRTM-Daten und die Objektivkalibrierung wurden behandelt. Für forstwirtschaftliche Zwecke wurden die Genauigkeit der durch photogrammetrische Softwarepakete generierten digitalen Oberflächen- und Geländemodelle (DOMs und DGMs) sowie der Baumhöhenbestimmung analysiert. Eigene Methoden zur Kronenabgrenzung anhand von Baumhöhendaten, ergänzt durch spektrale Information, wurden entwickelt. Lineare Diskriminanz-Analyse (LDA) und Maximum-Likelihood-Klassifikatoren (ML) kamen für die Baumklassifizierung zur Anwendung. Die Untersuchung hat natürliche Waldbestände und Parkwälder Kolumbiens sowie eine Ölpalmplantage Ecuadors einbezogen.

Die Anwendung von aus Landsat-Satellitenbildern entnommenen Passpunkten für die Aerotriangulation ergab Genauigkeiten bei der räumlichen Ortsbestimmung eines Objektes im Bereich von 10-20 m. Diese Methode bietet daher eine preiswerte Alternative zu herkömmlichen DGPS-Messungen im Gelände. Die aktuellen photogrammetrischen Softwarepakete ermöglichen daraus die Erstellung von DOMs für Baumkronen mit mittleren Höhenfehlern unter 1 m. Bei der Erstellung von digitalen Geländemodellen nahmen Faktoren wie Geländeneigung und Bodenbedeckung großen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit. Während mittlere Höhenfehler unter 1,5 m in flachen Gebieten gefunden wurden, sind diese bis auf 5,3 m in hügeligen Bereichen gestiegen.

Die Berechnung der Baumhöhen aus der Differenz zwischen DOM und DGM ergaben eine Unterschätzung der tatsächlichen Werte. Die entwickelte Methode zur Baumkronenabgrenzung basiert auf der Suche von Baumhöhenmaxima auf mehreren Maßstabsebenen, Regionenwachstums-Verfahren sowie der Markierung von Minima zwischen Kronenrändern. Diese Methode hat bei Palmenplantagen Erfolgsquoten über 92% erbracht. Die Extraktion der Kronen in natürlichen Waldbeständen mit einer Vielzahl verschiedener Arten, war allerdings mit ca. 52%, nicht so erfolgreich. Die Klassifizierung von Baumarten in verschiedenen Waldbeständen hat gezeigt, dass bestimmte Spezies

gut identifiziert werden können. Das beste Ergebnis wurde für das 10 cm-Photomosaik mittels linearen Diskriminanzfunktionen erzielt, wo Trefferquoten über 80% für 7 aus 11 ausgewählten Baumarten erreicht wurden. Die Kombination von Merkmalen wie Textur, Farbe und 2D-Kronenform anhand LDA erbrachten die besten Ergebnisse mit einer mittleren Trefferquote von 81%. Die Verwendung von ausschließlich RGB-Farbkanälen mit Hilfe der ML-Methode, bei einer besten mittleren Trefferquote von 43%, war allerdings enttäuschend.

Aufgrund der bisherigen wenigen Untersuchungen unter Anwendung photogrammetrischer Methoden in Forstwissenschaft und Waldbau der Tropen stellt diese Arbeit einen wichtigen Beitrag zur ihrer weiteren Entwicklung und automatisierter Ansätze für zukünftige Walduntersuchungen und -inventuren in diesen Regionen dar.

Vorwort

An dieser Stelle danke ich all denjenigen, die mir das Zustandekommen der Doktorarbeit ermöglicht und mich bei der Umsetzung unterstützt haben. In erster Linie danke ich Herrn Prof. Jordan, der die vorliegende Arbeit geduldig betreute, für die zahlreichen inhaltlichen Anregungen und seine konstruktive Kritik insbesondere beim Überarbeiten des Textes.

Desweiteren gilt mein Dank Herrn PD Dr. Dr. Linder für seine wertvollen Hinweise und Korrekturen zu dieser Arbeit. Den ehemaligen Kommilitonen der Arbeitsgruppe des Geographischen Instituts der HHUD danke ich für das angenehme und freundliche Miteinander. Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Dr. Braitmeier bedanken, da er mir spontan bei sprachlichen Korrekturen immer ein kompetenter Ansprechpartner war. Herrn Sebastian Starkloff danke ich für seine wertvolle Hilfe bei der Übersetzung des zweitens Kapitels. Eine große Unterstützung für die verschiedensten Probleme war Frau Rennwanz. Sie war immer zur Stelle, wenn verwaltungstechnische Hürden genommen werden mussten. Ihr gebührt ganz besonderer Dank. Hier schließt sich auch der Dank für jene an, die in der Endphase der Arbeit beim sprachlichen Korrekturlesen mitgewirkt haben: Daniel Karsch und Mirko Schommer.

Mein Dank gilt auch dem ALBAN-Stipendiumprogramm, das durch finanzielle Förderung die vorliegenden Untersuchungen ermöglichten.

Wichtige Bilddaten wurden dem Projekt auch von Partnern aus der Privatwirtschaft zur Verfügung gestellt. Hier sind vor allem die Firmen DALE-Digital aus Quito, Geodesia aus Bogotá und Aerostudios aus Medellín zu nennen, die für uns Befliegungen mit der Kamera Rollei-Metric und Passpunkt-Messungen durchgeführt haben.

Meiner geliebten Frau Katty danke ich für ihre Geduld und ihre aufmunternden Worte. Ihre Toleranz und Unterstützung haben mich dazu veranlasst, das Ziel Promotion nicht aufzugeben.

Schließlich möchte ich auch meinen Eltern, die mir eine entsprechende Ausbildung ermöglicht und mich aus der Ferne unterstützt haben, herzlich danken. Muchas Gracias a ellos!!.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Kurzfassung	iii
Vorwort	v
Inhaltsverzeichnis	vi
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xiv
Verwendete Softwarepakete	xvi
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Glossar	xix
1 Einleitung	1
1.1 Einleitung und Literaturüberblick	1
1.2 Motivation	4
1.3 Zielsetzung	5
1.4 Aufbau der Arbeit	6
2 Arbeitsgrundlagen	8
2.1 Untersuchungsgebiete	8
2.1.1 Santa Fé de Antioquia, Kolumbien	9
2.1.2 Medellín, Kolumbien	13
2.1.3 La Concordia, Ecuador	15
2.1.4 Yumbo, Kolumbien	17

2.2	Luftbilder	18
2.2.1	Metrische Digitalkameras	18
2.2.2	Befliegungen	19
2.3	Felderhebungen	20
3	Photogrammetrische Anwendungen	24
3.1	Einleitung	24
3.2	Aufbau des Kapitels	25
3.3	Photogrammetrische Grundzüge	26
3.3.1	Digitale Luftbildmesskameras	28
3.3.2	Kamerakalibrierung	30
3.3.3	Passpunkte	31
3.3.4	Blockausgleichung	31
3.3.5	Digitale Höhenmodelle	33
3.3.6	Digitale Kronenmodelle (DKM)	38
3.3.7	Orthophoto und Mosaik-Herstellung	41
3.4	Methodisches Vorgehen	42
3.4.1	Blockaufbereitung und Blockausgleichung	43
3.4.2	Bewertung der Genauigkeit der Passpunkte aus Satellitendaten- sätzen	45
3.4.3	Gewinnung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und die Bewertung ihrer Genauigkeit für die Baumkronenmodellierung	45
3.4.4	Gewinnung von digitalen Geländemodellen (DGM) und Bewer- tung ihrer Genauigkeit	48
3.4.5	Ableitung der Baumhöhen	50
3.4.6	Erstellung von Orthophotomosaiken	50
3.5	Ergebnisse	51
3.5.1	Selbstkalibrierung und Blockausgleichung	51
3.5.2	Abschätzung der Blockausgleichungsgenauigkeit mit Pass- punkten, gewonnen aus Landsat-Satellitendatensätzen und SRTM-Höhendaten	54
3.5.3	Vergleich der Höhengenaugkeit der digitalen Oberflächenmo- delle (DOM)	55
3.5.4	Vergleich der Höhengenaugkeit der digitalen Geländemodelle .	57
3.5.5	Vergleich der Höhengenaugkeit bei der Baumhöhenbestimmung	59
3.5.6	Orthophotomosaike	60

3.6	Diskussion der Ergebnisse	61
3.6.1	Aerotriangulation und Selbstkalibrierung	61
3.6.2	Verwendung von Passpunkten, gewonnen aus Landsat-Kompositen und SRTM-Höhendaten	63
3.6.3	Höhengenauigkeit der digitalen Oberflächenmodelle (DOM) des Kronendachs von Busch- und Waldbeständen	65
3.6.4	Genauigkeiten der von DOMs abgeleiteten digitalen Gelände- modelle (DGMs)	66
3.6.5	Genauigkeit der Baumhöhenbestimmungen	68
3.7	Zusammenfassung der photogrammetrischen Anwendungen	69
4	Abgrenzung von Einzelbaumindividuen	72
4.1	Einleitung	72
4.2	Grundlagen	74
4.2.1	Bildsegmentierung	74
4.2.2	Bestimmung lokaler Maxima	77
4.2.3	Detektion und Extraktion der Baumkrone	78
4.3	Methodisches Vorgehen	88
4.3.1	Verfügbare Datengrundlagen	88
4.3.2	Methode	89
4.3.3	Bewertung des Verfahrens	93
4.4	Ergebnisse	93
4.5	Diskussion der Ergebnisse	94
4.6	Zusammenfassung	97
5	Klassifizierung von Baumarten	98
5.1	Einleitung	98
5.2	Grundlagen der Baumklassifizierung	100
5.2.1	Merkmale zur Baumklassifizierung	101
5.2.2	Klassifizierungsmethode	104
5.2.3	Baumklassifizierung in tropischen Bereichen	106
5.3	Methodisches Vorgehen	109
5.3.1	Merkmalsextraktion	110
5.3.2	Baumklassifizierung	115
5.4	Klassifizierungsergebnisse	117
5.4.1	Santa Fé de Antioquia (GSD 10 cm)	117

5.4.2	Medellín (GSD 20 cm)	125
5.5	Diskussion der Ergebnisse	129
5.6	Zusammenfassung der Baumartenerkennung	134
6	Fazit	135
7	Zusammenfassung und Ausblick	137
7.1	Zusammenfassung	137
7.2	Ausblick	139
A	Liste von Baumarten	141
B	Blockausgleichungen	143
C	Digitale Oberflächenmodelle	147
D	Orthophotomosaike	152
E	Baumkronenabgrenzung	158
F	Klassifizierung von Baumarten	159
	Literaturverzeichnis	166

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einordnung des Befliegungsgebietes in den Gemeindebereich der Ortschaft Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.	10
2.2	Klimastation Cotové, Kolumbien.	11
2.3	Vegetationsprofil für den Cañón del Río Cauca in der Ortschaft La Pintada, Antioquia.	12
2.4	Befliegungsflächen der Untersuchungsgebiete innerhalb der Stadt Medellín, Kolumbien.	13
2.5	Klimastation Aeropuerto Olaya Herrera, Medellín, Kolumbien.	14
2.6	Lage des Untersuchungsgebietes in La Concordia, Ecuador.	15
2.7	Klimastation La Concordia, Ecuador.	16
2.8	Übersicht über das Befliegungsgebiet im Gemeindebereich der Ortschaft Yumbo, Kolumbien.	17
2.9	Digitale Luftbildkamera Rollei AIC-P20 und AIC-P45.	18
2.10	Übersicht des Überfliegungsgebietes und oblique 3D-Darstellungen der Parzellen A1, A2 und A3 in Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.	22
2.11	Übersicht des Überfliegungsgebietes und oblique 3D-Darstellungen der Parzellen M1 und M2 in Medellín, Kolumbien.	23
3.1	Schematisierte Darstellung des typischen Arbeitsablaufs in der digitalen Photogrammetrie.	27
3.2	Grundprinzip der Bündelblockausgleichung.	32
3.3	Profil eines Nadelwaldes und des darunter liegenden Geländes in Washington, USA.	39
3.4	Herstellung eines Orthophotos anhand indirekter Entzerrungsmethode.	41
3.5	Stereoskopische gemessene Punkte auf dem Kronendach in der Parzelle A2 von Santa Fé de Antioquia.	47
3.6	Aufteilung der Parzellen von Santa Fé de Antioquia.	49
3.7	Auswirkung der Selbstkalibrierung bei der Rollei AIC-P20 und AIC-P45 auf die Bildkoordinatenresiduen.	52

3.8	Mittlere Differenz zwischen automatischen DOM-Höhen und den stereoskopisch gemessenen Höhen innerhalb des Kronendaches.	55
3.9	Vertikale Querprofile durch generierte DOMs eines Waldbestandes im Bereich Santa Fé de Antioquia.	56
3.10	Ausgewählte Geländeprofile.	58
3.11	Häufig gefundene Schwierigkeiten bei der automatischen Geländemodellierung in bewaldeten Gebieten.	68
4.1	Beispiel eines Regionenwachstumsverfahrens in einem bewaldeten Gebiet.	76
4.2	Beispiel eines Regionsplittings in einem bewaldeten Gebiet.	77
4.3	Pollock-Baummodelle.	79
4.4	Abgetastete Radien aus einem lokalen Maximum (Baumspitze) für die Evaluierung von spektralen Profilen.	81
4.5	Segmentierung eines DOMs in vier Maßstabsebenen (Glättungsgrade) .	84
4.6	3D-Modellierung eines Baumes aus Lidar-Höhendaten durch VRML. .	85
4.7	Kronenabgrenzung anhand des "Random Walks"-Verfahrens in einem Regenwald in Ecuador.	87
4.8	Effekte verschiedenen Glättungsgraden (Radius/Sigma σ).	89
4.9	Aufbau eines Minima-Netzes auf Basis der Funktion Minimum-Krümmung von GRASS, Schwellenwerte- und Skelettierungs-Verfahren.	90
4.10	Trennung der Baumbestände von Hintergrund und anderen Objekten. . .	91
4.11	Segmentierung des Datensatzes in Skelettierungs-Polygonen und Maxima.	91
4.12	Schema zur Bewertung der Korrektheit der automatischen Abgrenzung von Baumkronen.	93
5.1	Blockgrafik der Merkmalsvariablen Helligkeit und Kompaktheit.	121
5.2	Erste kanonische Diskriminanzfunktionen bei der Klassifizierung der Trainingsdaten von Medellín.	122
5.3	Erste kanonische Diskriminanzfunktionen bei der Klassifizierung der Trainingsdaten von Santa Fé de Antioquia.	128
B.1	Blockausgleichung mit BINGO des Bildverbandes von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.	143
B.2	3D-Ansicht der Blockausgleichung mit BINGO des Bildverbandes von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.	144
B.3	Blockausgleichung mit BINGO des Bildblockes von Medellín, Kolumbien.	144

B.4	3D-Ansicht der Blockausgleichung mit BINGO des Bildblockes von Medellín, Kolumbien.	145
B.5	Blockausgleichung mit ORIMA des Bildblockes von La Concordia, Ecuador.	145
B.6	Querschnittsansicht der Aerotriangulation mit ORIMA des Bildblockes von La Concordia, Ecuador.	145
B.7	Blockausgleichung mit ORIMA des Bildblockes Y2 von Yumbo, Kolumbien.	146
B.8	3D-Ansicht der Blockausgleichung (Y2) mit BINGO des Bildblockes von Yumbo, Kolumbien.	146
C.1	3D-Ansicht des DOMs für die gesamte Probefläche von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.	147
C.2	DOM für die gesamte Probefläche von Medellín, Kolumbien.	148
C.3	DOM für die gesamte Probefläche von La Concordia, Ecuador.	149
C.4	Abgeleitete DOMs und DGMs für ein bewaldetes und hügeliges Gebiet in Santa Fé de Antioquia (Parzelle A1).	150
C.5	Abgeleitete DOMs und DGMs für ein bewaldetes und flaches Gebiet in Santa Fé de Antioquia (Parzelle A2).	151
D.1	Orthophotomosaik mit überlagerten Schattierung des DOMs für die gesamte Probefläche von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.	152
D.2	Orthophotomosaik für die gesamte Probefläche von Medellín, Kolumbien.	153
D.3	Orthophotomosaik für die gesamte Probefläche von La Concordia, Ecuador.	154
D.4	Orthophotomosaik der Untersuchungsparzellen von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.	155
D.5	Orthophotomosaik der Untersuchungsparzellen von Medellín, Kolumbien.	156
D.6	Orthophotomosaik der Subparzellen von La Concordia, Ecuador.	157
E.1	Ergebnisse der Baumkronenabgrenzung in den Parzellen von La Concordia und Santa Fé de Antioquia.	158
F.1	Identifizierte Baumarten mit der Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle A1 des Untersuchungsgebietes von Santa Fé de Antioquia.	159
F.2	Identifizierte Baumarten mit deren Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle A2 des Untersuchungsgebietes von Santa Fé de Antioquia.	160
F.3	Identifizierte Baumarten mit deren Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle A3 des Untersuchungsgebietes von Santa Fé de Antioquia.	161

F.4	Identifizierte Baumarten mit deren Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle M1 des Untersuchungsgebietes von Medellín.	162
F.5	Identifizierte Baumarten mit deren Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle M2 des Untersuchungsgebietes von Medellín.	163
F.6	Beispiele von klassifizierten Baumarten in Santa Fé de Antioquia. . . .	165

Tabellenverzeichnis

2.1	Technische Daten der verwendeten Rolleimetric Luftbildkameras AIC-P20 und AIC-P45.	19
2.2	Befliegungen mit der Rolleimetric AIC-P20 über das Testgebiet Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.	19
3.1	Untersuchungen zur DGM-Gewinnung aus LIDAR-Datensätzen mit hoher Auflösung in bewaldeten Regionen.	37
3.2	Abschätzungsgenauigkeit der Baumhöhen in verschiedenen Waldökosystemen.	40
3.3	Erzielte Genauigkeiten bei der Blockausgleichung von Bildern der Rollei-Kamera AIC-P20 mit BINGO in Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.	53
3.4	Erzielte Genauigkeiten bei der Blockausgleichung von Bildern der Rollei-Kamera AIC-P20 mit BINGO in Medellín, Kolumbien.	53
3.5	Erzielte Genauigkeiten bei der Blockausgleichung von Bildern der Rollei-Kamera AIC-P20 mit ORIMA in La Concordia, Ecuador.	53
3.6	Erzielte Genauigkeiten mit der Kamera Rollei AIC-P45 in Yumbo, Kolumbien.	54
3.7	Höhengenaugigkeiten des DOMs auf dem Baumkronenbereich in der Parzelle A2 von Santa Fé de Antioquia.	55
3.8	Erreichte DGM-Genauigkeit bei der Verwendung drei verschiedener photogrammetrischer Softwarepakete.	57
3.9	Baumhöhendifferenz der automatisch erfassten und stereoskopisch gemessenen Baumhöhen für die Untersuchungspartellen von Santa Fé de Antioquia. Negative Werte deuten auf eine Unterschätzung der mittleren Baumhöhen hin.	59
3.10	Effekt der Schattierungen auf die Sichtbarkeit der Bäume bei zwei unterschiedlichen Befliegungszeitpunkten und Auflösungen.	70
4.1	Kronenbaumabgrenzung für einen natürlichen Waldbestand und zwei Ölpalmplantagen nach eigenen Verfahren.	94

5.1	Klassifizierungen anhand hochauflösender Fernerkundungssensoren in tropischen Regionen.	108
5.2	Ausgewertete Baumarten für die automatische Klassifizierung aus dem Gebiet von Santa Fé de Antioquia.	111
5.3	Ausgewertete Baumarten für die automatische Klassifizierung aus dem Gebiet von Medellín.	111
5.4	Klassifizierungsergebnisse für die Trainingsdaten von Santa Fé de Antioquia anhand des ML-Verfahrens.	118
5.5	Klassifizierungsergebnisse für die Testdaten von Santa Fé de Antioquia.	119
5.6	Trennfähigkeit der wichtigsten Variablen in den Diskriminierungsfunktionen.	120
5.7	Erreichte Trefferquote bei der Verwendung der Diskriminanzanalyse und verschiedener Merkmalstypen im Untersuchungsgebiet von Santa Fé de Antioquia.	122
5.8	Klassifizierungsergebnisse für Santa Fé de Antioquia bei der Anwendung der linearen Diskriminanzanalyse auf die Trainingsdaten.	123
5.9	Klassifizierungsergebnisse für Santa Fé de Antioquia bei der Anwendung der linearen Diskriminanzanalyse auf die Testdaten.	124
5.10	Klassifizierungsergebnisse für die Trainingsdaten von Medellín.	125
5.11	Klassifizierungsergebnisse für die Testdaten von Medellín.	126
5.12	Trennfähigkeit der wichtigsten Variablen in den Diskriminierungsfunktionen.	127
5.13	Erreichte Trefferquoten bei der Verwendung von verschiedenen Merkmalstypen und der Diskriminanzanalyse im Untersuchungsgebiet von Medellín.	128
5.14	Klassifizierungsergebnisse für Medellín bei der Anwendung von linearen Diskriminanzanalyse auf den Trainingsdaten.	129
5.15	Klassifizierungsergebnisse für Medellín bei der Anwendung von linearen Diskriminanzanalyse auf den Testdaten.	130
A.1	Identifizierte und kartierte Baumarten mit der Anzahl von angetroffenen Individuen für das Gebiet von Medellín.	141
A.2	Identifizierte und kartierte Baumarten mit der Anzahl von angetroffenen Individuen für das Gebiet von Santa Fé de Antioquia.	142
F.1	Zusammenfassung der evaluierten Variablen bei der Klassifizierung von Baumarten.	164

Verwendete Softwarepakete

ArcGIS 9.3

BINGO 5.5

Definiens Developer 7.0.8

ERDAS Imagine 9.3

GRASS 6.4.1

Imatie 2.0

Inpho 5.2

KIWI 0.5

LPS (Leica Photogrammetry Suite) 9.3

Orima 9.3

SAS 9.1

Socet Set 5.4.1

Stereo Analyst for ArcGIS 9.3

Abkürzungsverzeichnis

ABM	Area Based Matching
AIC	Aerial Industrial Camera
ATE	Automatic Terrain Extraction
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager
CCD	Charge Coupled Device
CIE	Commission Internationale de L'éclairage
DGM	Digitales GeländeModel
DGPS	Differential Global Positioning System
DKM	Digitales KronenModel
DMC	Digital Mapping Camera
DOM	Digitales OberflächenModel
FBM	Feature Based Matching
GCP	Ground Control Point
GIS	Geographisches InformationsSystem
GLCM	Grey Level Co-ocurrence Matrix
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sampling Distance
HYDICE	Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment
IHS	Intensity Hue Saturation
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
InSAR	Interferometrisches Synthetic Apertur Radar
KMF	KronenMantelFläche
LDA	Linear Discriminant Analysis
LIDAR	Light Detection And Ranging
LPS	Leica Photogrammetry Suite
LSM	Least Square Matching
ML	Maximum Likelihood
NGATE	Next Generation Automatic Terrain Extraction
OBIA	Object Based Image Analysis
PCA	Principal Component Analysis
RGB	Red Green Blue
RMK	ReihenMessKamera
RMSE	Root Mean Square Error
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIN	Triangulated Irregular Network

USGS United States Geological Service

Glossar

Bildzuordnung (Bildkorrelation oder Matching)

Verfahren zum Vergleich Ausschnitte aus den Grauwertmatrizen der Bilder und Suche der Orte bester Übereinstimmung.

Blockausgleichung

Gleichzeitige Bestimmung aller Orientierungselemente und Berechnung von Objektkoordinaten eines Luftbildes durch die Wiederherstellung der Strahlenbündel.

CASI

Multispektraler Scanner, der 79 Einzelkanäle im Wellenlängenbereich von 0,4 bis 12 μm aufzeichnet.

Differenzielle GPS-Positionierung

Berechnung von relativen Koordinaten zwischen zwei oder mehreren GPS-Empfängern, die gleichzeitig dasselbe GPS-Signal empfangen haben. Dabei wird ein GPS-Empfänger an einem Referenzpunkt mit exakt bekannten Koordinaten untergebracht und seine Position wird mittels des herkömmlichen GPS bestimmt.

Digitales Geländemodell

Darstellung der Geländeoberfläche durch räumliche Koordinatentripel einer Menge von Flächenpunkten, z.B. in Form von Dreiecksnetzen oder Gittern.

Digitales Kronenmodell

Darstellung der Baumhöhen über dem Gelände anhand der Differenz zwischen einem digitalen Oberflächenmodell und einem digitalen Geländemodell.

Digitales Oberflächenmodell

Darstellung der Geländeoberfläche und alle darauf befindlichen Objekten durch räumliche Koordinatentripel einer Menge von Flächenpunkten.

Dilation

Morphologische Operation zur Vergrößerung von binären Objekten anhand struktureller Elemente. Der Hintergrund wird erodiert (ausgedünnt) und der Vordergrund dilatiert (ausgedehnt). Somit können Löcher geschlossen werden und benachbarte Objekte verschmolzen.

Diskriminanzanalyse

Methode der Statistik, die zur Unterscheidung (Klassifizierung) von zwei oder mehreren Gruppen anhand beschreibender Variablen (Merkmale) dient.

Gauß-Filter

Hochpassfilter, der die Hochfrequenzen, also die eng benachbarten Grauwertunterschiede, abschwächt und somit eine glättende Wirkung auf das Bild ausübt. Dafür wird eine Gauß-Glockenkurve verwendet.

Grey Level Co-occurrence Matrix

Methode zur Textur-Analyse aufgrund einer Grauwertübergangsmatrix, die auf der Schätzung von bedingten Wahrscheinlichkeitsfunktionen beruht. Die relativen Häufigkeiten des Auftretens einer Grauwertkombination bezüglich des Winkels zwischen benachbarten Grauwerten und deren Distanz werden in einer symmetrischen Matrix berechnet.

Ground Sample Distance

Bodenpixelgröße in einem Orthophoto.

Hauptkomponentenanalyse

Statistisches Verfahren zur Minimierung der Korrelation mehrdimensionaler Variablen anhand einer Hauptachsentransformation und der Berechnung von Linearkombinationen der Variablen.

HYDICE

Hyperspektrales Sensorsystem, das 210 spektrale Kanäle zwischen 0.4 und 2.5 m aufzeichnen kann.

IHS-Farbsystem

Definition einer Farbe durch die Parameter Helligkeit (I), Farbton (H) und Sättigung (S).

InSAR

Fernerkundungsmethode, in der anhand SAR-Interferometrie der Phasenunterschied zwischen zwei unterschiedlich positionierten SAR-Aufnahmen ausgewertet wird. Die Information des zweiten Bildes wird mit der des ersten Bildes kombiniert, um Höheinformation der reflektierten Oberfläche abzuleiten.

Kinematische Positionierung

Berechnung einer Zeitfolge von Koordinatensätzen für einen bewegten Empfänger. Jeder einzelne Koordinatensatz entsteht aus einem einzelnen Datensatz und wird in Echtzeit berechnet.

Kriging

Geostatistisches Interpolationsverfahren, das auf Grundlage der im theoretischen Variogramm beschriebenen räumlichen Zusammenhänge die räumliche Verteilung der betrachteten Daten schätzt.

Kronenmantelfläche

Projektion der von der Krone beschirmten Fläche, die sich einem Modellkörper (z.B. Paraboloid) nähert.

Laplace-Filter

Differenzfilter zweiter Ordnung, der für eine drehungsinvariante Kantendetektion verwendet wird.

LIDAR

Eine auf Lasertechnologie basierende Messtechnik zur Abbildung von Oberflächen. Das System sendet unsichtbare Laserpulse und detektiert das Antwortsignal der Messobjekte mit hoher zeitlicher Auflösung sowie Lage- und Höhengenaugigkeit.

Maximum-Likelihood-Verfahren

Ansatz, der aufgrund statistischer Kenngrößen der vorgegebenen Klassen die Wahrscheinlichkeiten berechnet, mit denen die einzelnen Bildelemente diesen Klassen angehören. Zugewiesen wird jedes Pixel der Klasse mit der größten Wahrscheinlichkeit.

Orthophoto

Luftbild, das durch Differentialverzerrung umgeformt ist und somit die Eigenschaften einer Karte aufweist. Das Gelände wird dabei in senkrechter Parallelprojektion auf eine horizontale Ebene abgebildet.

Passpunkt

Bildobjekte, deren Koordinate im System der Landesvermessung bekannt sind. Passpunkte dienen zur Herstellung der Beziehung zwischen der Bildebene und der Geländebene.

SRTM-Daten

DGM-Daten, die bei der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) mit einer horizontalen Auflösung von 90 m (30 m für Nordamerika) im Februar 2000 aufgezeichnet wurden.

TIN

Modellierung von Oberflächen aus einer 3D-Punktwolke, die zu Dreiecken vernetzt wird.

Trägheitsnavigationssystem

Sensorsystem, mit dessen Hilfe drei translatorische sowie drei rotatorische Messwerte, d.h. die Drehbewegungen, Beschleunigungen und Neigungen, eines beweglichen Objektes in Echtzeit bestimmen lassen. Das System vergleicht die Änderungen der Objektposition durch eine kinematische Transformation mit einem feststehenden, vorher bekannten, Raumkoordinatensystem.

Überwachte Klassifizierung

Statistischer Ansatz, der Referenzdaten in Form von Bild-Trainingsgebieten mit differenzierenden Reflexionseigenschaften benutzt, um ein Bild zu klassifizieren.

Verknüpfungspunkt

In mindestens zwei benachbarten Modellen identifizierbarer Punkt, der den Zusammenschluss photogrammetrischer Modelle dient.

Wallis Filter

Nicht linearer Fenster-Operator zur lokalen Kontrastverstärkung eines Bildes. Dabei werden Mittelwert (Helligkeit) und Standardabweichung (Kontrast) an vorgegebenen Sollwerten anpasst.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einleitung und Literaturüberblick

Die Forstwirtschaft ist eine Disziplin, welche sich immer mehr auf differenziertere Informationsquellen aus Nachbarwissenschaften wie die Fernerkundungsanalyse, Photogrammetrie oder Luftbildinterpretation für die Charakterisierung und das Management der Walbestände stützt.

Die augenblickliche Entwicklung in der Technologie der Fernerkundung, beispielsweise anhand hochauflösender Satellitenbilder, digitaler Luftbilder und Lidar-Datensätze zu beobachten, hat neuen Anwendungen den Weg geebnet (BALTSAVIAS ET AL. (2008)), bei welchen die Qualität der Daten (spektral, räumlich und temporal) ständig verbessert wird. Die hohen räumlichen Auflösungen stellen für die Erforschung und Quantifizierung der Baumgruppen- und -artenzusammensetzung und Struktur auf der Bestandsebene sowie auch auf der Ebene einzelner Individuen immer mehr Möglichkeiten bereit (WASER ET AL. (2006)).

Insbesondere die Luftbildphotogrammetrie hat innerhalb des vorangegangenen Jahrzehnts vor allem aufgrund der Verwendung digitaler CCD-Sensoren und Zeilensensoren (Pushbroom) signifikante Fortschritte erfahren. Diese besitzen die Fähigkeit Aufnahmen von radiometrischer sowie geometrischer Qualität zu erstellen, welche jenen der analogen photogrammetrischen Kameras konventioneller Bauart überlegen sind. Die Folge dieser technischen Neuerungen sind die bedeutend vielseitigeren Ergebnisse bei den nachfolgenden Analysen. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie liegt auch in einem weniger zeitaufwendigen Produktionsprozess, da hierbei die Digitalisierung mittels Scanner entfällt, und weniger Passpunkte erforderlich sind, aber auch erhebliche Rationalisierung durch digitale Techniken möglich werden.

Wenngleich die Aufnahmen operationeller Satelliten wie IKONOS und Quickbird zwar wertvolle Informationen bishin zur Baumgruppenunterscheidung inzwischen bereitstellen und dazu geeignet sind Informationen anderer Sensortypen zu ergänzen, reicht die räumliche Auflösung zur Identifikation einzelner Baumindividuen noch nicht aus (TRICHON & JULIEN (2006)). Für eine solche Bestimmung sind Pixelauflösungen von mindestens 50 cm erforderlich - eine Auflösung der sich momentan lediglich die panchromatischen Kanäle von Satelliten wie GeoEye-1 (42 cm), WorldView 1 (55 cm) und WorldView 2 (45 – 52 cm) nähern. Doch auch diese reichen nicht dazu aus, eine exakte Abgrenzung von Baumkronen vorzunehmen, da für eine solche eine Pixelauflösung von weniger als 20 cm erforderlich ist.

Parallel zur immer besseren Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Daten aus digitalen photogrammetrischen Auswertesystemen wurden auch effizientere und leistungsfähigere Rechner entwickelt, welche ihrerseits wiederum neue Impulse für die Entwicklung neuer Algorithmen und Software mit sich brachten. Diese erleichtern die Erstellung von auf Luftbildern basierender digitaler aus Stereokorrelation gewonnener Geländemodelle und Orthophotos hoher Qualität, welche zusammen mit den Höhenwerten aus Lidar die wesentliche Grundlage für den Großteil der bereits existierenden Anwendungen zur Bestimmung und Klassifizierung einzelner Bäume bilden. Auf diese Weise wurden und werden Luftbilder dazu verwendet Waldbestände zu unterscheiden sowie Informationen über die dort vorliegenden Spezies zu erlangen. Die stetig wachsenden Anforderungen, welche mit dieser Präzisierung der Bestandsaufnahme der Bäume einhergehen, erfordern die Entwicklung praktischer Anwendungen, welche sich auf die automatische Analyse von Daten stützen und auf Methoden, die die Erfassung und Analyse solcher Daten vereinfachen (POULIOT ET AL. (2002), LUCAS ET AL. (2008B)).

Weiterhin gestaltet sich die Beschaffung verschiedener forstwirtschaftlicher Parameter vor Ort durch den hohen Zeit- und Arbeitsaufwand oftmals als schwierig, wenn nicht gar unmöglich. Daher bietet die Schätzung der Wald- und Baumparameter auf Grundlage hochauflösender, Fernerkundungssensoren die Möglichkeit, den finanziellen Aufwand der Stichprobennahme spürbar zu reduzieren (WASER ET AL. (2006)). Somit kann der luftbildbasierten automatischen Erfassung forstwirtschaftlicher Parameter eine vielversprechende Zukunft prophezeit werden, obgleich immer noch eine Menge Entwicklungsarbeit geleistet werden muss. Zwar ist eine solche Vorgehensweise nicht imstande die Probennahme vor Ort zu ersetzen, jedoch ermöglicht sie Forstwirtschaftlern, Botanikern und Ökologen die Untersuchung größerer Regionen sowie jener Gebiete, deren Zugang durch Felderhebung sich als schwierig gestaltet (TRICHON & JULIEN (2006)). Beispielweise bleiben im Augenblick große Waldareale in Ländern

mit inneren Kriegskonflikten wie Kolumbien praktisch unerforscht und mit geringeren Bewirtschaftungsmöglichkeiten, obwohl die Zerstörung des Waldes weiterhin schnell voranschreitet.

In gemäßigten Breiten scheint die Technologie der Fernerkundung für eine im großen Umfang stattfindende Abgrenzung der Baumkronen und Identifizierung der Baumarten zugleich eine Bedingung für die Berechnung des Holzaufkommens und Erntemanagements zu sein (KOCH ET AL. (2006)). Deskriptive Parameter der Bäume, wie die Größe der Kronen, können dazu genutzt werden, um variable Strukturen von Bäumen wie beispielsweise den Durchmesser des Stammes, die Höhe und die Biomasse zu bestimmen. Dies ist besonders nützlich für die Forstbestandserfassung und Abschätzung des Baumwachstums (POULIOT ET AL. (2002)).

Des Weiteren unterstützt die Erlangung detaillierter Informationen der Spezies auf der Ebene einzelner Individuen die Interpretation von Datenreihen aus der Fernerkundung mit einer mittleren Auflösung (5 – 30 m) sowie auch die deskriptiven Parameter der Baumdiversität und der ökosystematischen Dynamik der Landschaft, so dass die natürlichen und anthropogenen Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit der Wälder besser verständlich werden. Zudem besteht auch die Möglichkeit die existierenden Schätzwerte über das CO_2 -Reservoir der Baumbestände noch zu verfeinern (LUCAS ET AL. (2008B), Ponce de León in Arbeit).

Die Kartierung von Baumarten trägt auch zur Identifizierung von seltenen, endemischen und gefährdeten Arten (CLARK ET AL. (2005)) und (LUCAS ET AL. (2008B)), sowie zur Bestimmung von kommerziell wertvollen Spezies und solcher Baumarten, die als Indikatoren der Bodeneigenschaften oder Veränderung innerhalb der Ökosysteme dienen (TRICHON & JULIEN (2006)), bei. Ein Beispiel dafür ist der Paranussbaum (*Bertholletia excelsa*), dessen Fruchtbewirtschaftung eine wichtige Einkommensquelle für viele Einwohner in Amazonasgebieten von Bolivien, Peru und Brasilien darstellt, der aber einen erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand für die Vorort-Identifizierung von Individuen erfordert.

Letztlich ist noch herauszustellen, dass sowohl die automatisierte Kronenabgrenzung als auch die Einzelbaumerkennung zwar intensiv an homogenen Baumbeständen borealer Wälder oder Wälder gemäßigter Klimazonen sowie in Pflanzungen angewendet wurde (PALACE ET AL. (2008)), jedoch selten anhand heterogener tropischer Wälder, erprobt worden ist. Durch die hohe Artenvielfalt und komplexen Kronendächer ist daher noch nicht klar, ob diese Algorithmen für die Verwendung in den Tropen auch wirklich geeignet sind (CLARK ET AL. (2005)).

Zudem wurden die Studien zur Erfassung der Durchführbarkeit einer auf Fernerkundung basierenden Bestimmung tropischer Baumarten lediglich anhand der Identifizierung weniger Spezies mit Hilfe hyperspektraler Aufnahmesysteme verwirklicht (TRICHON & JULIEN (2006)). Als weiterer Schritt könnte der Einsatz hochauflösender Luftbilder in den Tropen die Klassifizierung der botanischen Zusammensetzung, der Artenvielfalt und der Habitate auf verschiedenen Maßstabsebenen enorm verbessern. Hierzu soll mit dieser Arbeit ein erster Einstieg geleistet werden.

1.2 Motivation

Die vorliegende Arbeit geht aus von dem persönlichen Interesse des Autors an den Fachbereichen der Forstwissenschaft, Bildverarbeitung und seit einigen Jahren auch an der Photogrammetrie. Aufgrund eigener praktischer Erfahrung in der Baumerkennung und Forstvermessung kenne ich die Schwierigkeiten bei den Feldarbeiten sowie die Kosten und Risiken dieser Aktivität in einem Land wie Kolumbien mit seinen bewaffneten Konflikten. Da die Zerstörung tropischer Forstressourcen rasant voranschreitet, ohne dass vollständige Kenntnis der ökologischen und ökonomischen Bedeutung dieser Waldökosysteme besteht, ist die Umsetzung der neuen Entwicklungen in den erwähnten Sachbereichen dringend notwendig. Die aktuellen Verfahren würden zum einen eine Reduktion der Kosten aufgrund der erhöhten Arealabdeckung und des geringeren Zeitaufwands mit sich bringen. Zum anderen würden neue Untersuchungsmöglichkeiten aus einem wenig erforschten Blick, in diesem Fall der Luftperspektive, erweiterte Sichtweisen eröffnen.

Bei der Kombination der von aktuellen photogrammetrischen Luftbildkameras angebotenen hohen radiometrischen Qualität, der Genauigkeit der Aerotriangulations-Softwarepakete, der offensichtlichen Verbesserungen in der Herstellung von digitalen Oberflächenmodellen bzw. Kronenmodellen und Orthophotomosaiken und der algorithmischen Entwicklung in der Bildanalyse und automatischen Objektextraktion wird hier eine Automatisierung der wesentlichen Prozesse zur Ableitung von Waldbestandsparametern (z.B. Baumhöhe) sowie Kronenbaumabgrenzung und Baumartidentifizierung beabsichtigt.

Das alles basiert auf Methoden, die sich im Augenblick in einer Phase von intensiver theoretischer und praktischer Forschung befinden. Die Algorithmen zur Kronenbaumabgrenzung beispielweise werden seit circa 15 Jahre entwickelt, sie stehen aber neuen Herausforderungen aufgrund der besseren Informationsqualität von hoch auflösenden Sensoren gegenüber. Der Einsatz photogrammetrischer digitaler Luftbildkameras hat zwar bereits ein Jahrzehnt hinter sich, er ist jedoch mit immer neuen Anforderungen

bezüglich ihrer Kalibrierung und Feldanpassung verbunden. Die photogrammetrischen Softwareprogramme haben zwar basierend auf verfeinerten Algorithmen und erheblich reduzierten Rechenzeiten einen Aufschwung erlebt, sie müssen aber noch in verschiedenen Situationen und Anwendungsbereichen erweiternd getestet werden. Daher hat diese Untersuchung nicht nur zum Ziel, das Wissen in den genannten Methoden und Themenbereichen zu vertiefen. Der Fokus liegt vielmehr darin, das Potential der beschriebenen Ansätze in den Tropen zu erkunden, ihre Schwächen zu erkennen und ihre zukünftige Anwendungsperspektive herauszuarbeiten. In den Tropen, im Gegensatz zu den gemäßigten Breiten, fängt die Arbeit in diesen Bereichen gerade erst an und es ist abzusehen, dass aufgrund der großen Vielfalt an Umweltbedingungen, Ökosystemen und Baumarten erhebliche Schwierigkeiten auftreten werden. Zu den Anwendungsbereichen zählen die Inventur und Überwachung der Forstressourcen, Baumzahlermittlung in Plantagen, Einschätzung des Wachstums der Bäume bzw. Wälder, Schätzung des CO_2 -Inhalts der Vegetation, Kartierung der von Erschöpfung bedrohten, ökonomisch bedeutenden aber auch anderer Baumarten. Letztendlich könnten diese Kenntnisse zu einer nachhaltigen Nutzung der Wälder, der Optimierung der Waldbausysteme und dem Aufbau einer adäquaten und nachhaltigen Forstpolitik beitragen.

1.3 Zielsetzung

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird untersucht, inwiefern digitale mittelformatige Luftbilder detaillierter Auflösungen (Pixelgröße von 10 bis 40 cm) und die darauf basierenden digitalen Oberflächenmodelle und Orthophotomosaike als Werkzeuge zur Erfassung, Quantifizierung und Charakterisierung der Zusammensetzung und der Struktur verschiedener tropischer Baumbestände verwendet werden können. Die Untersuchungsbereiche umfassen ein tropisches Trockenwaldgebiet und Parkwälder in einem Stadtgebiet in Kolumbien sowie Monokulturen der Ölpalme in Ecuador für Parametrisierungen und Baumartenbestimmungen, ergänzt durch invadierte Naturlandschaften in der Westkordillere Kolumbiens zu Zwecken geometrischer Genauigkeitsabschätzung für wirtschaftliche Passpunktbeschaffung (siehe Kapitel 3).

Der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchungen liegt in der Anwendung der digitalen Photogrammetrie für die Waldwirtschaft. Neben der Photogrammetrie werden auch Methoden der Bildverarbeitung und Objektidentifizierung zur Baumerkennung eingesetzt sowie statistische Ansätze für die Klassifizierung verschiedener Baumarten einbezogen. Im Rahmen dieses Vorhabens werden vertiefend die folgenden Ziele verfolgt:

- Erarbeitung einer auf Luftbildern basierenden Methodik mit aus Satelliten gewon-

nenen Passpunkten zur Erfassung der Baumbestände in tropischen Gebieten in denen in der Regel die ökonomischen und technologischen Mittel sehr beschränkt sind. Dafür wird die Prozesskette von der Aerotriangulation der Aufnahmen bis zur Ableitung der Forstparameter aus den digitalen Oberflächenmodellen und Orthophotomosaiken zu überprüfen sein.

- Entwicklung eines Algorithmus auf Basis digitaler Kronenmodelle für die automatische Identifizierung der Ölpalme (*Elaeis guineensis*) und Evaluierung ihrer Anpassung an einen tropischen Trockenwald.
- Analyse des Klassifizierungspotentials einiger tropischen Baumarten anhand von Baummerkmalen, die aus Orthophotomosaiken und digitalen Kronenmodellen zu gewinnen sind.

Darüber hinaus wird auf die folgende Fragestellung eingegangen:

- Reichen die digitalen Oberflächen- bzw. Geländemodelle, die von aktuellsten photogrammetrischen Programmen erzeugen werden können, zur Modellierung der wichtigsten Waldbestandsparameter aus?
- Wie groß ist das Potenzial der digitalen Luftbilder aus Mittelformat-Kameras für die Klassifizierung von tropischen Bäumen?
- Wie detailliert lassen sich mit der heutigen Technik der Luftbildphotogrammetrie die einzelnen Baumarten eines artenreichen tropischen Waldes automatisch differenzieren?

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit enthält - nach dem Einleitungskapitel - im zweiten Kapitel eine Beschreibung der Untersuchungsgebiete im Hinblick auf ihre umweltbezogenen Eigenschaften (insbesondere Klima und Vegetation) und der verwendeten Materialien (Kameras, Bildaufnahmen und Passpunkte). In den darauffolgenden Kapiteln (3, 4 und 5) werden zunächst theoretische Grundlagen publizierter Arbeiten präsentiert und danach die selbst verwendeten Methoden und erreichten Ergebnisse auswertend eingeordnet. Das Kapitel 3 befasst sich mit der Aerotriangulation und Selbstkalibrierung der Kameras, Passpunktgewinnung aus Landsat-Satellitendaten, digitaler Oberflächen (DOM)- und Gelände (DGM)-Modellgewinnung sowie mit der automatischen Baumhöhenbestimmung auf der Basis photogrammetrischer Verfahren. Das Kapitel 4 behandelt die automatische

Extraktion von Bäumen und in einem speziellen Teil Palmen überwiegend aus DOMs. Die automatische Baumartenbestimmung in Anlehnung an statistische Verfahren wird im Kapitel 5 dargelegt. Abschließend werden in Kapitel 6 ein Fazit der Arbeit und in Kapitel 7 die Zusammenfassung unterbreitet.

Kapitel 2

Arbeitsgrundlagen

2.1 Untersuchungsgebiete

Zur Unterscheidung und Identifizierung einzelner Bäume wurden drei Waldregionen mit unterschiedlichen Charakteristiken von Vegetation und Lebensräumen ausgewählt:

1. Santa Fé de Antioquia (Kolumbien). Hierbei handelt es sich um eine Region mit Parkbäumen in aufgelichteten Naturbeständen, Obstbäumen und Uferwäldern, welche eine in hohem Maße veränderte Landschaft aufweist, in der nur noch Reste der ursprünglichen tropischen Trockenwälder übrig geblieben sind.
2. Medellín (Kolumbien). Repräsentiert durch die Parkanlage der Campus-Universitäten Universidad Nacional und Universidad de Antioquia auf deren Universitätsgelände geforstete Baumbestände von vielfältiger Zusammensetzung vorzufinden sind.
3. La Concordia (Ecuador). In diesem Gebiet wird eine Identifizierung und Bewertung von Palmenindividuen in kommerziellen Ölpalmpflanzungen (*Elaeis guineensis*) vorgenommen.

Für diese Untersuchungsgebiete werden ihre räumliche Lage und das Relief deskriptiv dargestellt; die wichtigsten klimatischen Bedingungen anhand von Niederschlags- und Temperaturwerten vorgestellt; sowie, gestützt auf Felderhebungen und Luftbilddaufnahmen mit der Standort kennzeichnenden Interpretation der vorhandenen Vegetation, auch die ökologischen Aspekte berücksichtigt.

Die Beschreibung des Klimas stützt sich auf die in den Abbildungen 2.2, 2.5 und 2.7 dargestellten Werte des monatlichen Niederschlags und der mittleren monatlichen Temperatur über den Messzeitraum von mindestens fünfzehn Jahren. Hierbei handelt es sich

um Diagramme nach dem KIWI-Verfahren der Geographie der HHUD (BRAITMEIER (2003)).

Ergänzend zu den drei Untersuchungsregionen wird zur Verifizierung der Größenordnung aus Satellitenbildern gewonnener Passpunkte eine Befliegung der Umgebung der kolumbianischen Stadt Yumbo, in der Nähe von Cali, verwendet. Dieses Gebiet wurde mit einer digitalen Aufnahmeserie unter Verwendung kinematischer GPS-Technologie befliegen, die einen Abgleich der erreichbaren Genauigkeiten verschiedener Passpunkt-generierungstechniken erlaubt. Da dieser Bereich nur zu diesem Zweck zum Einsatz kam, werden die dortigen Umweltbedingungen nicht näher beschrieben.

2.1.1 Santa Fé de Antioquia, Kolumbien

Das folgende Untersuchungsgebiet liegt im Departamento Antioquia (Kolumbien) in der Ortschaft Santa Fé de Antioquia, 40 Kilometer nordwestlich von Medellín auf 6°30' bis 6°34' nördlicher Breite und 75°47' - 75°49' westlicher Länge (siehe Abbildung 2.1).

Das Areal wird von Norden nach Süden durch den Río Cauca und seinen Nebenfluss, den Río Tonusco, durchzogen, welche Terrassensysteme und durch Abtragung herausmodellerte hügelartige Erhebungen ausgebildet haben. Die Höhe des Gesamtgebietes variiert zwischen 430 m ü.d.M. auf dem Niveau des Río Cauca im Osten, bis circa 700 m ü.d.M. im Norden.

Das Klima ist mit einer mittleren Temperatur von 27,1°C, mit leichten über das Jahr verteilten Schwankungen, welche aber keine 5°C überschreiten, und einem mittleren jährlichen Niederschlag von 1.028 mm äquatorial semiarid geprägt. (Zeitraum: 1975 – 2007. Klimastation Cotové, 6°32'N, 75°49'W). Die Verteilung der Niederschläge stellt sich dabei bimodal dar, mit einer Regenzeit von April bis November und einer leichten Verminderung der Niederschläge von Juli bis August. Die Niederschlagsspitzen fallen auf die Monate Mai sowie Oktober mit durchschnittlichen Werten von über 100 mm (siehe Abbildung 2.2). Die Trockenzeit tritt zwischen Dezember und März auf, in der die durchschnittlichen Niederschlagswerte unter 25 mm liegen und nur selten 40 mm übersteigen.

Die umliegenden Berge und das schmale Durchbruchstal des Río Cauca (Cañón del Río Cauca) führen zu speziellen atmosphärischen Bedingungen, sodass große Mengen der vom Pazifik und dem Tal des Río Magdalena kommenden feuchten Luftmassen die Region nicht erreichen. Hinzu kommt eine typisch tropische Talwindzirkulation, die die Niederschläge im Talzentrum und damit im Arbeitsgebiet zusätzlich reduziert. Aufgrund dessen entspricht die Vegetation dem Typus des tropischen Trockenwaldes, mit

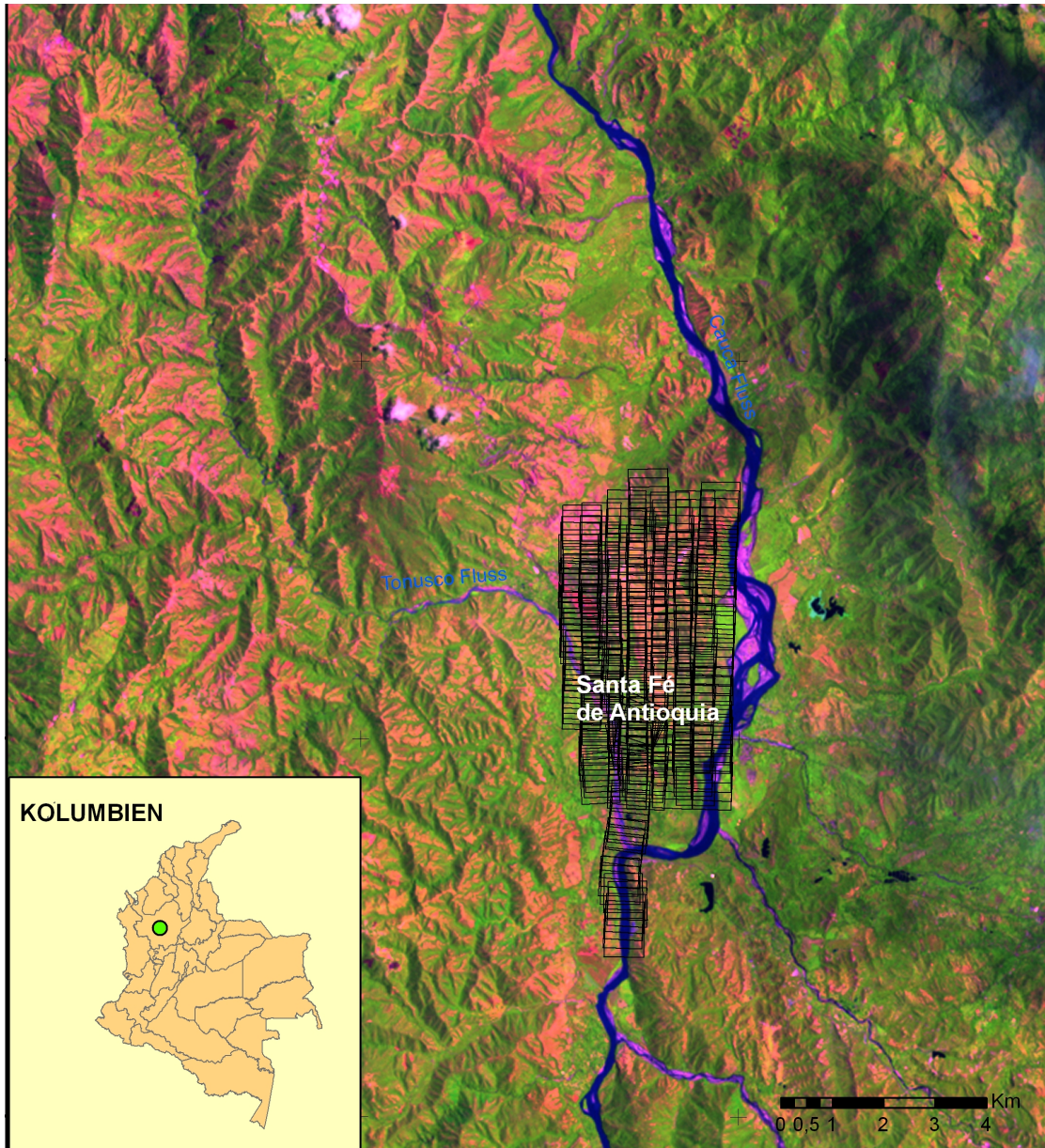


Abbildung 2.1: Einordnung des Befliegungsgebietes in den Gemeindebereich der Ortschaft Santa Fé de Antioquia, Kolumbien. Quellen: im Hintergrund Aufnahme des Landsat ETM+ vom August 2000, entnommen aus USGS Global Visualization Viewer und als Schwarze Polygone eigene Blockausgleichung von digitalen AIC-P20-Luftbildern des Lehrstuhls für Physische Geographie der HHUD.

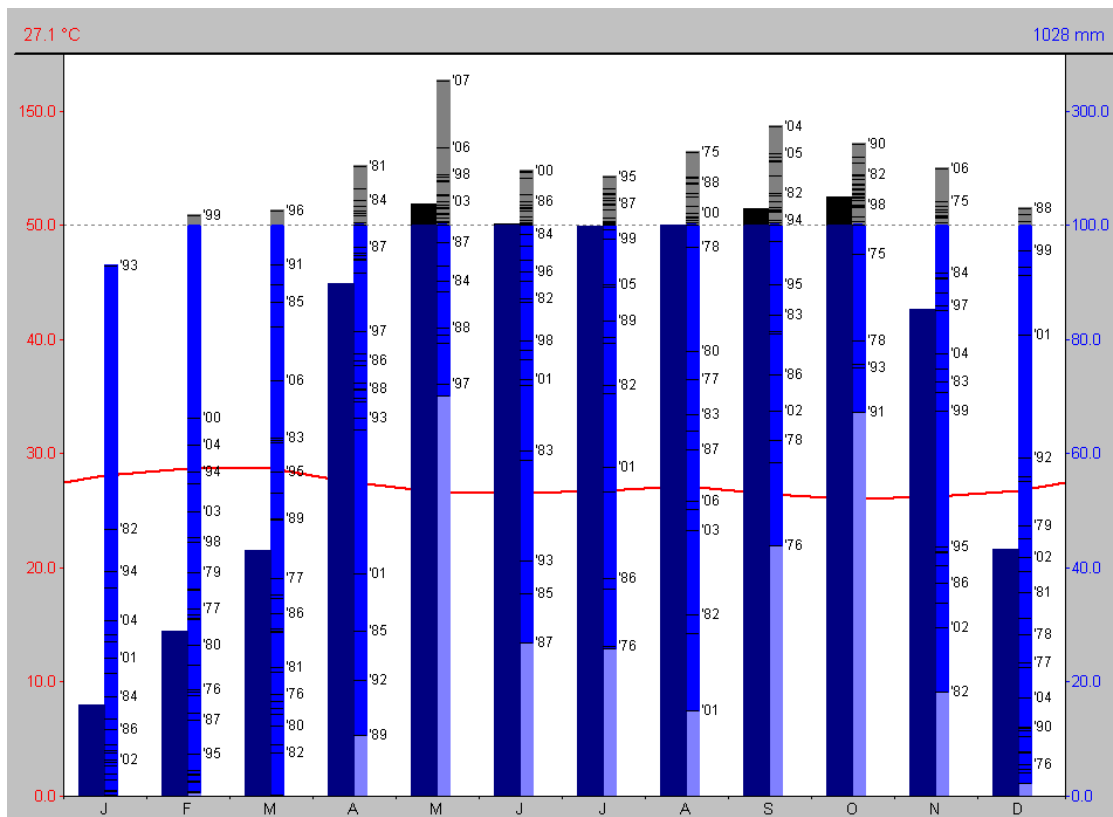


Abbildung 2.2: Mittlerer monatlicher Niederschlag (dunkelblaue Säulen) und monatliche Durchschnittstemperaturen (dunkelrote Linie) der Klimastation Cotové, Kolumbien. Die hellblauen Säulen zeigen die monatlichen Niedrigstwerte innerhalb der Jahresreihen an. Die vertikalen Achsen auf der rechten und der linken Seite weisen die Skalen für Temperatur und monatlichen Niederschlag auf. Am unteren Rand erscheinen die Monate. Quelle: Klimadaten von 1975 bis 2007 erworben bei IDEAM, Kolumbien. Dargestellt mit KIWI.

möglicher Wasserknappheit während der Trockenzeit. Dies ist vor allem in Jahren, in denen es zu überhaupt keinen Niederschlägen während dieser Monate kommt, ausgeprägt.

Die ursprünglichen Wälder dieser Region sind fast vollständig verschwunden, lediglich kleine Fragmente von Sekundärwäldern finden sich noch gelegentlich auf Fincas und an Fluss- und Bachufern. Zu den hier häufigsten Baumarten zählen: *Hymenaea courbaril* (Algarrobo), *Anacardium excelsum* (Carocolí), *Astronium graveolens* (Diomate), *Bursera simaruba* (Indio Desnudo), *Ceiba pentandra* (Ceiba), *Enterolobium cyclocarpum* (Piñón de Oreja), *Guazuma ulmifolia* (Guácimo), *Pseudosamanea guachepete* (Roble amarillo), *Spondias mombin* (Hobo) sowie *Trichilia hirta* (Tautano) (siehe Anhang A). Viele dieser Bäume weisen buschige Kronen und selten eine Wuchshöhe von mehr als 30 m auf. Unter den Sträuchern herrschen Kakteengewächse, Dorngevächse sowie brennhaarige Pflanzen vor, welche sich gut an die steinigen Böden und die von Überweidung betroffenen Oberflächen angepasst haben. Die Abbildung 2.3 zeigt ein typisches Vegetationsprofil einer sich in der Nähe des Untersuchungsgebietes befindenden Region.

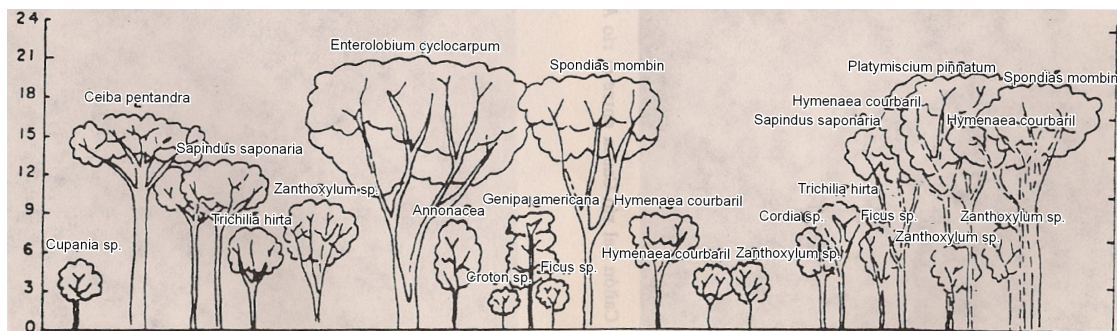


Abbildung 2.3: Vegetationsprofil für den Cañón del Río Cauca in der Ortschaft La Pintada, Antioquia. Quelle: ESPINAL (1985).

Auf den ebenen bis leicht reliefierten Landschaftsformen herrschen Weideflächen mit Guinea-Gras und *Hyparrhenia rufa* (Yaraguá-Gras) vor, welche zur Viehwirtschaft genutzt werden und von - *Glicirida sepium* (Matarratón) und *Bursera simaruba* (Indio desnudo)- Bäumen begrenzt sind, die als lebende Zaunpfähle gepflanzt wurden. Auch finden sich inmitten dieser Weideflächen häufig einzeln verstreute *Acrocomia antioquiensis* (Macauba-Palmen) und *Mangifera indica* (Mangobäume).

Des Weiteren sind in der Region Wochenendhäuser sowie kleine Produktionsparzellen auf denen häufig Obstbäume angepflanzt werden vorzufinden, unter denen Arten wie *Annona squamosa* (Anón), *Annona muricata* (Guanábana), *Calocarpum mammosum* (Mamey), *Carica papaya* (Papaya), *Chrysophyllum caimito* (Caimito), *Cocos nucifera* (Coco), *Quararibea cordata* (Zapote), *Mangifera indica* (Mango), *Manilkara sapota*

(Níspero) und *Tamarindus indica* (Tamarindo) vorkommen (DE LOS RIOS (2004)).

2.1.2 Medellín, Kolumbien

Medellín zählt zu den bedeutendsten Städten Kolumbiens und stellt zudem die Hauptstadt des Departamento von Antioquia. Das Bebauungsgebiet nimmt den Grund des Aburrá-Tals sowie auch die angrenzenden Talhänge ein. Hiervon wurden zwei Bereiche ausgewählt, nämlich die Universitätsgelände der Universidad Nacional und der Universidad de Antioquia, die über eine üppige Baumvegetation verfügen, die dendrologisch gut klassifiziert vorliegt. Sie befinden sich auf $6^{\circ}15' - 6^{\circ}16'$ nördlicher Breite und $75^{\circ}35' - 75^{\circ}49'$ westlicher Länge auf dem Talgrund (siehe Abbildung 2.4). Die mittlere Höhe beträgt ca. 1.465 m ü.d.M.

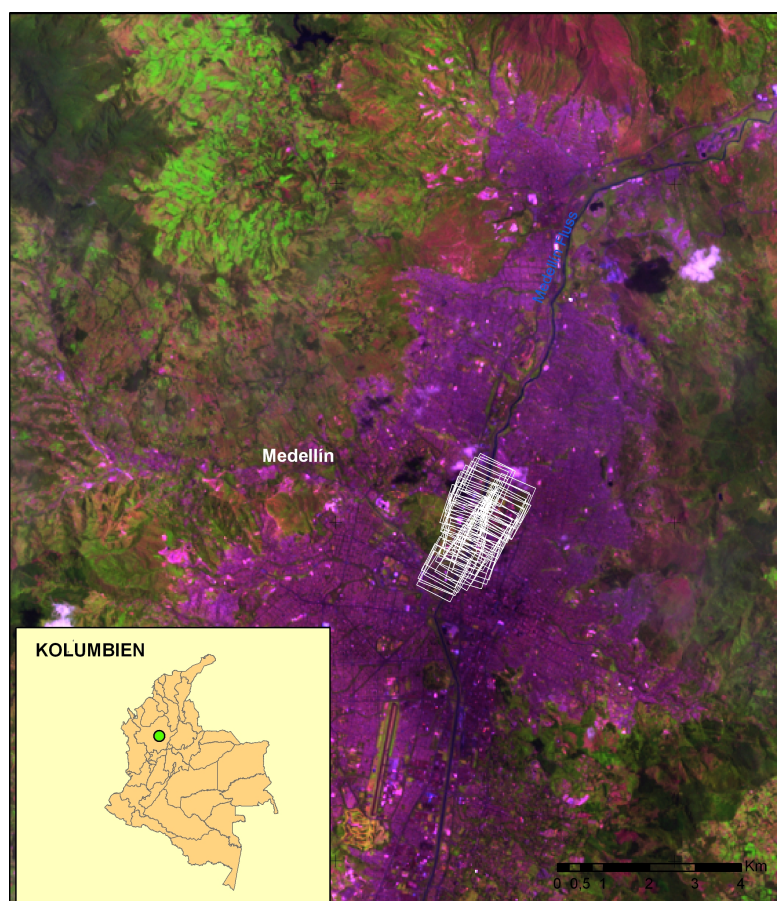


Abbildung 2.4: Befliegungsflächen der Untersuchungsgebiete innerhalb der Stadt Medellín (Kolumbien). Quelle: im Hintergrund Aufnahme des Landsat ETM+ vom August 2000, entnommen dem Server der University of Maryland. Weiße Polygone: selbst erstellte Blockausgleichung anhand von digitalen AIC-P20 Luftbildern des Lehrstuhls für Physische Geographie der HHUD.

Medellín weist mit einer mittleren Jahrestemperatur von $23,5^{\circ}\text{C}$ und mittleren jährlichen Niederschlagswerten um circa 1.600 mm ein tropisches prämontanes Klima auf

(Messzeitraum von 1990 bis 2007, siehe Abbildung 2.5).

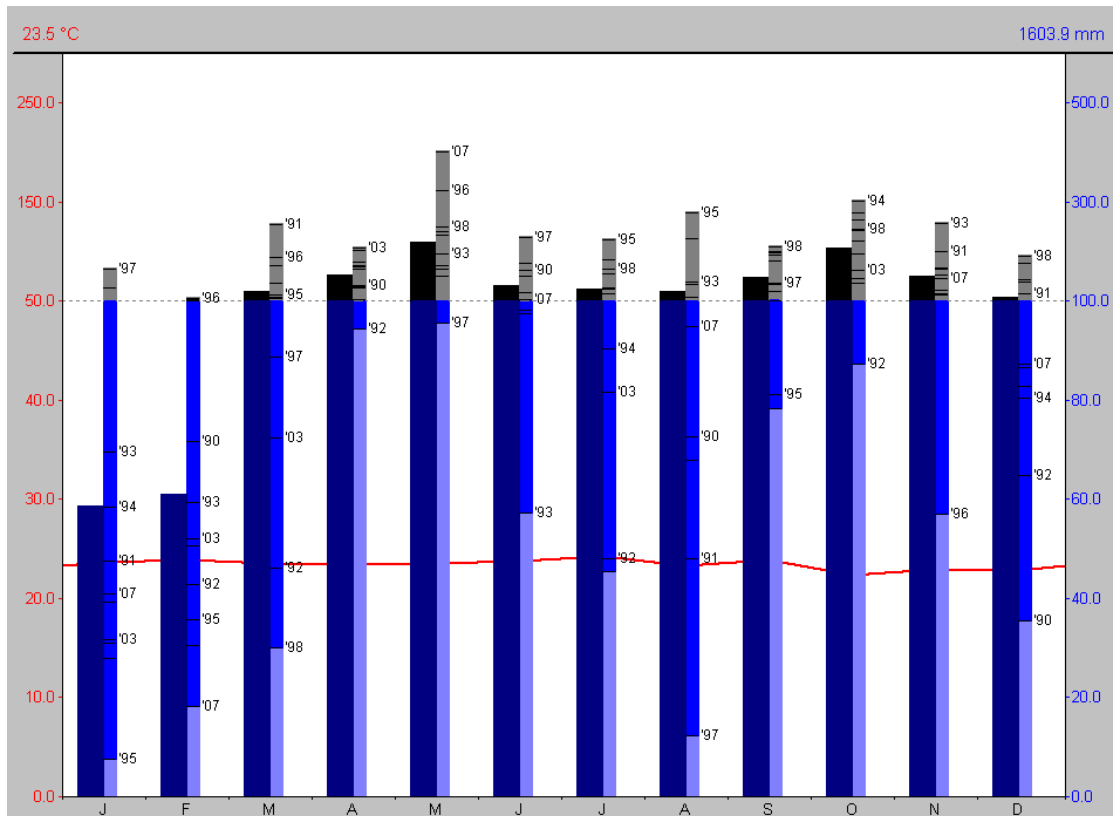


Abbildung 2.5: Mittlerer monatlicher Niederschlag (dunkelblaue Säulen) und seine Monatsdifferenzierung für die Klimastation Aeropuerto Olaya Herrera, Medellín, Kolumbien. Quelle: Klimadaten von 1990 bis 2007 bereitgestellt durch das IDEAM, Kolumbien. Dargestellt mit KIWI.

Die Niederschlagskurve verläuft bimodal mit Regenzeiten von März bis Mai sowie von September bis November mit Spitzen im Mai respektive Oktober. In den Monaten von Juni bis August verringert sich die Intensität der Niederschläge entsprechend des sogenannten “Veranillo”. Die ausgeprägteste Trockenzeit fällt in den Zeitraum von Dezember bis Februar.

Bei der zu untersuchenden Vegetation handelt es sich um Baumgruppen von parkartigen Stadtbäumen mit einer ausgiebigen Mischung von Arten verschiedener Herkunft. So finden sich hier Arten aus kolumbianischen Gebieten wie dem Magdalena Medio, Bajo Cauca, Chocó, Urabá und der Amazonía, aber auch solche aus anderen Erdteilen wie Neu-Guinea, Madagaskar, Sumatra, Borneo und Australien.

Als einige der auf dem Universitätsgelände am häufigsten anzutreffenden Baumarten sind zu nennen: *Bauhinia variegata* (Casco de vaca), *Caesalpinia peltophoroides* (Acacia amarilla), *Erythrina fusca* (Búcaro), *Ficus benjamina* (Laurel), *Fraxinus chinensis* (Urapán), *Jacaranda mimosifolia* (Gualanday), *Leucaena leucocephala* (Leucaena), *Mangifera indica* (Mango), *Pithecellobium dulce* (Chiminango), *Psidium guajaba*

(Guayabo), und *Tabebuia* spp. (Guayacán). Unter den Palmen/Palmengewächsen befinden sich: *Acrocomia aculeata* (Corozo), *Cocos nucifera* (Coco), *Roystonea regia* (Palma real) sowie *Chrysalidocarpus lutescens* (Palma areca). Eine ausführlichere Auflistung der auf der Universidad Nacional vertretenen Arten findet sich in der Arbeit von MORALES (1996).

2.1.3 La Concordia, Ecuador

Dieses Untersuchungsgebiet liegt in der Ortschaft La Concordia in der ecuadorianischen Provinz Esmeraldas zwischen 79°20' und 79°22' westlicher Länge und 2°40' und 3°44' südlicher Breite der Costa. Dabei handelt es sich um eine sanfte Hügellandschaft mit leichten Erhebungen in einem Bereich zwischen 240 und 300 m ü.d.M. (siehe Abbildung 2.6).

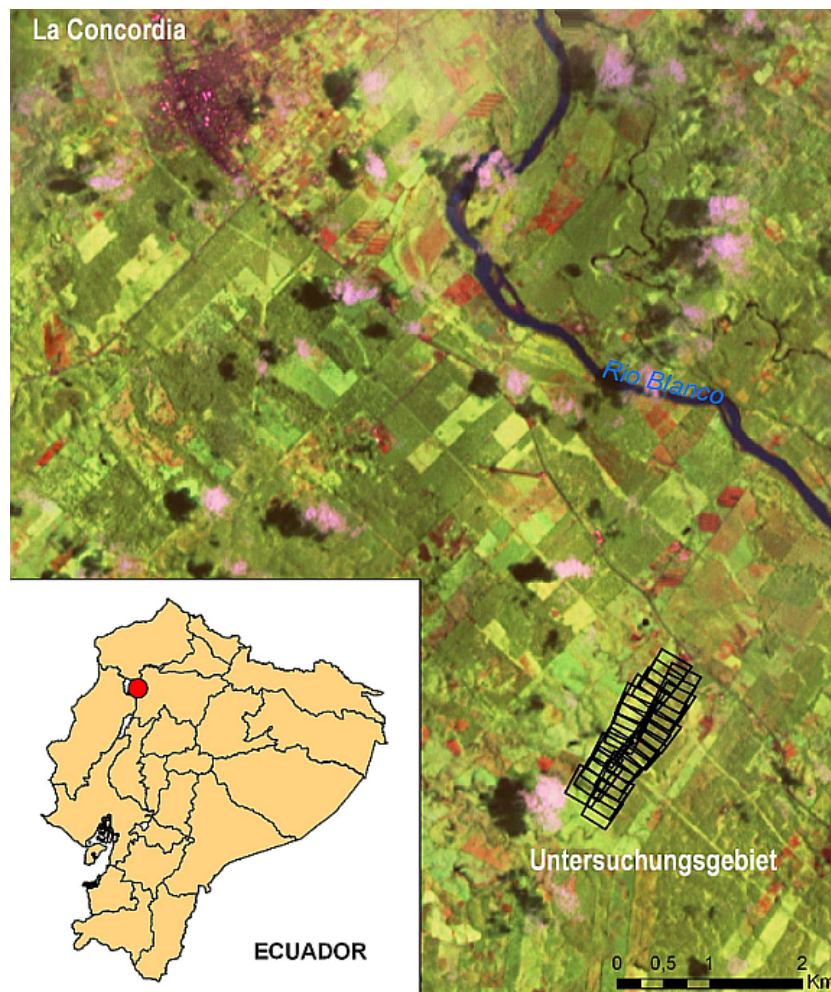


Abbildung 2.6: Lage des Untersuchungsgebietes in La Concordia, Ecuador. Quelle: Landsat ETM+ vom März 2000, entnommen dem Server der University of Maryland. Schwarze Polygone: selbst erstellte Blockausgleichung anhand von digitalen AIC-P20 Luftbildern der Firma DALE-digital Quito/Ibarra, Ecuador.

Mit einer mittleren Temperatur von $24,5^{\circ}\text{C}$ und einem mittleren jährlichen Niederschlag von circa 3.340 mm (Messzeitraum 1970 – 1998, Klimastation La Concordia, $1^{\circ}36' \text{ S}$ und $79^{\circ}22' \text{ W}$; siehe Abbildung 2.7) herrscht in der Region ein euhumides Tieflandklima. Die Vegetationsformation entspricht dem immergrünen Tiefland-Feuchttropenwald (ELLENBERG (1975)). Die Niederschlagsverteilung stellt sich hier als monomodal dar, deren Regenzeit von Dezember bis Juli andauert, um von August bis November schließlich eine deutliche Reduktion der Regenfälle zu erfahren. Dies geschieht jedoch ohne Wasserknappheit für die Vegetation.

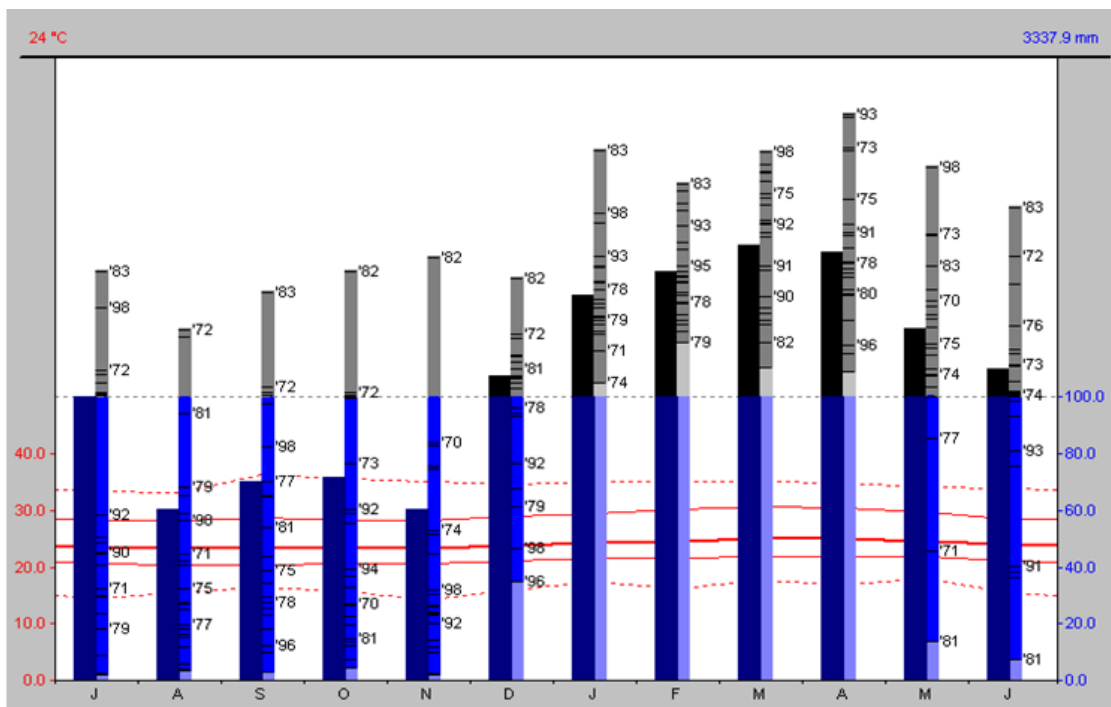


Abbildung 2.7: Mittlerer monatlicher Niederschlag (dunkle/dunkelblaue Säulen), mittlere Monatstemperaturen (kräftige/rote Linie), mittlere monatliche Höchst- und Niedrigwerte (dünne rote Linien) und absolute monatliche Höchst- und Niedrigwerte (gestrichelte rote Linien) der Klimastation La Concordia, Ecuador. Quelle: Sammlung von Klimadaten von 1970 bis 1990 des Lehrstuhls für Physische Geographie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (HHUD), zusammengestellt aus Daten des INAMHI, Ecuador.

Das Gebiet weist ein leicht hügeliges Relief auf, welches den Übergang der Küstenebene zu den Ausläufern der Sierra markiert. Schon seit dem 16. Jahrhundert wurden hier Veränderungen am Großteil der ursprünglichen Ökosysteme vorgenommen und auch heute herrschen industrielle Monokulturen von Bananen, Kakao, Kaffee, Zuckerrohr und momentan dominierend Ölpalmen (*Elaeis guineensis*) vor (TUINSTRA (2008)). Gerade die letztgenannte Spezies erweist sich aufgrund der wachsenden wirtschaftlichen Bedeutung in globalem Ausmaße als wichtiger Untersuchungsgegenstand.

2.1.4 Yumbo, Kolumbien

Die Ortschaft von Yumbo befindet sich im zentralen Teil des Departamento del Valle de Cauca, Kolumbien. Das Untersuchungsgebiet liegt zwischen $76^{\circ}26'$ und $76^{\circ}33'$ westlicher Länge und $3^{\circ}33'$ bis $3^{\circ}42'$ nördlicher Breite am Ostrand der mittleren Westkordillere (siehe Abbildung 2.8). Geomorphologisch gesehen handelt es sich hier einerseits um flache Flussebenen der Río Cauca Terrassen (im Osten) und andererseits um die Flanken der Westkordillere mit gebirgischem Relief im Westen.

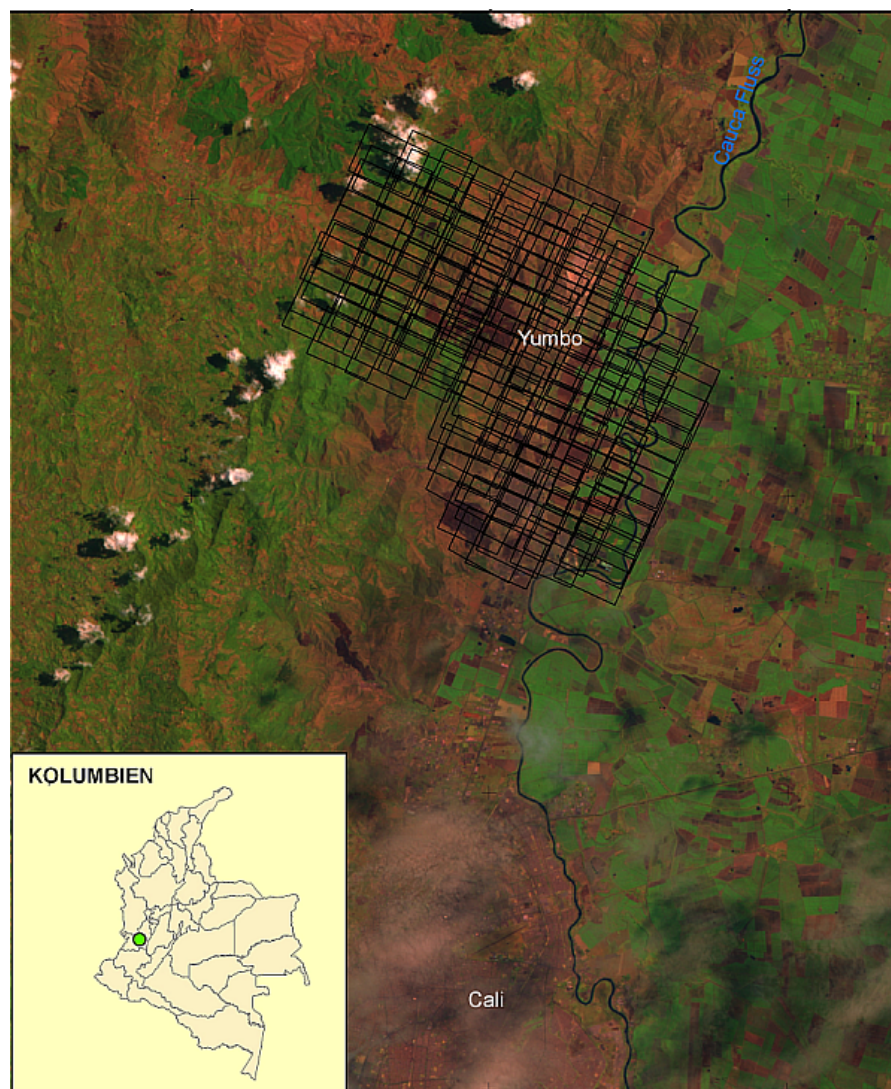


Abbildung 2.8: Übersicht über das Befliegungsgebiet im Gemeindebereich der Ortschaft Yumbo, Kolumbien. Quelle: im Hintergrund Aufnahme des Landsat ETM+ vom August 1998, entnommen vom USGS Global Visualization Viewer und in Schwarz eigene Blockausgleichung von digitalen AIC-P45 Luftbildern der Firma Geodesia, Bogota, Kolumbien.

2.2 Luftbilder

2.2.1 Metrische Digitalkameras

In der Luftbildphotogrammetrie werden momentan sowohl analoge als auch digitale Kamerasysteme verwendet. Inzwischen ersetzen großformatige digitale Luftbildkameras bereits heute einen großen Teil der analogen Luftbildkameras und es ist abzusehen, wann die analogen Kameras vollständig verdrängt werden. Darüber hinaus werden für kleinere und mittelgroße Befliegungsflächen sowie Sonderprojekte zunehmend auch digitale Mittelformatkameras eingesetzt (JACOBSEN (2009)). Im Rahmen dieser Arbeit wurden vor allem die Kamera vom Typ Rollei AIC-P20 für die Untersuchung der Baumarten verwendet, während zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der Landsat-Passpunkte die Kamera vom Typ Rollei AIC-P45 benutzt wurde.

Beide sind speziell für die Luftbildaufnahme und industrielle Anwendungen konzipierte Luftbildkameras mit auswechselbaren Mittelformatobjektiven (siehe Abbildung 2.9). Insbesondere bieten die AIC-P20 und AIC-P45 ein digitales preiswertes Fernerkundungssystem an, welches sich durch Sensorgrößen von 36,9 x 36,9 mm und 49,1 x 36,9 mm sowie 5.440 x 4.080 Pixel und 7.228 x 5.428 Pixel Auflösungen auszeichnet. Die Kameras sind in der Lage wahlweise in RGB oder CIR aufzunehmen. Andere Merkmale der Kameras sind in der Tabelle 2.1 enthalten.



(a) Rollei AIC-P20.

(b) Rollei AIC-P45.

Abbildung 2.9: Digitale Luftbildkamera Rollei AIC-P20 und AIC-P45. (Werkphoto Timble/Rolleimetric).

Zu den Vorteilen, die sich durch den Gebrauch von Digitalkameras ergeben, zählen die schnelle Verfügbarkeit der Bilder, die Möglichkeit der digitalen Nachbearbeitung der Rohdaten, die bessere Radiometrie (Farbkonstanz bei Kopiervorgängen und höherer Farbumfang), wie auch die Fähigkeit präziser digitale Geländemodelle zu generieren. Gleichsam verfügen analoge Bilder über eine weitaus geringere Farbtiefe als die Digitalbilder, so dass ein hochauflösender Scan auch nicht zu signifikanten radiometrischen

Merkmale	Rollei AIC-P20	Rollei AIC-P45
Kanäle	RGB	RGB
Linse	$f = 51,686 \text{ mm}$	$f = 47,079 \text{ mm}$
Sensorgroße	36,9 x 36,9 mm	49,1 x 36,9 mm
Bildaufflösung	4080 x 4076 Pixel	7228 x 5428 Pixel
Pixelgröße	9,0 μm	6,8 μm
Radiometrische Auflösung	16 bit	16 bit

Tabelle 2.1: Technische Daten der verwendeten Rolleimetric Luftbildkameras AIC-P20 und AIC-P45.

Verbesserungen beitragen kann. Dies spiegelt sich beispielsweise in einer besseren Auflösung und Objektidentifizierung bei Bereichen mit Schattenwurf wieder (HEURICH (2006)).

2.2.2 Befliegungen

Die Befliegungen für die Gebiete Santa Fé de Antioquia, Medellín und La Concordia wurden mit der AIC-P20-Kamera und einer 51,6 mm-Objektiv durchgeführt. Das Yumbo-Gebiet wurde mit der AIC-P45-Kamera und einer 47,08 mm-Objektiv geflogen.

Santa Fé de Antioquia, Kolumbien Das gesamte Gebiet wurde am 13.10.2005 in drei Teilen von der Befliegungsfirma Aeroestudio aus Medellin in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Physische Geographie der HHUD und der Fac. Arquitectura der Univ. Nac. Sede Medellin aufgenommen. Die Bildmaßstäbe variieren für die ersten zwei Gebiete V1 und V2 zwischen 1:11.450 und 1:11.750. Dies entspricht einer mittleren Flughöhe von 592 bis 607 m über Grund (siehe Tabelle 2.2). Damit konnte eine Bodenauflösung von 10 bis 11 cm erreicht werden. Für das Gebiet V3 betrug der Bildmaßstab 1:21.200 bei einer Flughöhe von 1.096 m über Grund. Die Bodenauflösung beträgt hier ca. 20 cm. Alle Bilder wurden mit 70–80% Längs- und 30% Querüberdeckung geflogen und liegen als RGB-Bilder vor.

Befliegung	Bildanzahl	Anzahl der Streifen	Längs / Querüberdeckung (%)	Maßstab	Flughöhe (m)	Pixel Auflösung (cm)
V1	34	1	70	11.450	592	10,3
V2	7	1	80	11.750	607	10,6
V3	234	6	80/30	21.200	1.096	19,1

Tabelle 2.2: Befliegungen mit der Rolleimetric AIC-P20 über das Testgebiet Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.

Medellín, Kolumbien Das gesamte Gebiet wurde durch zwei Streifen am 30.09.2005 von der Befliegungsfirma Aeroestudio aus Medellin in Zusammenarbeit mit dem Lehr-

stuhl für Physische Geographie der HHUD und der Fac. Arquitectura der Univ. Nac. Sede Medellin und EAFIT aufgenommen, die insgesamt 52 Bilder umfassen. Der Bildmaßstab betrug 1:22.100 bei einer mittleren Flughöhe von 1.142 m über Grund. Am Ende konnte eine Bodenauflösung von ca. 20 cm erreicht werden. Die Bilder wurden mit 90% Längs- und 20 – 30% Querüberdeckung geflogen und liegen als RGB-Bilder vor.

La Concordia, Kolumbien Das gesamte Gebiet wurde durch zwei Streifen im Oktober 2008 von der Firma DALE Digital aufgenommen, die insgesamt 27 Bilder ergaben. Der Bildmaßstab betrug 1:10.650 bei einer mittleren Flughöhe von 550 m über Grund. Eine Bodenauflösung von ca. 10 cm wurde erreicht. Die Bilder wurden mit 65 – 70% Längs- und 10% Querüberdeckung geflogen und liegen als RGB-Bilder vor.

Yumbo, Kolumbien Das Gebiet wurde durch zehn Streifen am 25.08.2009 von den Firmen DALE Digital und Geodesia in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Physische Geographie der HHUD mit insgesamt 149 Bildern aufgenommen. Parallel wurde dabei ein GPS-Gerät mit Doppelfrequenztechnik verwendet. Der Bildmaßstab betrug 1 : 41.806 bei einer mittleren Flughöhe von 1.970 m über Grund. Damit ist eine theoretische Bodenauflösung von ca. 28,5 cm erreichbar. Die Bilder wurden mit 65% Längs- und 30% Querüberdeckung geflogen.

2.3 Felderhebungen

Der folgende Abschnitt widmet sich der Baumkartierung der Parzellen von Santa Fé de Antioquia und Medellín. Hinsichtlich der Parzellen von La Concordia wurde keine Baumbestimmung durchgeführt, da es sich in erster Linie um ein Gebiet mit einer Monokultur der Ölpalme handelt. Zudem werden die Quellen der Passpunkte für die Blockausgleichung der Bilder beschrieben.

Baumkartierungen Der Datenlage der jeweiligen Untersuchungsgebiete entsprechend, sind unterschiedliche Strategien hinsichtlich der Datenerhebung für die Baumarten vor Ort erforderlich.

In Santa Fé de Antioquia, wurden zur Baumkartierung drei Versuchsflächen mit einer Ausdehnung von 6,4 (Parzelle A1), 13,6 (Parzelle A2) und 12,7 ha (Parzelle A3) ausgewählt. Diese dienen zur Beurteilung der Einzelbaumerkennung (siehe Kapitel 4) und Baumartklassifizierung (siehe Kapitel 5). Von jedem Baum in den Parzellen wurde wo immer möglich die Baumart bestimmt oder sie wurde als unbekannt bezeichnet (NN). Eine Liste der identifizierten Baumarten kann im Anhang A nachgeschlagen werden.

Dazu wurde bei der Auswahl der Parzellen auf Bereiche mit reichlicher und zugänglicher Baumvegetation geachtet. So entspricht die Parzelle A1 der Uferschutzzone eines kleinen Baches mit einer flachwelligen Topographie wo Galeriewälder, Weideflächen und weitere vereinzelte Bäume vorkommen. Die Parzelle A2 repräsentiert zum Großteil eine Gegend mit Wochenendhäusern und Bauernhöfen, die mit zahlreichen Obstbäumen auf einem leicht geneigten Gelände liegen.

Schließlich deckt die Parzelle A3 ein vorwiegend ebenes Gebiet ab, in dem Wochenendhäuser, mit in erster Linie vereinzelt Bäumen, vorherrschen. Abbildung 2.10 zeigt die Lage der Parzellen in Relation zum Befliegungsgebiet sowie die Kartierungsgebiete als Schrägsicht-3D Darstellungen.

Für die Stadt Medellín wurden zwei Untersuchungsgebiete ausgewählt: die Universitätsgelände der Universidad Nacional (Parzelle M1) und der Universidad de Antioquia (Parzelle M2), die in der Abbildung 2.11 zu sehen sind. Für ersteres lässt sich gut auf die Arbeit von MORALES (1996) aufbauen, in der bereits ein beträchtlicher Teil der Einzelbäume kartiert und identifiziert wurde. Hinsichtlich der Universidad de Antioquia war es möglich, ähnliche Informationen anhand einer aktuelleren Bestandsliste in digitaler Form zu erlangen (Plan Arbóreo de la Universidad de Antioquia, 2005; erhalten vom Herbarium Universidad de Antioquia). Darüber hinaus wurden eigene selektive Erhebungen des Baumbestandes vor Ort im Jahr 2006 durchgeführt, um die Information über bereits identifizierte Bäume in der Parzelle M1 zu erweitern. Eine Liste der gefundenen Baumarten kann in Anhang A verglichen werden.

Einmessung von Passpunkten Für die Untersuchungsgebiete Santa Fé de Antioquia und Medellín wurden keine Einmessungen von Passpunkten per GPS verwendet. Der Versuch differenzieller GPS-Daten im Raum Santa Fé de Antioquia zu gewinnen scheiterte trotz zweifacher Ansätze an logistischen Schwierigkeiten. Die Passpunkte wurden direkt aus den Satellitenbildern für Santa Fé de Antioquia und der schon existierenden Stadtkatasterkarten für Medellín entnommen (nach einer Vorgehensweise, auf die noch später im Abschnitt 3.4.2 eingegangen wird). Im Gebiet von La Concordia wurden Vermessungen von Passpunkten mit einem GPS Mobil Mapper im Navigationsmodus, mit einer Präzision von schätzungsweise 5 m von der Firma DALE Digital durchgeführt.

Der Yumbo-Block wurde von kinematischen GPS-Messungen der Flugzeugnavigation in Kombination mit differenziellen GPS-Bodenmessungen trianguliert. Vergleichend dazu wurde der Bildsatz mit aus Satellitendaten gewonnenen Passpunkten ebenfalls aerotrianguliert und daraus ihre Genauigkeitsabschätzung vorgenommen. Mehr Information dazu in Abschnitt 3.5.2.

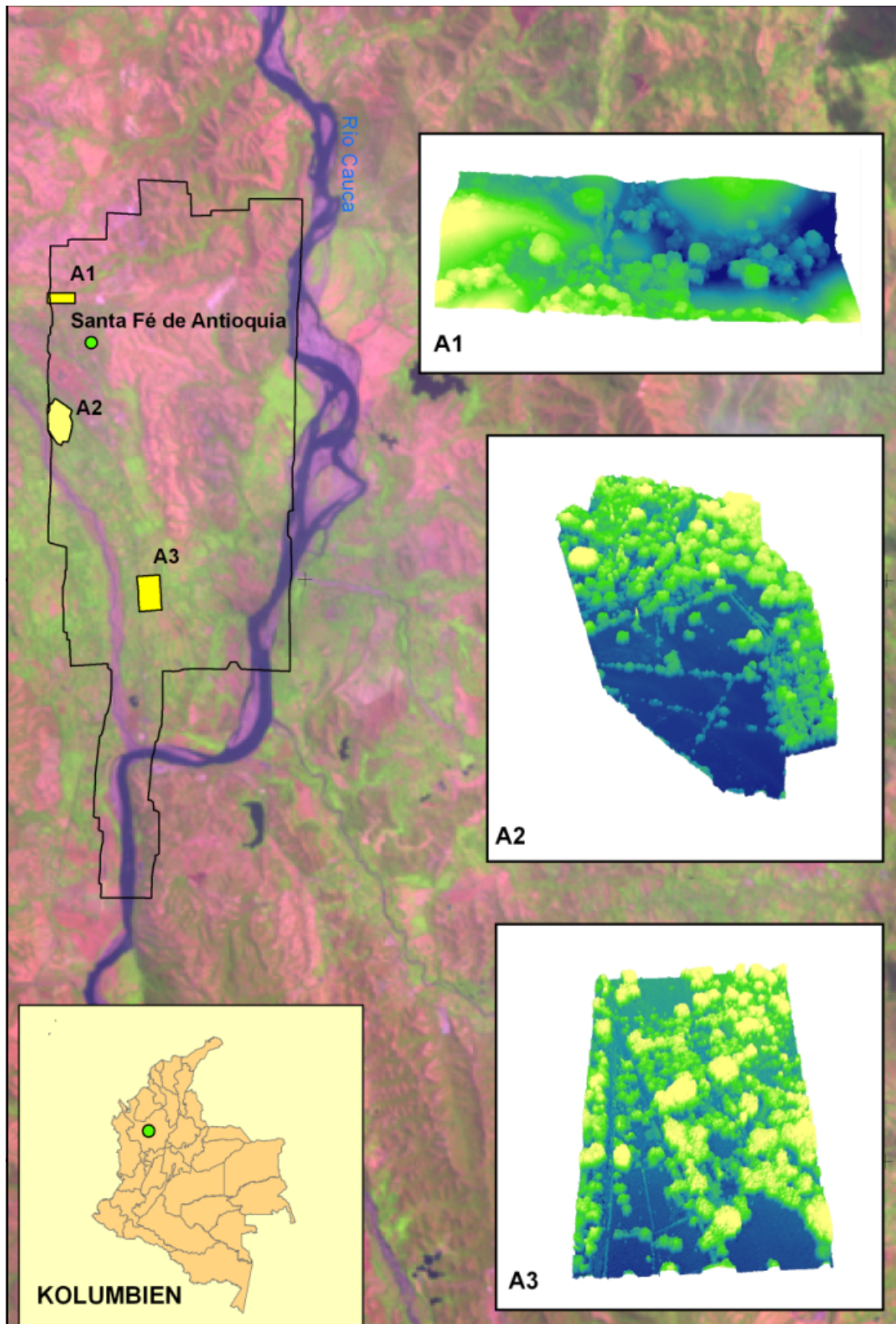


Abbildung 2.10: Übersicht des Überfliegungsgebietes und oblique 3D-Darstellungen der Parzellen A1, A2 und A3 zur Identifizierung der Bäume in Santa Fé de Antioquia, Kolumbien. Quelle: Im Hintergrund Aufnahme des Landsat ETM+ vom August 2000, entnommen vom USGS Global Visualization Viewer und innerhalb der schwarzen Markierung die Gesamtheit aller ge-tätigten Luftbildaufnahmen.

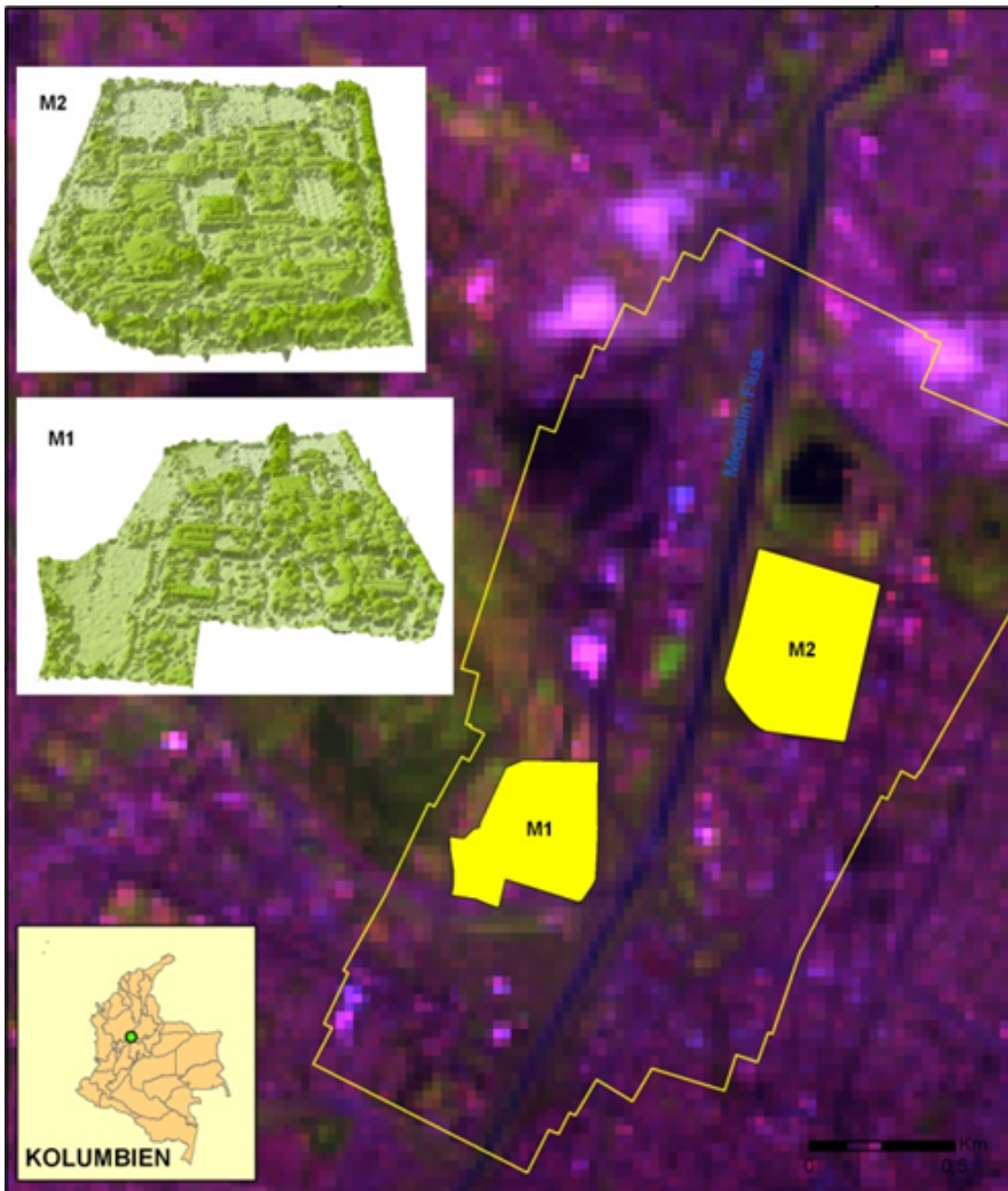


Abbildung 2.11: Übersicht des Überfliegungsgebietes und oblique 3D-Darstellungen der Parzellen M1 (Universidad Nacional) und M2 (Universidad de Antioquia) zur Identifizierung der Bäume in Medellín, Kolumbien. Quelle: Im Hintergrund Aufnahme des Landsat ETM+ vom August 2000, entnommen von der University of Maryland. Gelbe Linie: Rand der selbst erstellten Blockausgleichung.

Kapitel 3

Photogrammetrische Anwendungen

3.1 Einleitung

Die Photogrammetrie kann als ein Messverfahren auf der Basis photographischer Bilder bezeichnet werden. Sie gehört zu den Fernerkundungsverfahren (LINDER (2009)). Die Photogrammetrie beschäftigt sich mit der Gewinnung von Information über Objekte und Vorgänge mittels sich überlappender photographischer Bilder. Ihr eigentliches Ziel ist die Bestimmung der Form, Größe und Lage von Objekten jeder Art im Raum aufgrund der geometrischen Bild-Objekt-Beziehungen (SCHWIDEFSKY & ACKERMANN (1976)). Außerdem werden die Bedeutung (Objektklasse, Attribute) des radiometrischen und spektralen Aussehens (Helligkeit, Textur, spektrale Signatur) der Objekte und ggf. ihres zeitlichen Verhaltens (multitemporale Bildserien) berücksichtigt. Eine Hauptanwendung der Photogrammetrie ist die Herstellung von Karten in Form von Strichkarten, digitalen Geländemodellen und Orthophotokarten (KRAUS (2004)). Andere wesentliche Aufgaben sind die Erfassung und Aktualisierung der Geoinformationsdaten und -Archive im Verbund mit terrestrischen Verfahren und die multitemporale Analyse (BALTSAVIAS (1999), HEIPKE (2003)).

Die Photogrammetrie als Ingenieurdisziplin lässt sich bis in das 19. Jahrhundert zurückverfolgen. Für viele Jahre basierte sie auf photochemischen Bildern und deren Auswertung mit optisch-mechanischen Geräten. Diese Stufe der Entwicklung wird als analoge Photogrammetrie bezeichnet (KRAUS (2004)). Erst mit dem Aufkommen der Prozessrechner und dem empirischen und theoretischen Nachweis der hochgenauen automatischen Punktübertragung in digitalen Bildern Anfang der 80er Jahre hielt die digitale Bildverarbeitung Einzug in die Photogrammetrie (FÖRSTNER (2009)), was wiederum den Übergang von der Wiederherstellung der äußeren Orientierung der Luftbilder von analogen (anhand mechanischen und optischen Prinzipien) zu algorithmischen Verfah-

ren (anhand Gleichungen) antrieb (LINDER (2009)). Diese Tatsache erschloss eine neue Phase der Photogrammetrie, die bis heute alle klassischen photogrammetrischen Prozesse ausgehend von digitalen Bildern wie die Herstellung von digitalen Höhenmodellen und Orthophotos und die Bestimmung der geometrischen Orientierung mit Hilfe der Bündeltriangulation weitgehend automatisieren lässt (FÖRSTNER (2009)). Traditionell hatte sich die photogrammetrische Datenerfassung aus dem Flugzeug auf photographische zentralperspektivische Aufnahmen einzelner Bilder mit Film als Träger beschränkt (HEIPKE (2003)). Im Laufe des letzten Jahrzehnts hat sich die Situation geändert. Die ersten kommerziellen digitalen photogrammetrischen Kamerasysteme sind aufgetreten und haben sich auf dem Markt immer mehr durchgesetzt. Außerdem sind beträchtliche Ressourcen und großer Arbeitsaufwand in die Entwicklung der digitalen photogrammetrischen Systeme investiert worden, was eine rasante technische Entwicklung ermöglicht hat.

3.2 Aufbau des Kapitels

Zunächst werden im Abschnitt 3.3 die traditionelle Vorgehensweise wie auch die letzten Entwicklungen in der Photogrammetrie präsentiert, insbesondere im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit in der Charakterisierung von Waldbeständen. Anschließend werden die verwendeten photogrammetrischen Methoden, ausgehend von digitalen mittelformatigen Luftbildern, im Abschnitt 3.4 dargestellt. Diese werden für die Aerotriangulation in Abschnitten 3.4.1, die Gewinnung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) in 3.4.3, von Geländemodellen (DGM) in 3.4.4 und von Orthobildmosaiken in 3.4.6 für die Untersuchungsgebiete, sowie für die Ableitung der Baumhöhen in 3.4.5, spezifiziert. Bei der Aerotriangulation werden in dieser Arbeit überwiegend Passpunkte aus frei verfügbaren Datenquellen verwendet, deren Genauigkeiten nicht an DGPS-Daten heranreichen. Dabei werden die Methoden zur Bewertung dieser Genauigkeit im Vergleich zu denen der kinematischen Doppelfrequenz-GPS-Daten und DGPS-Passpunkten dargelegt (siehe Abschnitt 3.4.2).

Die Ergebnisse aus diesen Methoden und deren Diskussion werden in Abschnitten 3.5 und 3.6 vorgestellt. Aufgrund der relativ großen Verzerrungen der aus Mittelformatkameras stammenden Bilder wird auf das Thema der flugbegleitenden Kamerakalibrierung eingehend eingegangen. Ein Schwerpunkt ist die Erstellung von DOMs und DGMs von ausreichender Höhen- und Lagegenauigkeit und Auflösung (< 30 cm) als Grundlage zur Baumkronenunterscheidung (siehe Kapitel 4). Das gleiche gilt auch für die Gewinnung von Orthobildmosaiken, welche in Kapitel 4 für die Baumkronenextraktion und in Kapitel 5 für die Baumklassifizierung Verwendung finden. Abschließend wird zur

Ausschöpfung des Potentials für forstliche Anwendungen die Eignung von digitalen Bildern mit der Erfassung von Boden- und Bestandsoberflächen untersucht. Dabei ist es das Ziel, vor allem die folgenden Fragen zu beantworten:

- Eignen sich Passpunkte aus weniger genauen aber frei verfügbaren Datenquellen wie Landsat-Satellitendatensätzen und DGMs aus SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) für die Aerotriangulation von digitalen mittelformatigen metrischen Bildern zur Baum- und Waldbestandsparametrisierungen mit Folgeprozessen?
- In welchem Genauigkeitsbereich liegen die Boden- und Oberflächenmodelle, die aus den Luftbildern mittels photogrammetrischer Software abgeleitet werden? Reichen diese Genauigkeiten für eine Bestimmung der Baumhöhen auf Bestandsbene aus?

3.3 Photogrammetrische Grundzüge

Ein typischer Ablauf der photogrammetrischen Vorgehensweise ist in der Abbildung 3.1 dargestellt. Der Prozess beginnt mit der Aufnahme der Luftbilder, die insbesondere in eigenen Projekten eine vorausgehende Flugplanung und Signalisierung von Passpunkten im Gelände erfordert. Bei analogen Aufnahmen sind das Scannen der Bilder und die Vermessung ihrer inneren Orientierung notwendig. Dahingegen ist häufig bei digitalen Kameras eine mehrfache Kalibrierung durchzuführen, um die geometrischen Bildverzerrungen möglichst zu minimieren (siehe Abschnitt 3.3.2) (KRAUS (2004, S.56)).

Im Mittelpunkt des photogrammetrischen Gesamtsystems steht die Aerotriangulation, die zur Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter aller Bilder dient. Die Aerotriangulation lässt sich in drei Phasen, Planung/Vorbereitung, Messung und Berechnung gliedern (SCHWIDEFSKY & ACKERMANN (1976, S.196)). Die Elemente der äußeren Orientierung sind in der Regel aus Pass- und Verknüpfungspunkten abzuleiten. Bei der Vorbereitung müssen u.a. die Markierung und Verteilung von Verknüpfungspunkten, die Anzahl und die Anordnung der Passpunkte und die Bereitstellung der benötigten Unterlagen (Indexkarte, Passpunkliste) berücksichtigt werden, wie im Abschnitt 3.3.3 beschrieben wird. Die Messung umfasst die Identifizierung, Übertragung und Markierung der Verknüpfungs- und Passpunkte auf die Bilder. Die Berechnung der äußeren Orientierung eines Bildblockes erfolgt in der Regel durch die Bündelausgleichung, wie im Abschnitt 3.3.4 dargelegt und illustriert wird. Bei der Auswertung wird zwischen der gegenseitigen oder relativen Orientierung und der absoluten Orientierung der Bildpaare unterschieden. Die Erste stützt sich ausschließlich auf Bildinformationen. Sie erzielt die

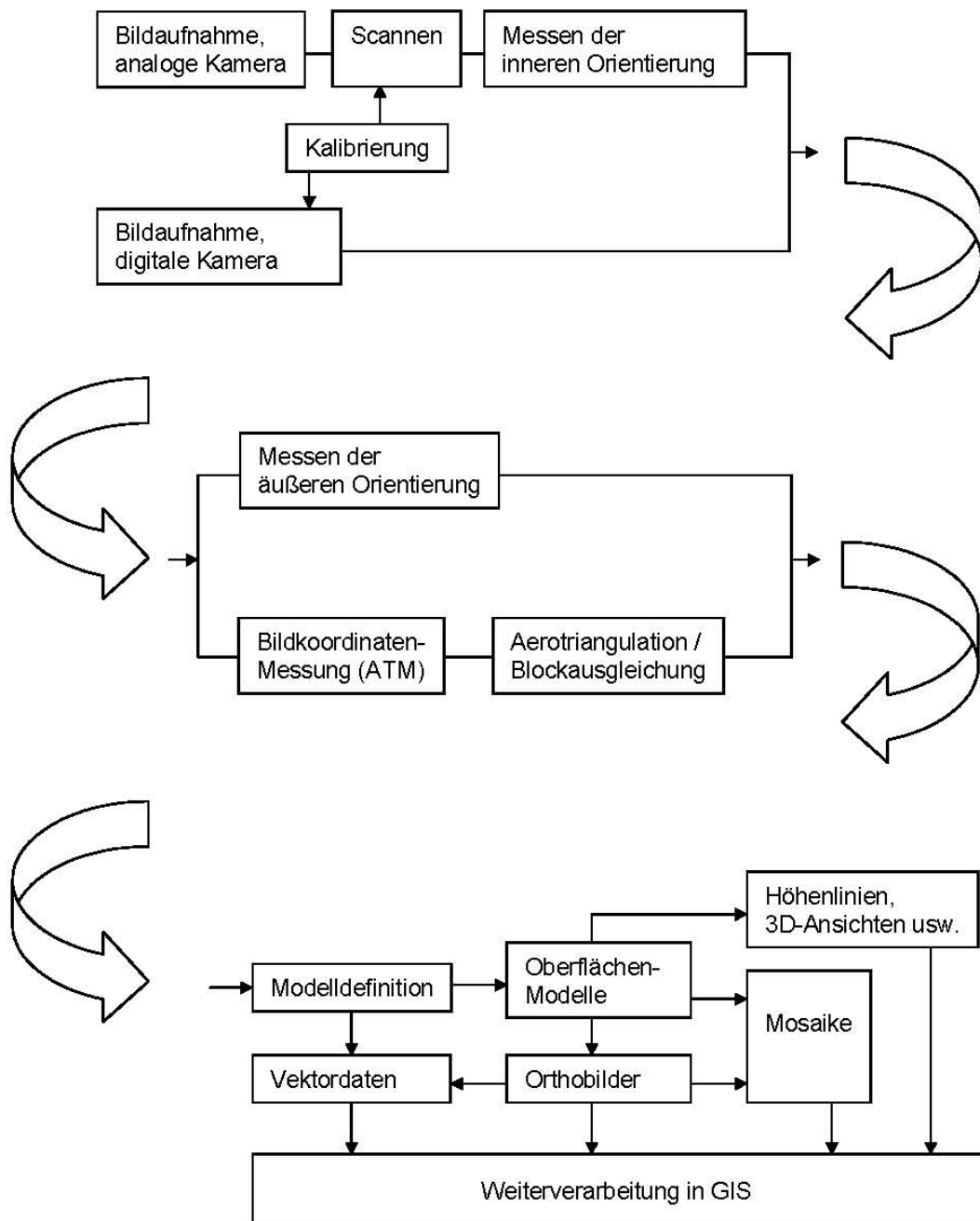


Abbildung 3.1: Schematisierte Darstellung des typischen Arbeitsablaufs in der digitalen Photogrammetrie (Quelle: LINDER (2003)).

gegenseitige Orientierung der Strahlenbündel durch die Wiederherstellung der Schnitte homologer Strahlenpaare. Mit der absoluten Orientierung wird das bereits relativ orientierte Modell als Einheit in Bezug auf das übergeordnete Koordinatensystem orientiert (SCHWIDEFSKY & ACKERMANN (1976, S.154)). Dazu sind Passpunkte erforderlich.

Nur mit genauen Ergebnissen aus dem vorigen Prozess können gute weitere Produkte hergestellt werden. Am Ende des Auswertergebnisses stehen Oberflächenmodelle, Geländemodelle, Orthobilder, Photomosaik und Vektordaten (Höhenpunkte oder -Linien, Objekte, usw.), die sich weiter als Geodaten in einem GIS (Geo-Informationssystem) verarbeiten lassen.

Eine andere Methode, die in den letzten Jahren besondere Bedeutung erlangt hat, befasst sich mit der Verwendung von GPS- und IMU (Inertial Measurement Unit, auch INS: Inertial Navigation System)-Daten, die die direkte Ermittlung der äußeren Orientierung der Luftbildaufnahmen ermöglichen (MAAS & PFEIFER (2005)). Das Hauptziel einer Aerotriangulation mit GPS/IMU-Daten ist, den Kostenaufwand eines Projektes dadurch zu reduzieren, dass weniger Passpunkte - theoretisch nur einen Passpunkt in der Blockmitte - vor Ort vermessen werden müssen (HINSKEN (2009, S.135)). In vielen Fällen werden aber trotzdem Passpunkte in den Auswertprozess einbezogen. Einerseits, um eine Kontrolle zu haben, und andererseits, um die Elemente der äußeren Orientierung zu verbessern (KRAUS (1994, S.117)).

In den folgenden Abschnitten wird auf einige dieser photogrammetrischen Aspekte und Prozesse eingegangen.

3.3.1 Digitale Luftbildmesskameras

In der Luftbildphotogrammetrie werden momentan sowohl analoge (mit Film arbeitende) als auch digitale Kamerasysteme verwendet. Die großformatigen filmbasierten Messkameras, auch als Reihemesskameras (RMK) bezeichnet, waren bis vor ein paar Jahren die Luftbildkameras, die am häufigsten im praktischen Einsatz waren (KRAUS (2004, S.151)). Inzwischen haben groß- und mittelformatige digitale Luftbildkameras bereits heute einen großen Teil der analogen Luftbildkameras ersetzt (JACOBSEN (2009)).

Im Gegensatz zu analogen Luftbildern, die aus einer Aufnahme bestehen, werden die großformatigen digitalen Flächenbilder aus Teilbildern zusammengesetzt, die mittels mehrerer Teilkameras erstellt werden (JACOBSEN (2008)). Da die großformatigen digitalen Kameras teuer und schwergewichtig sind, werden für kleinere Sonderprojekte zunehmend auch digitale mittelformatige Kameras eingesetzt (JACOBSEN (2009)),

die wie bei analogen Kameras für jede Aufnahme aus nur einem Sensorbild bestehen. Diese Kameras können bei kleineren Gebieten kostengünstiger eingesetzt werden, zum Beispiel bei Trassenbefliegungen, wie Stromleitungen oder Verkehrswegen (FARKAS (2007)).

Der Sensor digitaler photogrammetrischer Kameras besteht grundsätzlich aus CCD ((*Charge Coupled Device*))-Sensoren, deren Detektor-Elemente, nämlich die Pixel, können sowohl in rechteckigem Format bei Matrix-Systemen als auch in Arrays bei Zeilen-Systemen platziert werden (ZHANG (2005)). Die Matrixkameras folgen hinsichtlich der Aufnahmekonfiguration mehr der klassischen Filmkamera, in der jedes Pixel gleichzeitig in einer Matrix erfasst wird. Die wichtigsten Anbieter von großformatigen digitalen Luftbildkameras sind die Firmen INTERGRAPH, Bereich Z/I Imaging, mit der Digital Mapping Kamera (DMC) und Microsoft mit der Vexcel-Ultracam, während im Mittelformatbereich Firmen wie Trimble (ehemals Rollei) mit der AIC (Aerial Industrial Camera), IGI mit der Hasselblad DigiCAM und Optech mit der DIMAC vorherrschen. Information über die Auswertung von einigen dieser digitalen Kameras kann z.B. in PETRIE & WALKER (2007), JACOBSEN (2009) und JACOBSEN ET AL. (2010) gefunden werden.

Die wichtigsten Vorteile der digitalen Systeme im Vergleich zu den traditionellen filmbasierten erfassten Aufnahmen umfassen den reduzierten Aufwand bei der Aufbereitung des photographischen Materials, das Potenzial zur Echtzeitverarbeitung durch Automatisierung der Auswertung, bessere Auflösungswerte im Strahlungsbereich (spektral und radiometrisch), insbesondere in kontrastarmen Aufnahmen ausgeprägt (HEIPKE (2003), ZHANG (2005)), und die Erweiterung des erfassbaren elektromagnetischen Spektrums. Dadurch können z.B. weitaus mehr Bilddetails, die in Abschattungsbereichen von Bäumen oder Wolken liegen, verwertet werden. Außerdem können geometrische und radiometrische Verschlechterungen der Originaldaten beim Scanprozess vermieden werden (CRAMER (2001), HEIPKE (2003)).

Das hohe Genauigkeitsniveau der digitalen Kameras ist schon weitgehend überprüft worden. So beispielweise werden bei vergleichbarer Objektpixelgröße mit der DMC-, UltraCamX- und ADS40-Aufnahmen bessere Lagegenauigkeiten als mit analogen Kameras (z.B. RC-30 oder RMK-TOP) und mit DMC- und ADS40-Bildern auch eine bessere Höhengenaugigkeit erzielt (JACOBSEN (2008)). Für die praktischen Anwendungen sollen sogar weniger Passpunkte notwendig sein als bei Bildflügen mit analogen Kameras.

Das Bodenauflösungselement einer Kamera ergibt sich aus der Größe der aus der Geländeoberfläche reproduzierten Oberfläche eines einzelnen Pixels (GSD: Ground Sampling

Distance). Durch die digitalen Kamerasysteme sind - in Abhängigkeit von Flughöhe, Objektivbrennweite, Sensorpixelgröße, Integrationszeit eines einzelnen Abtastvorganges und der Geschwindigkeit des Flugzeuges - Bodenauflösungen von weniger als 10 cm möglich, die auch die Generierung von Oberflächenmodellen mit einer Auflösung von 1 m und sogar darunter erlauben (KÜHN & HÖRIG (1995, S.33), BALTSAVIAS ET AL. (2008)). Obwohl satellitengetragene Sensoren (Quickbird, Rapid Eye) mittlerweile im panchromatischen Bereich eine Auflösung von etwa einem halben Meter erreichen können und flugzeuggetragene Radarsensoren (InSAR) ebenfalls die Meter-Grenze unterschreiten, können diese Sensoren bisher nicht zu einer detaillierten Analyse und vor allem von Waldstrukturen auf der Einzelbaumebene beitragen (HEURICH (2006)).

3.3.2 Kamerakalibrierung

Bei der photogrammetrischen Auswertung wird von der Annahme ausgegangen, dass das Bild eine zentralperspektive Abbildung des Geländes darstellt. Die Abweichung von diesem Ideal wird Verzeichnung genannt (ALBERTZ (2009, S.34)). Diese tritt in photogrammetrischen Kameras in der Regel als systematischer Bildfehler auf, nämlich als die Differenz zwischen dem mathematischen Modell bzw. der Perspektive und der tatsächlichen Bildgeometrie (JACOBSEN (2008)).

Die Objektivverzeichnung, sei sie aus einer Laborkalibrierung oder aus einem Testfeld - bzw. Selbstkalibrierung bekannt, muss an den Bildkoordinaten der gemessenen bzw. lokalisierten Punkte berichtigt werden (KRAUS (2004, S.56)). Die Selbstkalibrierung kann durch Blockausgleichungen mit der Anwendung von zusätzlichen Parametern bestimmt werden. Im Fall einer Blockausgleichung ohne Selbstkalibrierung beeinflussen die systematischen Fehler die Residuen der Bildkoordinaten. Zur Darstellung der Verzeichnung eines Objektivs werden alle Bildkoordinatenresiduen des Blockes im Bildraum überlagert und in Teilflächen gemittelt. Diese Residuen geben einen guten Überblick über die Geometrie der systematischen Bildfehler (JACOBSEN (2008)).

Moderne photogrammetrische Objektive haben eine kleine radiale Verzeichnung, die innerhalb von $\pm 5 \mu\text{m}$ liegt. Bei filmbasierten konventionellen Luftbildkameras ist die Radiale Verzeichnung sogar kleiner als $\pm 3 \mu\text{m}$. Demgegenüber erreichen nicht speziell für Messkameras entwickelte Objektive radiale Verzeichnungswerte bis über $100 \mu\text{m}$ (KRAUS (2004, S.52)).

3.3.3 Passpunkte

Geländekontrollen sind ein wichtiger Bestandteil von Fernerkundungsvorhaben. Passpunkte (engl. *Ground Control Point*, GCP) werden in der Photogrammetrie als Geländekontrollen verwendet, um den mathematischen Zusammenhang zwischen Objekt- und Bildkoordinaten herzustellen und die Orientierungsparameter zu bestimmen. Es handelt sich um Punkte im Gelände, deren Lage im Raum in einem entsprechenden Koordinatensystem (x, y, z) bekannt sind und die in mindestens zwei Luftbildern eindeutig zu erkennen sind. Nach den gegebenen Objektkoordinaten (xy, z, xyz) unterscheidet man Lage-, Höhen- und Voll- Passpunkte (SCHWIDEFSKY & ACKERMANN (1976)).

Es hängt stark vom Maßstab und von der Auflösung der Bilddaten sowie von der Landschaftsstruktur ab, welche Objekte sich als Passpunkte eignen. In kleinen Bildmaßstäben und insbesondere in Satellitenbildern kommen in der Regel topographische Objekte (z.B. Kreuzungen von Verkehrswegen, einzelnstehende Felsen und Bäume) in Frage, während dies möglicherweise nicht für große Bildmaßstäbe und insbesondere für photogrammetrische Zwecke ausreicht, so dass in solchen Fällen signalisierte Punkte verwendet werden sollten. Die Koordinaten der Passpunkte im geodätischen Koordinatensystem können aus vorhandenen topographischen Karten entnommen werden. Sie werden aber heute üblicherweise durch GPS (Global Positioning System)-Differenzverfahren ermittelt (ALBERTZ (2009, S.100)). Bei diesem werden zwei Empfänger eingesetzt, wobei einer davon auf einem Geländepunkt mit bekannten X, Y, Z -Koordinaten stationiert wird. Bei höhenwertigen GPS-Empfängern werden dadurch Genauigkeiten im Millimeterbereich erreicht (HILDEBRANDT (1996, S.213)).

3.3.4 Blockausgleichung

Hauptzweck der Ausgleichung ist die Rekonstruktion der äußeren Orientierung aller Bilder zur Zeit der Aufnahme, bzw. die Berechnung der genauen Position des Projektionszentrums im Raum (Koordinaten x_0, y_0, z_0) und der Rotationswinkel der Kamera (ω, ϕ, κ) zur Bestimmung der sechs Orientierungsparameter. Außerdem werden die Objektkoordinaten aller bei der Aerotriangulationsvorbereitung einbezogenen Punkte bestimmt (KRUCK (2009)). Das Grundprinzip der Aerotriangulation ist die Kollinearitätsbeziehung. Mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen können bei der Aerotriangulation Punkte in einem übergeordneten Koordinatensystem gemessen werden, wenn die Translation in das übergeordnete Koordinatensystem bekannt ist (KRAUS (2004)).

Das Standardverfahren der Aerotriangulation ist heute die Bündelblockausgleichung, eine Gesamtausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (KRUCK (2009)).

Das Projektionszentrum und die Bildkoordinaten bilden ein räumliches Strahlenbündel. Die Abbildung 3.2 stellt dieses Prinzip dar. Für die Blockausgleichung sind zwischen den Bildkoordinaten x, y homologer Bildpunkte Verbindungen herzustellen und diese widerspruchsfrei auszugleichen (HILDEBRANDT (1996, S.226)). Die äußeren Orientierungselemente der Strahlenbündel eines Bildverbandes werden simultan, d.h. für alle Messbilder gleichzeitig, bestimmt (KRAUS (2004)). Eine der Schwächen der Bündelblockausgleichung ist ihre Empfindlichkeit gegen systematische Bildfehler (HILDEBRANDT (1996, S.227)). Die Einführung von zusätzlichen Parametern und die Möglichkeit der simultanen Kamerakalibrierung in der Bündelblockausgleichung reduzieren diese systematischen Bildfehler und des photogrammetrischen Systems und steigern die Genauigkeit (HILDEBRANDT (1996), KRUCK (2009)).

Für die Bündelblockausgleichung stehen heute für digitale photogrammetrische Auswertesysteme mehrere bewährte und ausgereifte Programmpakete zur Verfügung. Beispiele sind BLUH, BINGO, ORIMA und MATCH-AT. Trotzdem ist es in den letzten Jahren häufiger geworden, die äußere Orientierung einer Kamera im Flugzeug durch die Anwendung moderner GPS-INS-Systeme mit hoher Genauigkeit zu ermitteln, die ihre Position und räumliche Lage fortlaufend messen (ALBERTZ (2009)).

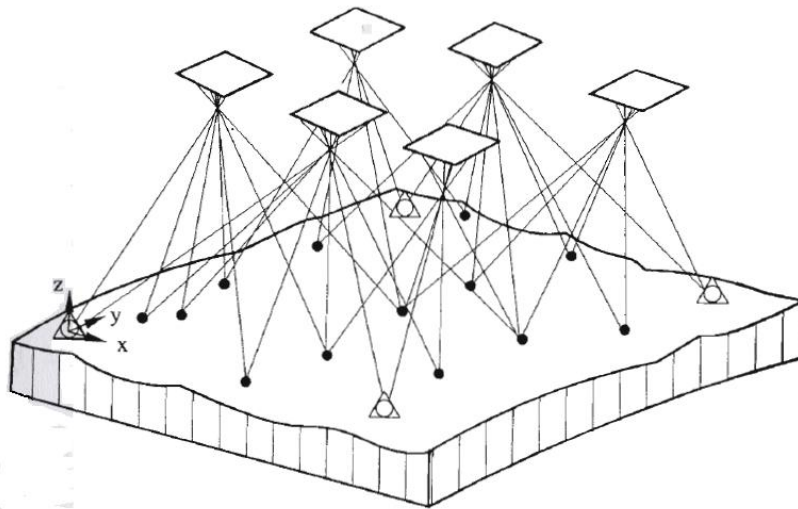


Abbildung 3.2: Grundprinzip der Bündelblockausgleichung. Verknüpfungs- und Passpunkte werden in ihrer Beziehung als Punkte und Dreiecke dargestellt (Quelle: KRAUS (2004)).

Die Ergebnisse der Aerotriangulation kommen häufig als unverzichtbare Arbeitsgrundlage für weitere Aufgaben wie z.B. die Einrichtung von stereoskopischen Paaren, die Erfassung von Vektordaten, die Bestimmung hochgenauer Punkte, die Erstellung von DGMs/DOMs und die Orthorektifikation in Frage. Sie sind auch eine wichtige Grundlage der nachfolgenden Messungen und Auswertungen.

3.3.5 Digitale Höhenmodelle

Ein digitales Geländemodell (DGM) kann als die Darstellung der Geländeoberfläche in einem regelmäßigen Punktraster oder einem Netz unregelmäßiger Dreiecke (TIN - Triangulated Irregular Network) mit räumlichen Koordinaten bezeichnet werden (LINDER (2009)). Das DGM bezieht sich auf die Geländeoberfläche im Sinne der Topographie, das heißt, in ihr sind nicht auf dem Boden liegende Punkte schon eliminiert (ZHANG (2005), ALBERTZ (2009)). Im Gegensatz dazu verläuft ein digitales Oberflächenmodell (DOM) im Wesentlichen über Gebäude, Vegetation und andere Objekte. Das DOM kann aber auch natürliche Geländeeigenschaften umfassen.

Zur Gewinnung von Geländemodellen durch flugzeuggestützte Messmethoden können sowohl stereophotogrammetrische Messungen als auch Daten aus Laserscanning oder Radar-Interferometrie InSAR zum Einsatz kommen (HODGSON ET AL. (2003), HIRSCHMUGL ET AL. (2007)). Zur Auswahl der optimalen Methode für einen bestimmten Einsatz sind verschiedene Faktoren der Datenaufnahme (z.B. Abdeckung, Wetterbedingungen, Kosten) und der Oberflächenrekonstruktion (z.B. Genauigkeit, Redundanz, Verarbeitungszeit) zu berücksichtigen (STILLA ET AL. (2009)).

Das Laserscanning/LIDAR -System (Light Detection und Ranging) ermöglicht die Herstellung digitaler Oberflächenmodelle mit einer Höhengenaugigkeit von unter 10 bis 20 cm. Eine vergleichbare Höhengenaugigkeit lässt sich auch aus Luftbildern mit 10 bis 20 cm Auflösung erzielen. Allerdings ist die Zuverlässigkeit automatischer Bildzuordnungsverfahren deutlich niedriger, wodurch der interaktive Nachbearbeitungsaufwand wesentlich erhöht wird. Flugzeuggestützte InSAR-Systeme eignen sich mit Streifenbreiten von bis zu 10 km zur Aufnahme größerer Flächeneinheiten, bieten aber bestenfalls ein Genauigkeitspotential von 50 cm (MAAS & PFEIFER (2005)).

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Anwendung von DGMs/DOMs aus digitalen Luftbildern und es wird deswegen die deskriptive Vorgehensweise auf diese Methode beschränkt. Zahlreiche Veröffentlichungen zu den anderen Ansätzen in der Forstwirtschaft sind vorhanden, wie zum Beispiel in KRAUS & PFEIFER (1998), HODGSON ET AL. (2003) und MAAS & PFEIFER (2005).

Die automatische Generierung von DOMs aus Luftbildern besteht grundsätzlich aus den folgenden Schritten:

- Bildzuordnung oder Bildkorrelation (image matching).
- Bestimmung der Koordinaten der Punkte.
- Interpolation zu einem Modell TIN oder Raster.

Die Entwicklung der Technik der Bildkorrelation ist in den letzten Jahren so vorangekommen, dass sich Modelle mit sehr hoher Qualität aus digitalen Luftbildern ableiten lassen (BALTSAVIAS ET AL. (2008)). Die Grundlage der Bildzuordnung ist die Bestimmung der Bildelemente, mit denen ein Ähnlichkeitsmaß der Bildbereiche berechnet und bewertet wird. Diese Bildelemente lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilen:

1. Auf der Basis von Grauwerten (area based matching - ABM).
2. Auf der Basis von Merkmalen (feature based Matching- FBM).

Die ABM-Verfahren arbeiten häufig mit lokalen Fenstern. Beispiele dafür sind die Kreuzkorrelations- und die kleinste-Quadrate Methode (ZHANG (2005)). Bei beiden Ansätzen wird eine Mustermatrix pixelweise über eine größere Suchmatrix eines zweiten Bilds geschoben. Der Kreuzkorrelationskoeffizient etabliert durch den höchsten Korrelationskoeffizienten der Grauwerte die beste Lageübereinstimmung von Muster- und Suchmatrix (LINDER (2009)). Die Zuordnung durch die Methode der kleinsten Quadrate (engl. *Least square matching* - LSM) erfolgt durch die Ermittlung der Beziehungen zwischen den Grauwerten der Muster- und Suchmatrix als nichtlineare Verbesserungsgleichungen (ZHANG (2005)).

Die FBM-Technik bestimmt die Zuordnung korrespondierender Merkmale in mehreren Bildern. In einem ersten Schritt wird in jedem Bild die Merkmalsextraktion durchgeführt und es werden die das Merkmal beschreibenden Attribute ermittelt. Als geeignete Merkmale können markante Punkte, Kanten, Liniensegmente, Konturen und Regionen einbezogen werden. Als Eigenschaften lassen sich beispielweise der minimale und maximale Grauwertgradient für Punkte; die Richtung, Länge und Krümmung für die Kanten und die Größe, Form und der mittlere Grauwert für die Regionen nehmen, die wiederum Invarianz gegenüber geometrischen sowie radiometrischen Verzerrungen aufweisen. Anschließend sollten die korrespondierenden Merkmale in den verschiedenen Bildern ermittelt werden, dadurch dass die geometrische und radiometrische Objektrauminformation zur Objektrekonstruktion berücksichtigt werden (ZHANG (2005)).

Der Matching-Vorgang ergibt eine 3D-Punktwolke mit regulärer Verteilung, die sich durch die Einbeziehung von anderen Komponenten, wie Bruchkanten, ein DOM-repräsentierendes Rasterbild erstellen lassen (BALTSAVIAS ET AL. (2008)). Auf dem Markt liegen schon verschiedene kommerzielle Softwarepakete vor, die die automatische Gewinnung von qualitativ hochwertigen DOMs aus digitalen Bildaufnahmen ermöglichen, wie beispielweise Match-T (Inpho GmbH), LPS (Erdas Inc) und NGATE- Socet Set (BAE Systems) (ZHANG (2005)).

Schwierigkeiten bei der Erstellung von DOMs mittels Bildzuordnung ergeben sich nach ZHANG (2005) und BALTSAVIAS ET AL. (2008) u.a. bei texturarmen Regionen, verschiedenen Objektdiskontinuitäten, sich wiederholenden Strukturen, mehrdeutigen Objektstrukturen, Verdeckungen, Abschattungen, Objekten in Bewegung, durchsichtigen Oberflächen und radiometrischen Artefakten wie Reflexionen. Auf diese Weise ist es häufig, dass Matching-Algorithmen in Bereichen mit schwachem Kontrast wie z.B. Wäldern, Gletschern, Wiesen und Wüsten, falsche Punkte oder überhaupt keine Punkte finden können (SAUERBIER (2004)). In Waldbereichen weist das Baumkronendach in Bildpaaren normalerweise eine komplexe Struktur mit verschiedenen Verdeckungen auf. Die Unterschiede in der Verdeckung und die Schwierigkeit in der Sichtbarkeit des Waldbodens steigen proportional zum Basisverhältnis (die Verhältniszahl B:H zwischen dem Mittelabstand zweier Aufnahmen und der Flughöhe) (HIRSCHMUGL ET AL. (2007), ST-ONGE ET AL. (2008)). Ebenso kann sich die Gewinnung eines DOMs aus großmaßstäblichen Bildern, die für die Baumerkennung erforderlich sind, schwieriger erweisen als aus kleinmaßstäblichen wegen des größeren Verhältnisses zwischen Flughöhe und Objekthöhe (ZHANG (2005)).

In forstwirtschaftlichen Anwendungen wird sowohl ein DOM als ein reines DGM zur Berechnung der Baumhöhen benötigt. Trotzdem ist der Boden während der Vegetationszeit in der Regel in bewaldeten Gebieten beinahe unsichtbar (BALTSAVIAS ET AL. (2008)). Eine Möglichkeit diese Behinderung zu überwinden besteht darin, Punkte auf der Bodenoberfläche in der Nähe der Bäume zu messen. Dies ist jedoch nur möglich bei eher flachem Gelände. Alternativ kann das DGM aus dem DOM mittels Softwareprogrammen oder LIDAR-Information abgeleitet werden, im letzteren Fall nur, wenn das Kronendach nicht besonders dicht also lückig ist oder Wälder sich im laubfreien Zustand befinden.

Erzeugung des DGMs aus einem DOM Die Generierung des DGMs durch die Filterung der DOM-Höhe ist ein kritisches Verfahren, insbesondere in Städten und bewaldeten Regionen (ZHANG (2005)) und in Bereichen mit starken Geländeneigungen (KOBLE ET AL. (2007)). Bei Baumbedeckung stellen der Schlussgrad, die Volumen und die Dichte sowie die Komplexität des Kronendaches Faktoren dar, die die Bodensichtbarkeit bestimmen (KOBLE ET AL. (2007)). Ebenfalls sind die Baumart und die Jahreszeit, insbesondere in gemäßigten Regionen, sehr wichtig für die Planung von Bildflug- oder LIDAR-Missionen (BALTSAVIAS (1999)).

Photogrammetrische Verfahren waren für lange Zeit der herkömmliche Ansatz zur Gewinnung von digitalen Geländemodellen (CLARK ET AL. (2004)). Seit geraumer Zeit hat sich das flugzeuggetragene Laserscanning jedoch sehr schnell als Standardverfah-

ren zur Generierung hochgenauer digitaler Geländemodelle, zumindest in gemäßigten Zonen der Erde, durchgesetzt (MAAS & PFEIFER (2005)). Bei der Geländemodellierung in bewaldeten Gebieten wird zunehmend das LIDAR-System aufgrund seiner Durchdringungsfähigkeit zu bestimmten Jahreszeiten eingesetzt. Die passive Technik der Luftbildphotogrammetrie hingegen erfordert hinreichende Beleuchtungsbedingungen auf dem in der Regel abgeschatteten Boden in mindestens zwei Luftbildern (KRAUS & PFEIFER (1998), HYYPPÄ ET AL. (2000)), was die Aufgabe sehr erschwert, ein DGM in dichten bewaldeten Gebieten zu gewinnen (ABRAHAM & ADOLT (2006), KOBLER ET AL. (2007)), was auch für den entlaubten Waldzustand zutrifft. In gemäßigten Breiten sind hohe Durchdringungsraten nur im Winter möglich, wenn die Laubbäume ihr Laub abgeworfen haben. Im Sommer ist die Durchdringungsfähigkeit des LIDAR durch die hohe Absorption von Laubbaumblättern im nutzbaren Wellenbereich stark eingeschränkt (HEURICH (2006, S.68)). Eine ähnliche Situation ist für tropische Trockenwälder mit dem Belaubungswechsel zwischen Regen- und Trockenzeit bei standortspezifischen Abwandlungen gegeben. Einschränkungen ergeben sich insbesondere in sehr dichten Nadelholzbeständen oder vor allem im immerfeuchten tropischen Regenwald (MAAS & PFEIFER (2005)). In diesen ständig belaubten Waldarten wird die Anwendungsmöglichkeit von LIDAR und der photogrammetrischen Ansätze aus dem gleichen Grunde durch Äste und Laub, rasch wuchernde Pioniervegetation/Verjüngung, das liegenden Totholz, usw. mit dem Ergebnis geringer brauchbarer Punktdichte stark beeinträchtigt (CLARK ET AL. (2004)).

Mit LIDAR wird durch Laufzeitmessung eines Laserstrahls die Entfernung zwischen dem Sensor an Bord eines Flugzeugs und der Geländeoberfläche gemessen (ALBERTZ (2009)). Manche LIDAR-Systeme vermögen mehrere zurückkehrende Echos eines ausgesandten Laserpulses, insbesondere die erste (*Firstpulse*) und die letzte (*Lastpulse*) Reflexionsanteile, sowie deren Intensität zu registrieren (BALTSAVIAS (1999)). Die Berechnung des Bodenmodells erfolgt anschließend aus den letzten Puls- und die des Oberflächenmodells aus den ersten-Puls-Daten (HEURICH (2006, S.67)). Im Falle des Einsatzes über Waldgebiet wird eine erste Reflektion aus den Baumkronen ('first pulse') empfangen. In vielen Fällen wird aber ein Teil des Laserpulses, welcher typischerweise einen Durchmesser von wenigen Dezimetern hat, die Baumkrone durchdringen und vom Waldboden reflektiert ('last pulse'), wenn dieser hinreichend zugänglich ist (MAAS & PFEIFER (2005)). Die Durchdringungsraten in Wäldern wird in der Regel von dem Durchmesser des Laserstrahls am Boden (*footprint*) und der Punktdichte pro Quadratmeter bestimmt. In Europa werden Durchdringungsraten bis zum Boden von 24 – 29% für Nadelwälder und 22 – 25% für Laubwälder während der Belaubung im Sommer angegeben (HYYPPÄ ET AL. (2000)). An anderen Orten sind jene sogar kleiner, wie

in Nadelwäldern in den USA mit 13,6% (EVANS & HUDAK (2007)). Die Punktdichte wird wiederum von dem Scanwinkel der Lasersystems definiert (HEURICH (2006, S.36)). Moderne Systeme sind in der Lage, Punktdichten von mindestens 1 Punkt/ m^2 zu erzeugen, aber für Sonderanwendungen sind auch Punktdichten über 10 Punkte/ m^2 möglich (MAAS & PFEIFER (2005)).

Wegen der vielfältigen Durchdringungsvarianten unter natürlichen Gegebenheiten ist die Aufgabenstellung der DGM-Gewinnung aus LIDAR derzeit Gegenstand intensiver Forschungstätigkeit u.a. für Waldbereiche. In der Tabelle 3.1 werden die sich ergebenden Fehler bei der Anwendung verschiedener LIDAR-Missionen zur DGM-Erstellung in mehreren Ökosystemstypen zusammengefasst. Dabei ist die Anzahl an Untersuchungen in tropischen Landschaften nur gering. So ist zum Beispiel die Arbeit von CLARK ET AL. (2004) die erste, die die Anwendung von LIDAR mit hoher Auflösung in tropischen Wäldern dokumentiert. Im Allgemeinen steigen die Fehler (RMSE) bei der DGM-Bestimmung mit der Geländeneigung und dem Kronenschlussgrad.

Untersuchung	Sensor-Merkmale	Topographie	Waldtyp	RMSE (m)
Hyypä et al. (2000)	Firstpulse, klein Footprint, 8 – 10 Punkte / m^2	Flach	Finnischer Nadelwald	0,15
		Neigung > 40%		0,40
Hodgson et al. (2003)	Footprint von 79 cm, 1 Puls/11,58 m	Neigung 0-14°	Sommerlaubwald	1,22
			Nadelwald	0,46
			Buschvegetation	1,53
Reutebuch et al. (2003)	Lastpulse, Footprint von 40 cm, 4,22 Pulse/ m^2	Neigung zwischen 0 bis 83%. Mittelwert 19%	Kanadischer Nadelwald mit über 70 Jahre alten Bäumen unterschiedlicher Dichte	0,32
Hopkinson et al. (2004)	First- und Lastpulse, klein Footprint, 2-5 Pulse/ m^2	Geringe Neigung	Borealer Nadelwald mit <i>Picea</i> , <i>Pinus</i> und <i>Populus</i>	0,16
Clark et al. (2004)	Firstpulse, Footprint von 30 cm, 9 Pulse/ m^2	unterschiedlich	Vegetationsmosaike, Wald und Wiesen	2,39
		Neigung < 10°	Immerfeuchter geschlossener tropischer Regenwald	1,95
		Neigung < 10°	Selektiv abgeholzter tropischer Regenwald	1,62
		Neigung < 10°	Schattenbaumkulturen	1,24
		Neigung > 20°	Tropischer Regenwald in Klimaxstadium	3,09
Evans & Hudak (2007)	Footprint von 30 cm	Bergig	USA-Nadelwald	0,31

Tabelle 3.1: Untersuchungen zur DGM-Gewinnung aus LIDAR-Datensätzen mit hoher Auflösung in bewaldeten Regionen.

Zur Erstellung eines digitalen Geländemodells (DGM) aus einem DOM werden Verfahren zur Filterung von Vegetations- und Gebäudeobjekten verwendet. SITHOLE & VOSSSELMAN (2004) sowie KOBLER ET AL. (2007) stellen eine Zusammenfassung der Filteralgorithmen für Höhenpunktdaten wie folgt dar:

- Morphologische Filterung, die durch die Anwendung eines strukturellen Elementes die Messwerte je nach Abstand zu einer Bezugsfläche an Boden unterteilt.
- Progressive TIN-Verdichtung. Dabei wird zunächst ein grobes TIN auf Basis benachbarter Minima erstellt, das immer weiter verdichtet wird. Dazu werden dem TIN in jeder Iteration neue Punkte zugeführt, wenn sie innerhalb bestimmter Schwellenwerte für Entfernung und Winkel liegen (HEURICH (2006, S.68)). Der REIN -Algorithmus von KOBLER ET AL. (2007)) gehört zu dieser Kategorie.
- Interpolationsverfahren. Die Geländeoberfläche wird anhand von Kurven, aktiven Konturen (Engl. *Snakes*) oder statistischen Analysen wie Kriging modelliert. Die Arbeit von ELMQVIST (2002) ist ein Beispiel dafür.
- Verfahren, bei denen Messpunkte als Bodenpunkte akzeptiert werden, wenn der Höhenunterschied zu ihren Nachbarn nicht signifikant ist. Andere Parameter (Neigung, Objektgröße usw.) als die Höhe können als Kriterium zur Wertunterscheidung angewandt werden. Die Studie von JACOBSEN & LOHMANN (2003) mit dem Programm Ecognition und der Prozess "Ebb" in LPS-Software (siehe Abschnitt 3.4.3) zeigen solch eine Anwendung. Letzterer benutzt Kriterien wie Fläche, Höhe und Neigung, um nicht zum Boden gehörende 3D-Objekte zu eliminieren (BALTSAVIAS (1999)).

3.3.6 Digitale Kronenmodelle (DKM)

Die genaue Erfassung von Baum- und Bestandshöhen ist von zentraler Bedeutung für die Charakterisierung der Wälder in Waldinventuren. Bereits mit diesem Parameter lassen sich relativ gute Abschätzungen des Holzvorrates oder der Biomasse vornehmen (HEURICH (2006, S.65)). Durch Subtraktion des DGMs vom DOM kann ein Digitales Kronenmodell (DKM) (auch als normalisiertes DOM bekannt) abgeleitet werden, die den Baumhöhenwerten entspricht (PERSSON ET AL. (2002), TIEDE & HOFFMAN (2006), KOCH ET AL. (2006)). Dabei hängt die Qualität des abgeleiteten DKMs sehr stark von der erreichten Genauigkeit der DOMs und DGMs ab. Wenn nur die Bestandshöhe zu ermitteln ist, sind die Genauigkeitsanforderungen geringer, als wenn die Höhe von einzelnen Bäumen bestimmt werden soll (HEURICH (2006, S.65)).

ANDERSON ET AL. (2004) präsentieren einen Vergleich der Ergebnisse mit der Bestimmung der Baumhöhen aus verschiedenen Fernerkundungsmethoden, wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist. Diese zeigt, dass die LIDAR-Profile erfolgreicher sind als die manuellen stereoskopischen Messungen aus Luftbildern (RGB-Bilder mit Maßstab 1 : 3.000) sowie die Radardaten für die Aufzeichnung der Lichtungen im Wald und die Modellierung der Details im Kronendach. Bei den Luftbildern ist dieser glattere Verlauf der Kurve hauptsächlich auf den Effekt der Schattierungen im sichtbaren Bereich des Waldes zurückzuführen.

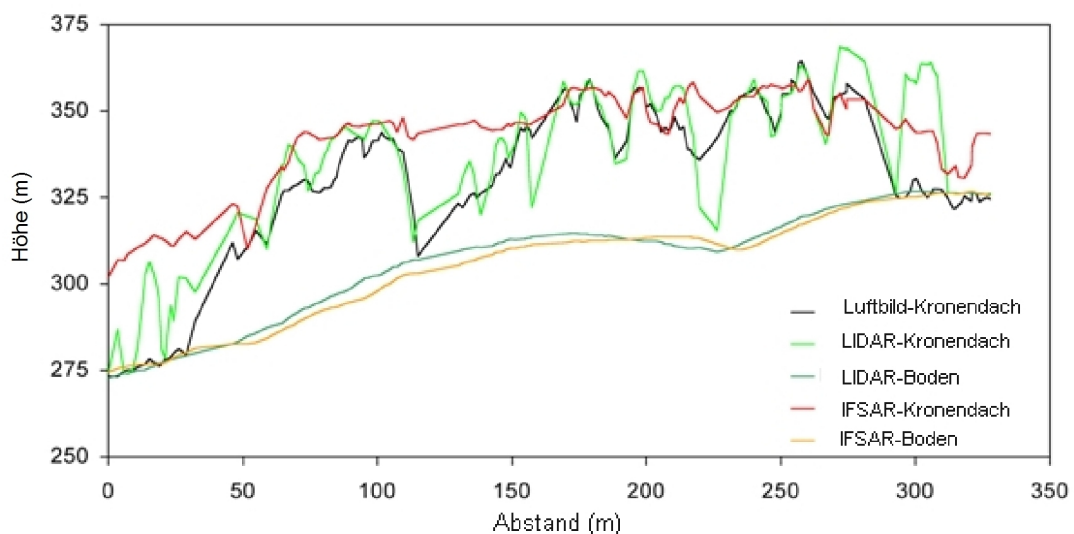


Abbildung 3.3: Profil eines Nadelwaldes und des darunter liegenden Geländes in Washington, USA, erzeugt durch LIDAR- und IFSAR-Sensoren und stereoskopische Luftbildmessungen (Quelle: ANDERSON ET AL. (2004)).

Unabhängig von der angewandten Fernerkundungsmethode wird in der Regel die Baumhöhe zu niedrig erfasst (ABRAHAM & ADOLT (2006), HEURICH (2006)). Tabelle 3.2 zeigt die Ergebnisse einiger Untersuchungen auf diesem Gebiet. Je höher der Baum ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für die Unterschätzung seiner Höhe (ABRAHAM & ADOLT (2006)). Auch die Walddichte und der Waldtyp haben großen Einfluss auf die Ergebnisse. Je dichter der Waldbestand, desto größer sind die Höhenabweichungen (Unterschätzungen) (HEURICH (2006, S.110)). Die Nadelwälder weisen größere Höhenfehler auf als die Laubbestände aufgrund ihres pyramiden- bis eiförmigen Habitus mit ausgeprägten Gipfeltriebkrone, die häufig abgeschnitten und damit nicht richtig erfasst werden.

Untersuchung (Ort), Autor	Ableitung der DGM	Ableitung der DOM	Höhenreferenz	Waldtyp	Mittelwert (m)	RMSE (m)
(Schweden), Persson et al. (2002)	TopEye-LIDAR	LIDAR	Messungen von im Gelände	Nadelbäume	-1,13	0,63
(Costa Rica), Clark et al. (2004)	FLI MAP-LIDAR	LIDAR	Messungen von im Gelände	Tropenregenwald	-2,11	4,15
				isolierte Bäume in Weiden	-1,58	2,41
(Deutschland), Heurich (2006)	TopoSys-LIDAR	TopoSys-LIDAR	Messungen von im Gelände	Nadelbäume	-0,79	1,48
				Laubbäume	-0,37	1,48
		DMC Kamera Luftbilder (GSD:1,5 m)	Lasere Digitales Kronenmodell	Nadelwald Altbestand	-1,78	4,01
				Laubwald Altbestand	-0,03	0,96
(Ungarn), Király et al. (2006)	LIDAR	LIDAR	Stereo Messungen von Baumhöhen	Mischwald	0,63	2,88
(Australian), Tickle et al. (2006)	LIDAR	LIDAR	Messungen von im Gelände	Mischwald mit Eucalyptus und <i>Callitris</i>	-	1,34

Tabelle 3.2: Abschätzungsgenauigkeit der Baumhöhen in verschiedenen Waldökosystemen durch die Anwendung von verschiedenen Fernerkundungsmethoden. Die Höhemessungen beziehen sich auf die Bestandebene. Alle anderen beziehen sich auf Einzelbäume.

3.3.7 Orthophoto und Mosaik-Herstellung

Ein Orthophoto ist ein differential entzerrtes Bild, das in allen Teilen den gleichen Maßstab besitzt (SCHWIDEFSKY & ACKERMANN (1976)). Der Vorgang, der die durch das Geländere relief verursachten Lagefehler eines Bildes korrigiert, wird als Differentialentzerrung bezeichnet (ALBERTZ (2009, S.153)). Mit Hilfe der bekannten Orientierung und der vorliegenden Geländemodelle werden die radiometrisch korrigierten Bilddaten projiziert (Mayer (2004)), wie in Abbildung 3.4 dargestellt wird. In diesem Sinne hängt die erreichbare geometrische Qualität eines Orthophotos sehr stark von der Genauigkeit des vorliegenden DGMs ab (KERSCHNER (2001), LINDER (2009)).

Das entzerrte Bild weist geometrisch die Eigenschaften einer Karte auf und bietet gegenüber dem Originalluftbild den Vorteil, dass darin Flächenmessungen vorgenommen werden können (KONECNY (2003)). Die Differentialentzerrung ist stets in spezifischen Software-Komponenten implementiert, die meist in Programmpaketen zur Photogrammetrie enthalten sind (ALBERTZ (2009, S.153)).

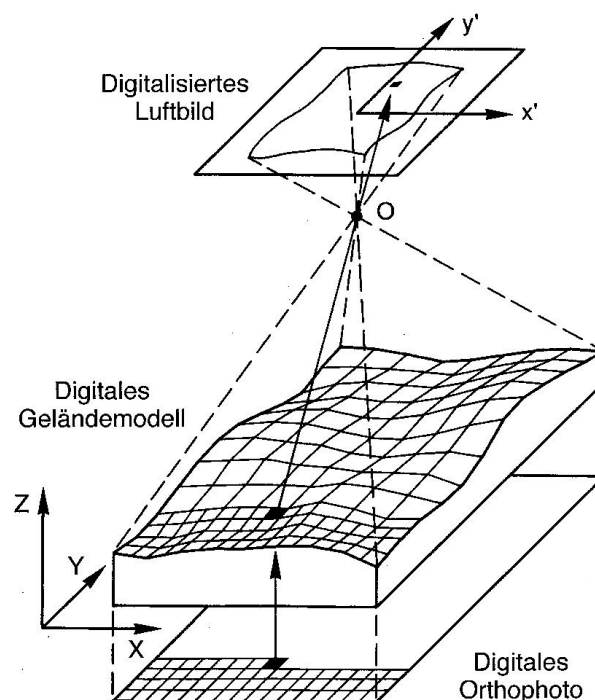


Abbildung 3.4: Herstellung eines Orthophotos anhand indirekter Entzerrungsmethode. Von einem Pixel des Orthophotos wird über das digitale Geländemodell in das Luftbild zurückgerechnet, um dort den zugehörigen Wert zu entnehmen. (Quelle: ALBERTZ (2009, S.153)).

Bei Verwendung eines DGMs zur Orthophotoherstellung werden hohe Objekte wie Baumkronen, Brücken, Dächer, Pfosten, usw. versetzt abgebildet (Klappung). Es werden also nur jene Punkte und Linien im Orthophoto lagerichtig sein, die im Oberflächen-

modell (DOM) erfasst sind (KRAUS (2004)). Dieses Phänomen zeigt sich zunehmend deutlicher in Abhängigkeit der Entfernung von der Bildmitte, Objektivwinkelöffnung (Weitwinkelobjektive) und der Größe der Maßstäbe. Die Orthophotos, bei denen außer dem DOM auch topographische Details (wie z.B. Kanten, Brücken) bei der Entzerrung einbezogen werden, werden als "True Orthophotos" bezeichnet (KONECNY (2003)).

Orthophotos können als Hilfsmittel zur Abgrenzung und Beschreibung von Waldbeständen dienen. Sie sind auch die Grundlage für Flächenermittlungen und die Kartenfortführung durch Ergänzung und Korrektur von Detailveränderungen (HEURICH (2006, S.18)).

Große Oberflächen können je nach gefordertem/r Maßstab und Auflösung normalerweise durch ein einzelnes Luftbild nicht abgedeckt werden. In diesem Fall wird das automatische Mosaikieren der benachbarten und überlappenden Orthophotos zu Orthophotomosaiken verwendet. Eine radiometrische Farbanpassung der Bilder sorgt für eine homogene Darstellung des ganzen Orthophotomosaiks. In dem Prozess sollten auch Einzelbildfarbabweichungen durch eine an Schattenkanten orientierte Korrektur des Nahtverlaufes beseitigt werden (KERSCHNER (2001)).

3.4 Methodisches Vorgehen

Die hier verwendeten Methoden mittels photogrammetrischer Ansätze wurden nach den folgenden Gesichtspunkten ausgerichtet:

- Anwendung von digitalen metrischen Luftbildern mit hohen radiometrischen und geometrischen Auflösungen (GDS) von 10 bis 30 cm unter Nutzung von RGB-Aufnahmen (siehe Abschnitt 2.2.2).
- Ausgewählt wurden Vorgehensweisen und Bereiche, die erfolgversprechende Ergebnisse in Gebieten schwierigen Feldzugangs und die Verwendung offen zugänglicher Datenquellen erlauben sowie möglichst geringe Finanzressourcen erfordern. Sie haben zur Erschließung neotropischer Regionen hohe Priorität.

In dieser Arbeit bestehen die photogrammetrischen Anwendungen aus den nachstehenden Teilbereichen:

- Blockaufbereitung und Blockausgleichung.
- Berechnung und Messung von Oberflächenmodellen und Geländemodellen.
- Berechnung der digitalen Kronenmodelle und individuellen Baumhöhen.

- Erstellung von Orthophotos und Orthophotomosaiken.

3.4.1 Blockaufbereitung und Blockausgleichung

Es wurden digitale Luftbilder von der mittelformatigen Rollei AIC-P20-Kamera für Baumbestimmungszwecke und der Rollei AIC-P45 für die Untersuchung der Passpunkt-Genauigkeit verwendet. Nur der RGB-Kanal wurde erfasst. Der Weg bis zur Aerotriangulation lässt sich durch die folgenden Schritte beschreiben:

Suche und Markierung der Passpunkte Die Passpunkte wurden je nach Untersuchungsgebiet aus vier Typen von Datenquellen entnommen:

1. Datensätze mit grober Auflösung für Santa Fé de Antioquia. Diese stammen aus Landsat-ETM Satellitendatensätzen für X, Y -Koordinaten und die Höhenangaben aus SRTM-Daten (Radar Topography Mission). Die SRTM-DGMs haben eine Lageauflösung von 3 Bogenminuten (ca. 90 m) mit einer erwarteten Höhengenaugigkeit von 16 m. Bei den Landsat-Daten wurde die Kombination der Kanäle RGB-7, 4, 2 ausgewählt. Zunächst betrug die Auflösung des Landsat-Bildpixels ca. 30 m aus den Farbkanälen. Durch die Anwendung des panchromatischen Kanals und "Resolution Merge"-Methoden im Programm Erdas konnte die Auflösung auf 15 m verbessert werden. Ergänzend wurden auch einige DGPS-Punkte im Gelände gemessen.
2. Navigations-GPS für La Concordia. Die erzielte Lagegenauigkeit betrug ca. 5 m. Für die Höhe war der Fehler noch etwas höher.
3. Katasterkarte mit Maßstab 1 : 2000 für Medellín. Die zu erwartenden Fehler lagen zwischen 1 – 2 m für Lage- und Höhenkoordinaten.
4. Differenzielles GPS für Yumbo. Es wurden sowohl DGPS auf dem Boden als auch kinematisches-GPS für die Flugposition benutzt. Die zu erwartenden Fehler lagen bei 1 und 0,2 m.

Die manuelle Markierung der Passpunkte in den Bildern erfolgte im Imatje-Programm der HHUD (BRAITMEIER (2003)).

Messung der Verknüpfungspunkte Die Verknüpfungspunkte wurden durch manuelle Messungen und automatische Verdichtungsverfahren erstellt. Da in den meisten Fällen keine Projektionszentren und Rotationswinkel der Bilder zur Verfügung standen, war die volle Automatisierung dieses Prozesses nicht möglich. Zwischen 50 bis 100 gut

verteilte Punkte je Modell wurden automatisch in LPS (Leica Photogrammetric System) mittels der Vormarkierung von genügend Ankerpunkten (2 – 3 manuell gemessene Punkte pro Model) generiert. Der Vorgang wurde zunächst streifenweise durchgeführt. Jeder Streifen wurde dann aerotrianguliert, um einen ganzen Bildblock auf Basis der äußeren Orientierungen aufbauen zu können. Abschließend wurden automatische Verknüpfungspunkte für den gesamten Block generiert. In dicht bewaldeten und kontrastarmen Bildteilen wurden zusätzliche manuelle Punkte nachgemessen.

Blockausgleichung in BINGO 5.5 oder Orima 9.2 Obwohl BINGO in den meisten Fällen verwendet wurde, bot Orima für eine Überlappung zwischen Streifen von weniger als 20% (z.B. Untersuchungsgebiet La Concordia) die schnellere Möglichkeit, Punkte stereoskopisch nachzumessen (heute im BINGO auch möglich). Das Ziel dieser Aerotriangulation war, eine stabile Lösung zu finden, in der alle großen Fehler (Blunders) eliminiert wurden und eine hinreichende absolute (von den erwarteten Passpunktquellen abhängige Werte) und relative Genauigkeit (unter 1 Pixel) erreicht werden konnte.

Selbstkalibrierung Die Verfeinerung der Blockausgleichung wurde durch eine Selbstkalibrierung durchgeführt. Diese war für die Rollei-Kameras notwendig, um die radialsymmetrischen Verzerrungen möglichst zu minimieren. Die Selbstkalibrierung der AIC-P20 und AIC-P45 Kameras wurde durch die Anwendung zusätzlicher Parameter in der Bündelblockausgleichung vorgenommen. Dieses Verfahren fand bei den Blöcken von Santa Fé de Antioquia und Yumbo Anwendung. Die ausprobierten Parameter in Bingo entsprechen den Parametern 7, 8, 9, 10, 25, 26, 35 und 36. Die Parameter 1 bis 24 sind in Anlehnung an Bauer, Müller und Jacobsen entwickelt worden. Parameter 25 und 26 sind mehr für rechteckige Bildformate geeignet (zum Beispiel Rollei AIC-P45), während Parameter 7 und 8 eher für quadratische Bildformate (z.B. Rollei AIC-P20) angewandt werden sollten. Es empfiehlt sich, Parameter 9 und 10 nur für quadratische Bildformate einzusetzen (KRUCK (2009)). Sollte ein Parameter eine hohe Korrelation zu den anderen aufweisen, kann dieser eliminiert werden. Die Ergebnisse wurden graphisch analysiert (siehe Abbildung 3.7).

Auswertung der Aerotriangulation Die Ergebnisse der Blockausgleichungen wurden anhand verschiedener Merkmale überprüft. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 (auch als Sigma0-Wert bekannt) gibt Hinweise für die Genauigkeitsanalyse der relativen Orientierung, während die RMSE (*Root Mean Square Error*) der Passpunktresiduen für die absolute Orientierung ein Indiz ist. Die Varianzkomponentenschätzung der Beobachtungsgruppe trägt auch zur Bewertung bei. Bei genügend großer Überbestimmung soll innerhalb einer jeden Beobachtungsgruppe die Testgröße, nämlich der

Quotient aus der a posteriori Standardabweichung und der a priori Standardabweichung, gegen 1,0 gehen (KRUCK (2009)). Die Residuen der Bildmessungen sowie die Verknüpfung der Streifen wurden graphisch anhand von Ellipsen analysiert. Ebenso wurde die Y-Parallaxe stereoskopisch kontrolliert. Wenn diese vorhanden war, musste die gesamte Aerotriangulation nochmals durch die Hinzufügung von neuen Verknüpfungspunkten gerechnet werden.

3.4.2 Bewertung der Genauigkeit der Passpunkte aus Satellitendatensätzen

Die Lage- und Höhengenaugigkeit der aus Landsat und SRTM extrahierter Passpunkte wurde auf hinreichende Anwendbarkeit für Waldinventuren und niedrige Kosten abgeschätzt. Da der Maßstabsunterschied zwischen den Luftbildern (GSD: 10 – 30 cm) und den Satellitendatensätzen (GSD: 15 – 30 m) sehr groß ist, waren mehr Passpunkte für jede Punktposition (mindestens 3 Punkte) notwendig, um eine minimale Redundanz sicherzustellen. In ländlichen Bereichen haben große erkennbare natürliche Objekte wie einzelne Baumkronen, Waldlichtungen, Flusskreuzungen und Felsen am häufigsten als Bezugspunkte gedient. Das gleiche galt für Straßenecken, Brücken, Grundstücksgrenzen oder Dächer in besiedelten Gebieten.

Das für die Genauigkeitsverifizierung ausgewählte Untersuchungsgebiet ist Yumbo. Bei der Befliegung kamen die Rollei AIC-P45 Kamera und ein kinematisches GPS zum Einsatz. Zur Blockstabilisierung wurden einige DGPS-Passpunkte vor Ort vermessen. Zu Vergleichszwecken wurden zwei Aerotriangulationen berechnet. Die erste (Y1) basierte auf den Passpunkten aus Landsat, wobei die DGPS als unabhängige Vergleichspunkte (Check Points) dienten. Anschließend wurde eine zweite Aerotriangulation (Y2) mit DGPS-Punkten als Passpunkte, kinematischen GPS-Messungen als zusätzliche Beobachtungen und Landsat-Punkte als Vergleichspunkte durchgeführt.

3.4.3 Gewinnung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und die Bewertung ihrer Genauigkeit für die Baumkronenmodellierung

In dieser Arbeit wurden drei Softwareprogramme zur Gewinnung von DOMs benutzt: LPS 9.3 von Erdas Inc., Match-T DSM 5.2 von Inpho GmbH und NGATE 5.4 (Socet Set) von BAE Systems. Das Ziel dabei war, einen Vergleich dieser Programme bezüglich der zu erreichenden Genauigkeit bei der Baummodellierung durchzuführen.

LPS Das Programm bietet die ATE (*Automatisch Terrain Extraction*) und die adaptive ATE Methode zur Oberflächenmodellierung an (XU ET AL. (2008)). Die ATE arbeitet im Prinzip mit Bildkorrelationsverfahren der Grauwerte (Area Based Matching, ABM) über Bildpyramiden. Das ABM benutzt einen Förstner-Operator mit geometrischen und topologischen Einschränkungen. Zur Verfeinerung wird die Methode der kleinsten Quadrate (LSM) angewandt, um endgültige Höhenpunkte zu gewinnen (ERDAS (2010)). Von Vorteil ist die hohe Geschwindigkeit des gesamten Zuordnungsverfahrens. Dafür arbeitet die Korrelation in kontrastschwachen Regionen, wie z.B. Gletschern oder Wüsten, nicht so genau und es kann leicht zu Fehlkorrelationen kommen (RAGUSE (2009)). Bei diesem Programm lässt sich für die DOM-Herstellung eine vorgegebene Strategie mit entsprechenden Parametern definieren, mit welcher der Ablauf der Berechnung beeinflusst wird. Jede Strategie (High Mountains, Rolling Hills, Flat Areas, Forest, usw.) beinhaltet ihre eigenen Korrelationsparameter (z.B. die Größe des Suchfensters und den Korrelationskoeffizienten) sowie einen bestimmten Glättungsgrad nach Topographie (Topographic Type) und vorherrschenden Bildobjekten (Object Type). Trotzdem ist die genaue Bedeutung und der Effekt der Parameter auf das generierte DOM für den Anwender oft nicht eindeutig, was systematisches Ausprobieren erfordert.

Match-T DSM Zur Höhenpunkt-Generierung benutzt Match-T eine auf Merkmalen basierte Technik (Feature based Matching, FBM) und die LSM über Bildpyramiden, die mit einer Genauigkeit von weniger als einen halben Pixel korrelieren kann. Obwohl das Programm sehr dichte Punktwolken erzeugen kann, ist die Einführung des sequentiellen Matchens von mehreren Bildern sein wichtigster Durchbruch. Bei diesem Verfahren werden aus den besten stereoskopischen Bildpaaren unter Berücksichtigung des Geländetyps und der relativen Sensorpositionierung Punkte extrahiert, aus denen dann die schlechten Punkte herausgefiltert und verworfen werden. Reliefbezogene Parameter wie Terrain Type sowie der Glättungsgrad (Smoothing) und der Parallaxen-Schwellenwert (Parallax Threshold) können variiert werden. In diesem Projekt wurde die Verdichtung (Feature Density) immer auf stark (dense) gesetzt. Die Filterung (Filtering) wurde auf Standard beibehalten.

NGATE (Next Generation Automatic Terrain Extraction) Dieses Modul von Socet Set bietet ein Matchen für jeden Punkt gestützt auf ein Hybrid aus FBM- und ABM Methoden an. Ergebnisse jeder einzelnen Methode werden von der anderen zur Sucheinschränkung und Verfeinerung genutzt. Wie bei Match-T wird das Matchen von mehreren Bildern und auch die Filterung der Fehlerpunkte verwendet. Zwei Strategien stehen bezüglich der ausgewählten Luftbilder zur Verfügung: Natural Terrain für kleine bis mittlere Maßstäbe und Urban Areas für große Maßstäbe (DEVENEZIA ET AL. (2007)).

Die sich ergebenden Oberflächenmodelle wurden als 2.5D Rasterdarstellung mit Hilfe von TIN-Interpolationsverfahren erzeugt. Für die gesamte Abdeckung der auszuwertenden Befliegungsgebiete (Santa Fé de Antioquia, Medellín und La Concordia) wurde nur LPS 9.3 zur DOM-Gewinnung eingesetzt. Da diese Version von LPS nur in der Lage ist, einen Höhenpunkt in jedem dritten Pixel zu finden, variieren die Auflösungen der resultierenden DOMs zwischen 30 bis 60 cm (dreimal größer als die verfügbaren GSD der Befliegung). Zu Analysezwecken in Waldbereichen wurden nur die drei Parzellen von Santa Fé de Antioquia (A1, A2 und A3) verwendet. Obwohl DOMs aus den oben genannten Programmen für alle diese erstellt wurden, erfolgte der Vergleich der durch die Softwarepakete erzielten DOM-Genauigkeit nur für die Parzelle A2 von Santa Fé de Antioquia (siehe Abbildung 2.10) auf Basis eines GSD von 30 cm. Die anderen DOMs fanden zur DKM (digitales Kronenmodell)-Generierung Verwendung.

Die beste Strategie für jedes Programm wurde durch visuelle Analyse ausgewählt. Für eine qualitative Einschätzung der erfassten DOMs aus den verschiedenen Programmen wurden zunächst herkömmlich von einem Operateur gemessene Höhenpunkte mittels des Modules Stereo Analyst für ArcGIS 9.2 eingesetzt. Insgesamt wurden ca. 36.000 Punkte gemessen (siehe Abbildung 3.5). Der Hauptzweck dieses Vorgehens war, die auf dem Kronendach liegenden Punkte sicher erfassen zu können, um eine eindeutige Bezugsbasis für die automatische Korrelation durch die drei Programme zu gewinnen. Nur die Bäume der oberen Baumschicht fanden Verwendung, da die unteren Schichten meist abgeschattet oder nicht sichtbar waren.

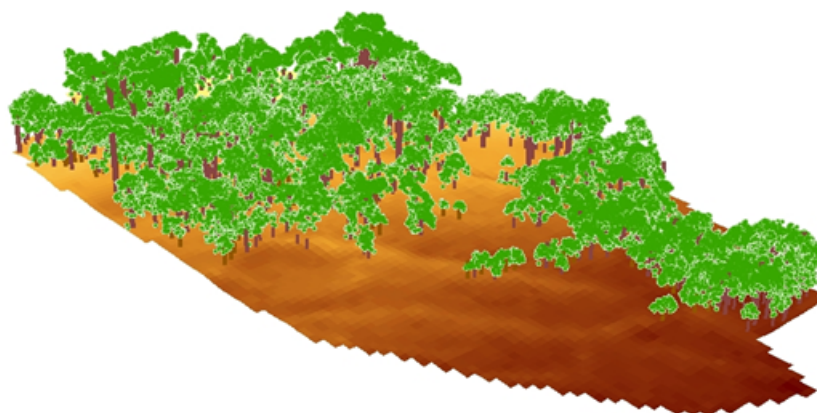


Abbildung 3.5: Stereoskopische gemessene Punkte auf dem Kronendach (in Grün) in der Parzelle A2 von Santa Fé de Antioquia.

Die DOM-Genauigkeit wird durch den mittleren quadratischen Fehler (RMSE) nach

ZHANG (2005) abgeschätzt. Der RMSE wird wie folgt berechnet:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{DOM_i} - Z_{REF_i})^2}{n}} \quad (3.1)$$

Z_{DOM_i}	Der aus automatischen Verfahren abgeleitete DOM-Höhenwert für den i -Messpunkt
Z_{REF_i}	Der aus stereoskopisch gemessenen DOM-Höhenwert für den i -Messpunkt
n	Anzahl der zu bewertenden Punkte

3.4.4 Gewinnung von digitalen Geländemodellen (DGM) und Bewertung ihrer Genauigkeit

Die Grundidee bei der DGM-Gewinnung ist, dass im DOM noch vorhandene Vegetation und Gebäude durch Filterungsmethoden eliminiert werden. Die Ableitung der DOM_s und DGM_s ist in der Regel mit der gleichen photogrammetrischen Software durch die Änderung einiger Parameter möglich. Bei dieser Untersuchung wurden für die DGM-Gewinnung die gleichen Softwarepakete wie in Abschnitt 3.4.3 angewandt, nämlich LPS, Match-T und NGATE. Überdies wurde beim Inpho-Softwarepaket eine zu Match-T komplementäre Option hinzugefügt, das DTM-Toolkit, das zusätzliche Parameter implementiert.

Im Folgenden werden die Haupteigenschaften der Softwarepakete dargestellt.

LPS Die Eliminierung der nicht zum DGM gehörenden Objekte wird als Prozess Ebb bezeichnet, der einer Überflutung ähnelt. Wenn eine Gegend hoch liegt und klein genug ist, wird diese als Objekt (Gebäude, Baum oder Gipfel) eingestuft und nicht durch das Hochwasser überdeckt (XU ET AL. (2008)). Objekte können durch Filterungsstrategien wie Neigung (*Slope*) und Fläche (*Area*) eliminiert werden. Diese werden wiederum von Parametern wie z.B. Objekthöhe, Neigungsschwellenwerte und Objektweite kontrolliert.

Match-T und DTM-Toolkit Inpho ermöglicht auch Objekte direkt in Match-T zu beseitigen. Es wurde jedoch eine robustere Methode für Punktfiltrung bevorzugt, die das Modul DTM-Toolkit anbietet. Zunächst wird eine 3D-Punktwolke anstatt eines Rasters in Match-T für das DOM erzeugt. Die generierten Punkte werden durch das DTM-Toolkit zu Erdoberflächen-Punkten zugeordnet. Dieses Modul benutzt Algorithmen von SCOP++, bei denen Punktmessungen, die höher als einen vorgegebenen Wert liegen, als Objekte gekennzeichnet und daher weggefiltert. Mehr zu diesen Algorithmen kann in KRAUS & OTEPKA (2005) nachgelesen werden. Die verbliebenen Geländepunkte

werden abschließend durch TIN-Interpolation zu Raster-Darstellungen umgewandelt.

NGATE Dieses Programm stellt die Filterung Bare Earth mittels eines Nutzer-Interfaces genau wie bei der DOM-Generierung zur Verfügung, aber hier können die zulässige minimale Höhe sowie die maximale Breite eines zu eliminierenden Objektes beschränkt werden (DEVENECIA ET AL. (2007)).

Zur Auswertung der Genauigkeit der DGMs wurden als Testgebiete die drei Parzellen von Santa Fé de Antioquia (A1, A2 und A3) ausgewählt. Die Qualität der erzeugten DGMs wurde getrennt nach zwei Vegetationstypen, nämlich Weide mit verstreuten Bäumen und dicht bewaldeten Flächen, untersucht (siehe Abbildung 3.6). Als Vergleich wurde ein von einem Operateur herkömmlich gemessenes DGM eingesetzt. Da die Gebiete meist von Bäumen ohne Unterholz bedeckt waren, konnten stereoskopisch gemessene Punkte in offenen Bereichen und Waldlichtungen vermessen werden. Zur Begrenzung des Effektes von Schlagschatten wurde bei den stereoskopischen Bildmessungen ein Kontrastverbesserungsverfahren in Stereo Analyst genutzt. Die so gemessenen Punkte wurden mit der Funktion *Topo To Raster* von ArcView 9.3 der Firma ESRI interpoliert und danach durch ein 5x5 Pixel Median-Fenster geglättet. Der *Topo To Raster* - Algorithmus basiert auf dem Programm ANUDEM von HUTCHINSON (1989).

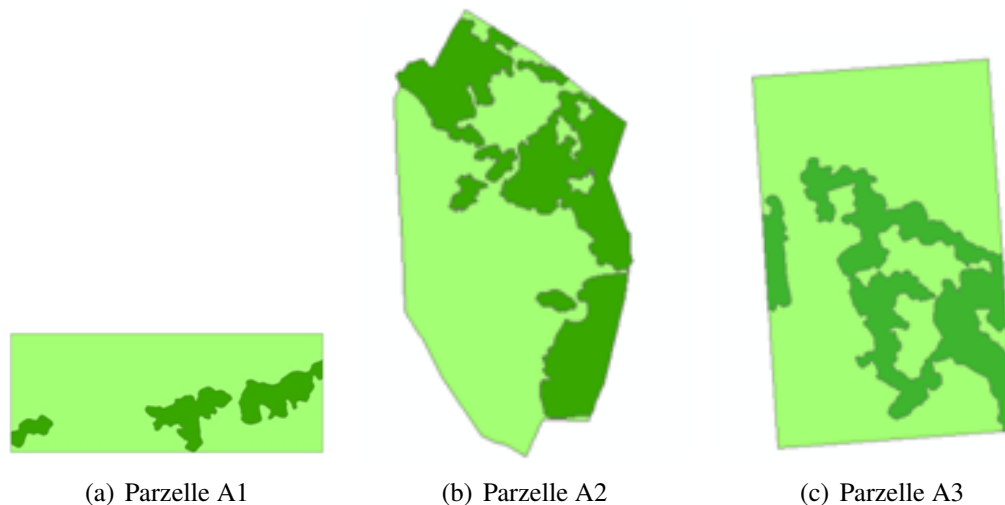


Abbildung 3.6: Aufteilung der Parzellen von Santa Fé de Antioquia in Flächen mit Weide und verstreuten Bäumen (hellgrün) und dicht bewaldeten Bereichen (dunkelgrün) zur Bewertung der DGM-Genauigkeiten.

Die qualitative Auswertung selbst wurde durch den RMSE (Gleichung 3.2) in ArcView 9.3 zwischen beiden DGM_s durchgeführt.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{DGM_i} - Z_{REF_i})^2}{n}} \quad (3.2)$$

Z_{DGM_i}	Der aus automatischen Verfahren abgeleitete DGM-Höhenwert für den i -Pixel
Z_{REF_i}	Der aus stereoskopisch gemessenen DGM-Höhenwert für den i -Pixel
n	Anzahl der zu bewertenden Pixel

3.4.5 Ableitung der Baumhöhen

Die Ermittlung der Baumhöhen wird durch Subtraktion der DGM von dem DOM durchgeführt. Damit ergibt sich das so genannte digitale Kronenmodell (DKM). Die Vorgehensweise zur Baumhöhenbestimmung wurde wie folgt implementiert:

Die Kronen der einzelnen Bäume wurden als Polygone stereoskopisch digitalisiert, damit innerhalb der Polygone der höchste Höhenwert ausgewählt werden konnte. Am Ende der Prozedur ist die Höhe des Baums durch einen einzigen Wert repräsentiert.

Als Referenz wurden Punktmessungen aus Stereobildpaaren in Stereo Analyst genutzt. Die Baumhöhe wurde als Höhenunterschied zwischen höchstem Baumpunkt auf der Krone (Baumspitze) und benachbartem Punkt auf dem Boden berechnet.

Die Bewertung des Unterschieds zwischen aus dem DKM abgeleiteter Baumhöhe und der dazugehörigen Referenzhöhe wurde mit Hilfe der arithmetischen Mittelwerte der Höhendifferenzen (\overline{dH}), Gleichung 3.3) und der RMS-Fehler der Höhendifferenzen (RMSE, Gleichung 3.4) für die Bäume innerhalb der Parzellen durchgeführt, für die eine benachbarte Bodenhöhenmessung möglich war.

$$\overline{dH} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{DKM_i} - H_{REF_i}}{n} \quad (3.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{DKM_i} - H_{REF_i})^2}{n}} \quad (3.4)$$

Z_{DKM_i}	Die aus automatischen Verfahren abgeleitete maximal i -Baumhöhe
Z_{REF_i}	Die stereoskopisch gemessene maximal i -Baumhöhe
n	Anzahl der Referenzbäume

3.4.6 Erstellung von Orthophotomosaiken

Die Orthophotomosaiken sind die Grundlage für die Baumbestimmungsalgorithmen basierend auf radiometrischen Bildmerkmalen. Die Erstellung digitaler Orthophotomosaiken stellt heute eine Standardaufgabe dar, die in jedem Softwarepaket für die digitale Photogrammetrie enthalten ist. Für das Verständnis der Arbeitsschritte dieser Untersuchung notwendige Einzelheiten dieses Prozesses werden in Folgendem beschrieben:

- Die Grundlage zur Bildentzerrung waren die DOM_s . Für die Darstellung der gesamten Befliegungsgebiete wurden geglättete DOM_s mit 5 m Auflösung hergestellt, damit die typischen Bildversätze wegen Entzerrungsfehlern sowie Fehlzuordnungen und der Bearbeitungsaufwand reduziert werden. Die Auflösung der sich dadurch ergebenden Photomosaik variierte zwischen 20 bis 30 cm. Zusätzlich wurden für die drei Parzellen von Sante Fé de Antioquia anhand der berechneten und manuell überarbeiteten Oberflächenmodelle von 30 cm Auflösung entsprechende Orthophotoausschnitte mit einer Auflösung von ca. 10 – 12 cm erstellt.
- Das Programmmodul MosaicPro 9.3 von Erdas Inc. wurde zur Mosaik-Erstellung verwendet. Die Orthomosaik-Erstellung selbst erfolgt fast ganz automatisch. Nur minimaler Eingriff war bei den Schnittlinie-Korrekturen nötig. Zur Farbkorrektur wurde der Image Dodging Vorgang genutzt. Die radiometrische Interpolation für die Neuberechnung der Pixelwerte erfolgte mittels kubischem Konvolutionsverfahren.

3.5 Ergebnisse

3.5.1 Selbstkalibrierung und Blockausgleichung

Die Effekte der Kalibrierung für die Kameras Rollei AIC-P20 und AIC-P45 sind in den untenliegenden Abbildungen 3.7 veranschaulicht. Bei der Überlagerung der ohne Selbstkalibrierung aerotriangulierten Punktresiduen sind systematische Fehler deutlich zu sehen (obere Bilder), stärker ausgeprägt bei der AIC-P45 am Bildrand, deren Residuen bis $27 \mu\text{m}$ erreichen. Auch zu sehen in der Querschnitt-Darstellung vom Bildzentrum bis Bildrahmen ist, dass die Abweichungen sowohl im ersten Drittel des Bildes als auch am Bildrand beträchtlich sind. Bei beiden Kameras können diese Fehler durch die Anwendung zusätzlicher Parameter in Programm BINGO stark reduziert werden. Kleine Residuen bestehen dennoch an den Bildecken, die sich aber bis auf max. $3,0 \mu\text{m}$ für die AIC-P20 (0,33 Pixel) und max. $6,2 \mu\text{m}$ (0,9 Pixel) für die AIC-P45 belaufen.

Die endgültigen Aerotriangulationen der Bildblöcke wurden mit der Einbeziehung der Objektivverzerrungskorrekturen durchgeführt und werden dargestellt mit den folgenden Ergebnissen gegliedert nach Untersuchungsgebieten:

Santa Fé de Antioquia, Kolumbien Der gesamte Block enthält 275 Bilder mit einer Längsüberdeckung von 70 – 80% und einer Querüberdeckung von 30%. Zwei Flughöhen, die einem GSD von ca. 10 und 20 cm entsprechen, wurden zusammen aerotriangu-

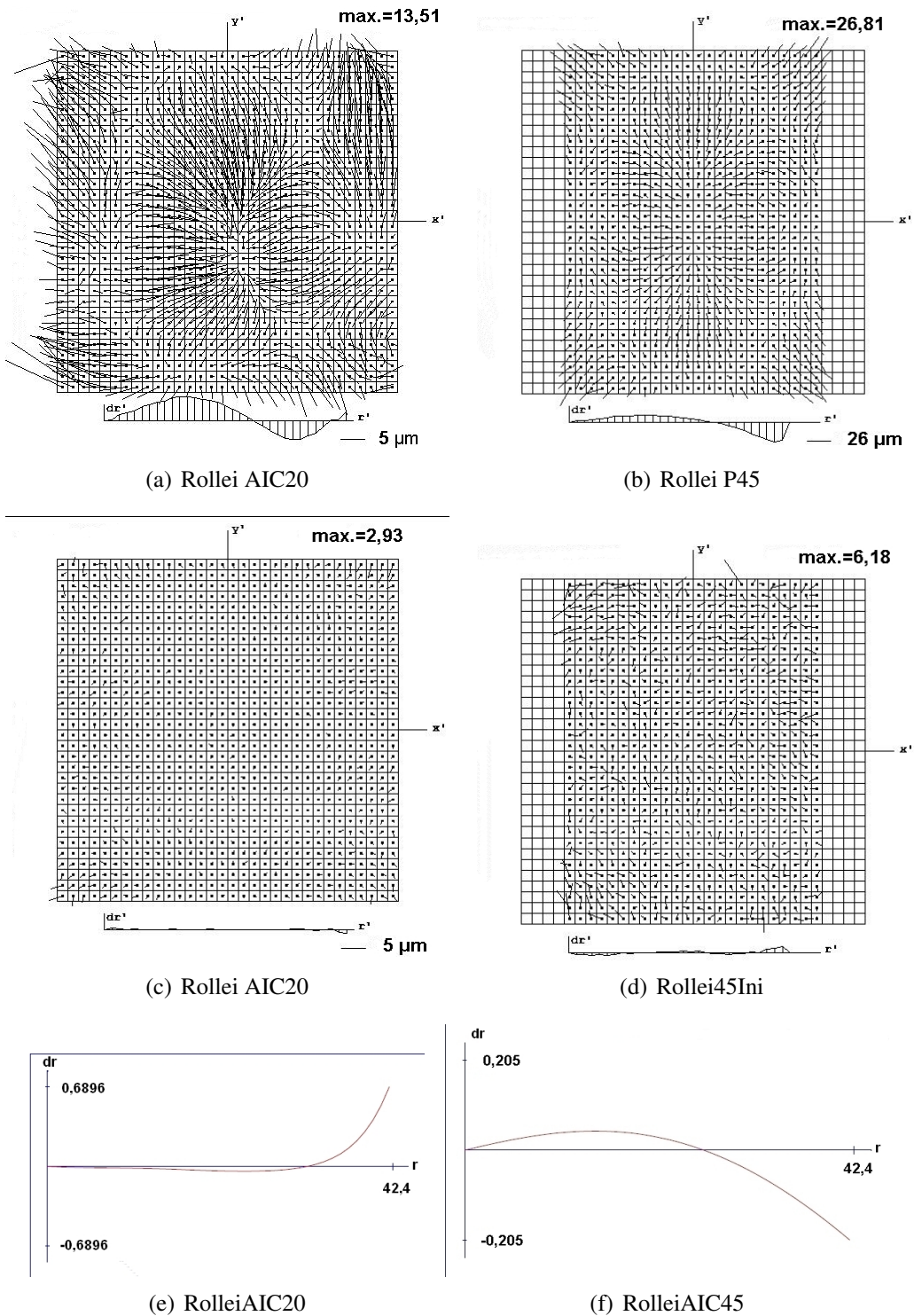


Abbildung 3.7: Auswirkung der Selbstkalibrierung bei der Rollei AIC-P20 (links) und AIC-P45 (rechts) auf die Bildkoordinatenresiduen. Oben sind die systematischen Messfehler der Rollei-AIC20 mit 10 – 20 cm und AIC45-Bildblöcke mit 28,5 cm GSD (*Ground Sampling Distance*) dargestellt. In der Mitte kommen die verbliebenen Messfehler nach der Anwendung zusätzlicher Parameter in BINGO zum Ausdruck. Die radialsymmetrische Verzeichnung ist unten zu sehen.

liert. In dem Block wurden die Objektpunkte durchschnittlich in 3,8 Bildern bestimmt und jedes Bild enthielt im Mittel 359 Verknüpfungspunkte. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 (Sigma0) betrug $2,80 \mu\text{m}$ (siehe Tabelle 3.3). Die RMS-Werte der Residuen aller Passpunkte lagen um 10 m für X - und Y Koordinaten und 12 m für Z . Eine Darstellung des aerotriangulierten Blockes kann in Anhängen B.1 und B.2 verglichen werden.

Passpunkte (m)			$\sigma_0 (\mu\text{m})$
SX	SY	SZ	
10,2	9,7	12	2,8

Tabelle 3.3: Erzielte Genauigkeiten bei der Blockausgleichung von Bildern der Rollei-Kamera AIC-P20 mit BINGO in Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.

Medellín, Kolumbien Der gesamte Block hat 53 Bilder mit einer Längsüberdeckung von 90% und einer Querüberdeckung von 20 – 30%. In dem Block wurden die Objektpunkte durchschnittlich in 5,3 Bildern bestimmt und die Bilder enthielten im Mittel 137 Verknüpfungspunkte. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 erreichte $2,91 \mu\text{m}$ (siehe Tabelle 3.4). Die RMS-Werte der Residuen aller Passpunkte lagen unter 1 m für X - und Y Koordinaten und ca. 0,4 m für Z . Die Aerotriangulation des Blockes ist in Anhängen B.3 und B.4 zu vergleichen.

Passpunkte (m)			$\sigma_0 (\mu\text{m})$
SX	SY	SZ	
0,74	0,72	0,37	2,91

Tabelle 3.4: Erzielte Genauigkeiten bei der Blockausgleichung von Bildern der Rollei-Kamera AIC-P20 mit BINGO in Medellín, Kolumbien.

La Concordia, Ecuador Der gesamte Block enthält 27 Bilder mit einer Längsüberdeckung von 65 – 70% und einer Querüberdeckung von 10 – 20%. In dem Block wurden die Objektpunkte durchschnittlich in 2,37 Bildern bestimmt. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 betrug $3,4 \mu\text{m}$ (siehe Tabelle 3.5). Die RMS-Werte der Residuen aller Passpunkte lagen um 3 m für X - und Y Koordinaten und mehr als 8 m in der Höhe. Der aerotriangulierte Block wird im Anhängen B.5 und B.6 dargestellt.

Passpunkte (m)			$\sigma_0 (\mu\text{m})$
SX	SY	SZ	
3,33	2,82	8,20	3,4

Tabelle 3.5: Erzielte Genauigkeiten bei der Blockausgleichung von Bildern der Rollei-Kamera AIC-P20 mit ORIMA in La Concordia, Ecuador.

3.5.2 Abschätzung der Blockausgleichungsgenauigkeit mit Passpunkten, gewonnen aus Landsat-Satellitendatensätzen und SRTM-Höhendaten

Die Genauigkeit der Passpunkte aus Landsat-Datensätzen wurde mittels zweier Aerotriangulationen (gekennzeichnet als $Y1$ und $Y2$) für das gleiche Untersuchungsgebiet von Yumbo (Kolumbien) durchgeführt. Aerotriangulation $Y1$ stützte sich auf Passpunkte von Landsat, während $Y2$ DGPS- und kinematische Passpunkte verwendete. Der gesamte Block enthält 149 Bilder mit einer Längsüberdeckung von 65% und einer Querüberdeckung von 45%. In dem Block wurden Objektpunkte durchschnittlich in 3, 2 Bildern gemessen und die Bilder enthielten im Mittel 96 Verknüpfungspunkte. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 betrug 3, 24 μm für die Aerotriangulation $Y1$ und 3, 08 für $Y2$ (siehe Tabelle 3.6). Beide Blockausgleichungen sind im Anhängen B.7 und B.8 dargestellt.

Aerotriangulation	Passpunkte (m)			$\sigma_0(\mu\text{m})$	Vergleichspunkte (m)			kinematische GPS (m)		
	SX	SY	SZ		SX	SY	SZ	SX	SY	SZ
Y1	11,68	11,31	12,38	3,08	8,24	11,28	21,01	-	-	-
Y2	0,63	0,99	1,08	3,24	13,02	15,52	17,95	0,07	0,06	0,08

Tabelle 3.6: Erzielte Genauigkeiten mit der Kamera Rollei AIC-P45 in Yumbo, Kolumbien. Die Blockausgleichung $Y1$ stützte sich auf Passpunkte von Landsat, während $Y2$ auf DGPS Passpunkte und kinematische Projektionszentrenbestimmungen zurückgriff.

Die Vergleichspunkte dienen dem Vergleich beider Aerotriangulationen, da sie nicht an diesem Vorgang beteiligt sind. Die Lagefehlwerte belaufen sich auf 12 ± 4 m, was niedriger als die Darstellung des panchromatischen Wellenbereiches von Landsat-Aufnahmen liegt. Die Höhenwerte waren hingegen größer als 15 m, aber sie können auf die extremen Reliefbedingungen des Gebietes zurückgeführt werden. Bei $Y2$ waren die RMS-Fehler der Passpunkte etwas höher als erwartet (50 cm), aber die kinematischen GPS-Fehler lagen unter 10 cm und sprechen somit für einen sehr stabilen Block.

3.5.3 Vergleich der Höhengenaugkeit der digitalen Oberflächenmodelle (DOM)

Die generierten DOMs für die gesamten Befliegungsgebiete sind in Anhängen C.1, C.2 und C.3 dargestellt. Die Anhänge C.4 und C.5 zeigen die hergestellten DOMs anhand der ausgewerteten Programme für die Testparzellen A1 und A2 von Santa Fé de Antioquia. Die Höhenpunkte aus den automatischen digitalen Oberflächenmodellen wurden innerhalb des Kronendaches durch die Indizes \overline{dH} und RMSE mit den stereoskopischen Messungen verglichen. In der Tabelle 3.7 sind die Höhengenaugkeiten je Höhenklasse der Bäume zusammengefasst. Darüber hinaus werden Genauigkeitsdaten dieser Höhen für die Palmen angegeben. Die Abbildung 3.8 stellt graphisch das Verhalten von \overline{dH} für die drei ausgewerteten Programme dar.

Höhenklassen	Anzahl der Punkte	\overline{dH} (m)			RMSE (m)		
		LPS	NGate	Match-T	LPS	NGate	Match-T
Bäume < 10 m	2460	-0,01	-0,65	0,18	1,75	1,85	1,68
Bäume 10 – 20 m	19573	-0,24	-0,85	0,11	2,45	2,49	2,37
Bäume > 20 m	14784	-0,20	-0,87	0,16	3,57	3,47	3,35
Palmen	2394	-1,09	-1,19	-0,41	3,70	4,37	4,00
Alle Bäume	36817	-0,20	-0,83	0,14	2,93	2,89	2,65

Tabelle 3.7: Höhengenaugkeiten des DOMs auf dem Baumkronenbereich in der Parzelle A2 von Santa Fé de Antioquia.

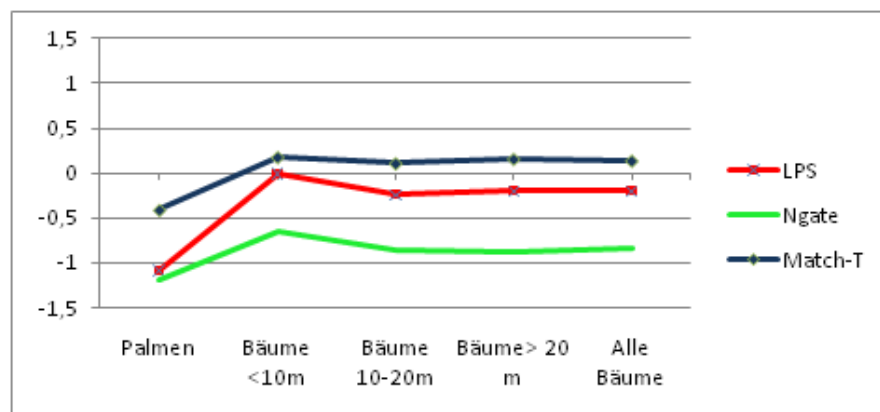


Abbildung 3.8: Mittlere Differenz zwischen automatischen DOM-Höhen und den stereoskopisch gemessenen Höhen innerhalb des Kronendaches ausgewählter Waldtypen für drei Softwarepakete. Die Daten sind nach Höhenklassen und Palmen differenziert.

Die betrachteten mittleren Höhenunterschiede zwischen automatisch generierten und manuell gemessenen DOMs waren in der Regel unter 1 m unabhängig von verwendetem Programm. Die Höhendifferenzen aller Bäume haben eine Normalverteilung mit Mittelwert zwischen $-0,83$ und $0,14$ m mit einer Abweichung (RMSE) von maximal ca. 3 m. Beim Vergleich der Programme lässt sich zusammenfassend das beste Ergebnis

bei Match-T (Inpho) aufgrund der geringfügig kleineren \overline{dH} und Abweichung erkennen. Abgesehen von Match-T zeigten die Programme eine Unterschätzung der Höhe (negative Werte in der Tabelle 3.7), was möglicherweise eine Abschneidung der Kronen bei der automatischen Punktgenerierung widerspiegelt. Obwohl keine klare Tendenz je Höhenklasse der Bäume deutlich im Mittelwert zu sehen war, steigen die Höhendifferenzabweichungen mit Zunahme der Baumhöhe. Palmen waren aufgrund ihrer schlanken Gestalt und linearen Blätter schwieriger von automatischen Korrelationsverfahren richtig zu erfassen als die anderen Baumtypen, erkennbar an den größeren Mittelwerten und Höhenabweichungen.

Die Abbildung 3.9 zeigt den Vergleich eines Profils aus stereoskopischen Messungen (schwarz) und Bildmessungen von NGate (grün), LPS (rot) und Match-T aus Inpho (dunkelblau). Dabei können die Schwierigkeiten bei der Erfassung der Lichtungen in Waldbeständen durch automatische Verfahren erkannt werden. Verschiedentlich werden Einzelbäume, wie in diesem Beispiel eine Palme an der rechten Seite der Abbildung nicht von allen Programmen gut abgebildet.

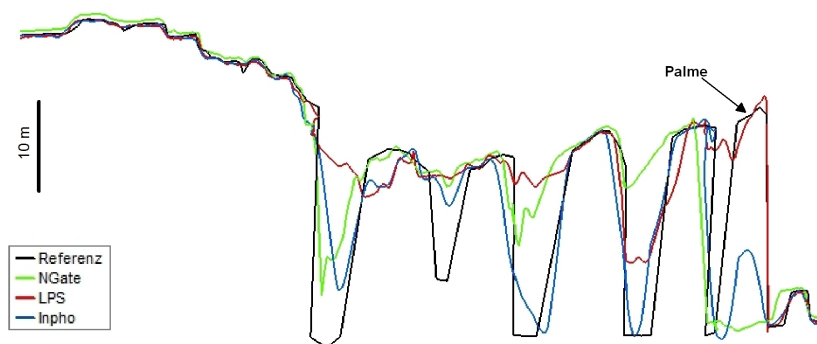


Abbildung 3.9: Vertikale Querprofile durch generierte DOMs eines Waldbestandes im Bereich Santa Fé de Antioquia. Für die Erstellung des DOMs sind die angewandten photogrammetrischen Programme in verschiedenen Farben dargestellt. Als Referenz (in schwarz) wurde eine manuelle Vermessung der Oberfläche aus Stereobildpaaren verwendet.

3.5.4 Vergleich der Höhengenaugigkeit der digitalen Geländemodelle

Die generierten DGMs für die Testgebiete A1 und A2 von Santa Fé de Antioquia sind in Anhängen C.4 und C.5 dargestellt. Eine detaillierte Bewertung der Genauigkeit der DGMs im Vergleich zu stereoskopischen Höhenmessungen im Bezug zum Untergrund ist in der Tabelle 3.8 wiedergegeben. Hierin sind die Ergebnisse nach Parzellen und verwendetem Programm gruppiert.

Parzelle	Geländetyp	Vegetation	RMSE (m)			Maximale Höhendifferenz (m)		
			LPS	NGate	Inpho	LPS	NGate	Inpho
A1 (10 cm)	hügelig	Weide mit offenem Baumbestand	4,03	5,33	1,69	16,38	22,71	14,13
		Bewaldet	11,45	5,15	6,40	19,52	16,24	15,2
A2 (10 cm)	geneigt-flach	Weide mit offenem Baumbestand	2,34	0,61	0,47	14,65	3,01	4,67
		Bewaldet	7,28	1,34	0,82	15,75	8,64	12,30
A3*(10 cm)	flach	Weide mit offenem Baumbestand	2,98	NM	1,41	12,20	NM	9,29
		Bewaldet	5,18	NM	3,67	16,88	NM	14,08
A3*(20 cm)	flach	Weide mit offenem Baumbestand	—	—	0,97	—	—	25,27
		Bewaldet	—	—	1,14	—	—	27,59

^{NM} Nicht möglich aufgrund der hohen Winkelneigung bei Omega und Phi.

* Die Parzelle A3 wurde mit zwei Auflösungen befliegen (GDS 10 und 20 cm).

Tabelle 3.8: Erreichte DGM-Genauigkeit bei der Verwendung drei verschiedener photogrammetrischer Softwarepakete.

Die Höhenfehler der DGMs variierten stark je nach Objektinhalt/Baumdichte der Parzelle und deren Topographie. Die Leistung der Programme ist unterschiedlich, wobei Inpho (Match-T und DTM-Toolkit) die besten und LPS die schlechtesten Ergebnisse erbracht haben. Beispielweise waren mittlere Fehler von unter 1 Meter bei Inpho in der Parzelle A2 die Regel, während Ngate sich etwas ungenauer erwies (Fehler von 0,61 bis 1,34 m) und LPS auf Fehler von 2,34 m für halboffene Gebiete und 7,28 m für dicht bewaldete Bereiche abfiel.

Immerhin sind bei allen Parzellen einige Bäume nach den Filterungen vom DOM bis zum DGM erhalten geblieben und andere wurden partiell erniedrigt, wie in den Spalten

der maximalen Höhendifferenz zu sehen ist. Diese Situation ist stärker ausgeprägt in der Parzelle A1 unter Einfluss der welligen Topographie, wie auch in den Geländeprofilen der Abbildung 3.10 ersichtlich ist. Bei dieser Parzelle sind beispielweise in den dicht bewaldeten Teilen für alle Programme die mittleren Fehler größer als 5 m. Obwohl die Parzelle A2 und die Parzelle A3 ein flaches Gelände vertreten und ähnliche Fehler sowohl in offenen Weiden als auch in bewaldeten Teilbereichen zu erwarten wären, sind die Fehler bei A3 deutlich größer (sogar dreifach mit Inpho). Das kann auf die hohen Bildwinkelneigungen bei Omega und Phi zurückgeführt werden, die mehrmals 10 gon überschritten und somit die DGM-Erstellung schwieriger gemacht haben. Das war möglicherweise der Grund dafür, dass überhaupt kein DOM durch NGate erzeugt werden konnte.

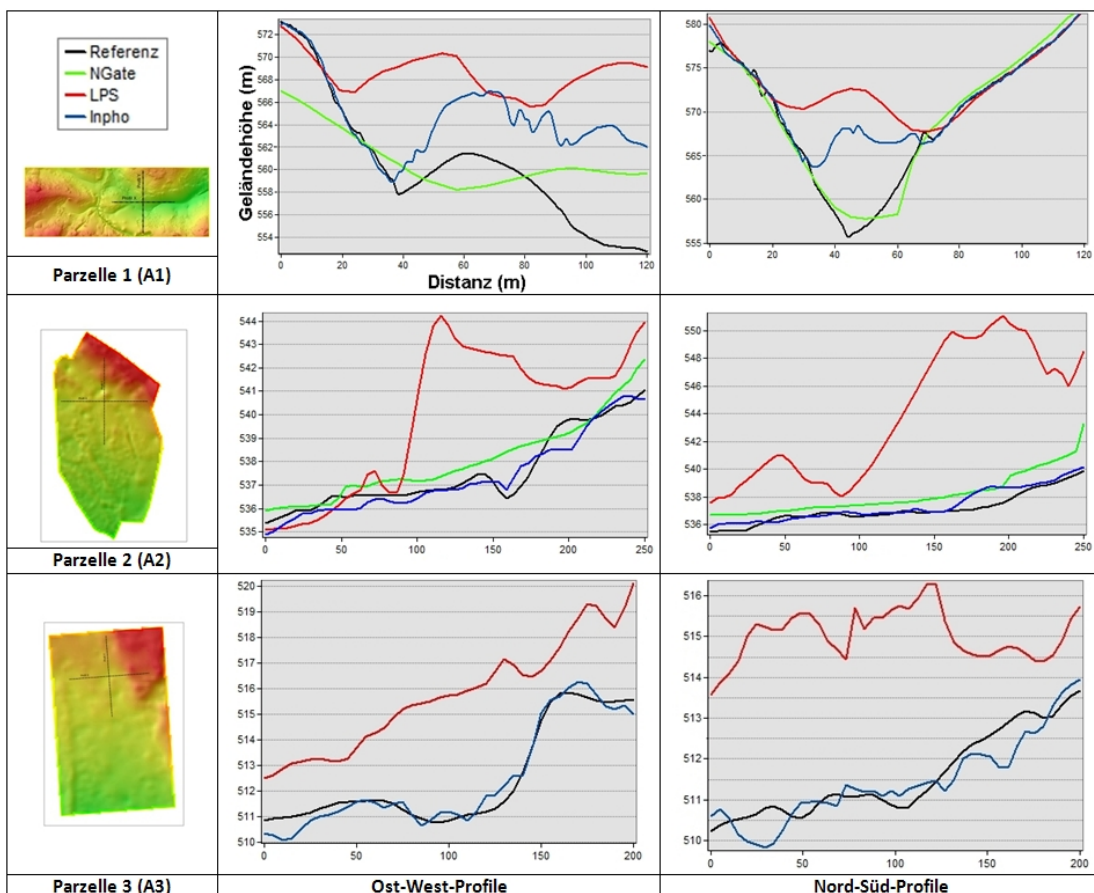


Abbildung 3.10: Ausgewählte Geländeprofile ausgewertet mit drei verschiedenen photogrammetrischen Softwarepaketen für die drei Parzellen von Santa Fé de Antioquia.

Ein Blick auf die Profile in X und Y Richtung in der Abbildung 3.10 lässt ebenfalls erkennen wie treffend A2 und A3 durch Inpho und NGate modelliert sind im Vergleich zu A1. In A1 waren die Höhenniveaus der Untergrundoberfläche in den Schluchtwäldern der Kerbtäler besonders schwer zu erfassen. Nur NGate hat es teilweise erfolgreich

geschafft (siehe vertikales Profil in Abbildung 3.10). Aber auf der anderen Seite haben sowohl NGate als auch LPS dazu geneigt, die Böschungen zu den Mittelhangteilen des Reliefs zu köpfen, so dass in Gesamtergebnis keine voll befriedigende Wiedergabe der Untergrundoberflächen zustande kommt.

3.5.5 Vergleich der Höhengenaugigkeit bei der Baumhöhenbestimmung

Die Differenzen zwischen den automatisch und stereoskopisch gemessenen Baumhöhen sind für die Untersuchungspartellen von Santa Fé de Antioquia in der Tabelle 3.9 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Höhenklassen angegeben. Für die Parzelle A3 werden zusätzlich Differenzen für zwei Befliegungsaufösungen (10 und 20 cm) mit dem Softwarepaket Match-T berechnet, weil es die besten Ergebnisse erbrachte.

Parzelle (GSD)	Bewerteten Höhenklassen	Anzahl der Bäume	\overline{dH} (m)			RMSE (m)		
			LPS	NGate	Match-T	LPS	NGate	Match-T
A1 (10 cm)	Alle	134	-5,32	0,25	-2,49	6,84	3,72	4,18
	H < 10 m	67	-2,96	1,78	-1,15	3,88	3,77	2,75
	10 m ≤ H ≤ 20 m	56	-6,37	-0,62	-3,13	6,80	2,99	4,40
	H > 20 m	11	-14,38	-4,64	-7,44	7,79	6,05	8,28
A2 (10 cm)	Alle	441	-3,70	0,33	0,18	5,34	2,22	1,45
	H < 10 m	91	-1,43	1,00	0,66	2,93	2,31	1,62
	10 m ≤ H ≤ 20 m	264	-3,90	0,37	0,20	5,35	2,23	1,49
	H > 20 m	86	-5,50	-0,49	-0,35	7,00	2,04	1,10
A3 (10 cm)	Alle	514	-2,42	NM	-0,31	3,95	NM	3,22
	H < 10 m	127	-0,99	NM	0,89	3,40	NM	3,10
	10 m ≤ H ≤ 20 m	334	-2,67	NM	-0,58	4,0	NM	3,10
	H > 20 m	53	-4,24	NM	-1,46	4,77	NM	4,07
A3 (20 cm)	Alle	514	—	—	1,08	—	—	3,59
	H < 10 m	127	—	—	1,50	—	—	3,00
	10 m ≤ H ≤ 20 m	334	—	—	1,04	—	—	3,63
	H > 20 m	53	—	—	0,32	—	—	4,49

^{NM} Nicht möglich aufgrund der hohen Variation der Bildorientierungswinkel Omega und Phi.

Tabelle 3.9: Baumhöhendifferenz der automatisch erfassten und stereoskopisch gemessenen Baumhöhen für die Untersuchungspartellen von Santa Fé de Antioquia. Negative Werte deuten auf eine Unterschätzung der mittleren Baumhöhen hin.

Viele der Fehler, die schon bei der DGM-Genierung aufgetreten sind (siehe Abschnitt

3.5.4), spiegeln sich hier auch wieder. Bei der Parzelle *A1* war NGate eindeutig der “Gewinner” mit einem mittleren Unterschätzungsfehler von 0,35 m in einem sehr welligen Areal, was sich allerdings nicht so deutlich in den Standardabweichungen dokumentiert: 3,72 m für NGate, 4,18 m für Match-T und 6,84 m für LPS. Die Parzellen *A2* und *A3*, die eine eher flache Topographie vertreten, weisen kleinere mittlere Fehler bei allen Programmen auf. Allerdings sind diese bei LPS deutlich größer als bei den anderen mit Differenzwerten von über 2 m für LPS und unter 1 m für NGate und Match-T. Leider war es systembedingt nicht möglich, diese Aussage in der Parzelle *A3* mit NGate zu bestätigen. Die Standardabweichungen für *A2* sind ca. 1,50 m für Match-T und 2,2 m für NGate. Für LPS sind sie noch höher (über 5 m).

Die Fehler stehen generell in einem direkten Verhältnis zu den Baumhöhen, das heißt, je höher ein Baum ist desto größer wird der Fehler bei der Baumhöhenbestimmung, unabhängig vom Programm. Das wird sowohl mit der mittleren Differenz (\overline{dH}) als auch durch die Standardabweichung (RMSE) bestätigt.

Wenn die zwei Auflösungen durch Match-T verglichen werden (Parzelle *A3*), lassen sich bessere Ergebnisse mit der höheren Auflösung (10 cm) mit Hilfe der \overline{dH} erkennen, die bei allen Höhenklassen, ausgenommen für Bäume größer als 20 m, bestätigt werden können. Bei der Analyse der RMSE ist dies aber nicht so klar abzulesen.

3.5.6 Orthophotomosaik

Die Orthophotomosaik wurden nach den im Abschnitt 3.4.6 beschriebenen Verfahren in 10 bis 20 cm Auflösungen berechnet. Die abgeleiteten Orthophotomosaik werden in Anhängen D.1, D.2 und D.3 für die gesamten Befliegungsgebiete von Santa Fé de Antioquia, Medellín und La Concordia wiedergegeben. Außerdem sind die Orthophotomosaik für die verschiedenen Untersuchungspartellen in den Anhängen D.4 für Santa Fé, D.5 für Medellín und D.6 für La Concordia zu sehen. Diese dienen ausschließlich als Grundlage für die Baumerkennung in Kapitel 4 und die Baumklassifizierung in Kapitel 5 und werden daher hier nicht weiter beschrieben.

3.6 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel wird das Potential der digitalen Photogrammetrie für die Erfassung von Geländemodellen, Oberflächenmodellen und Baumhöhen in bewaldeten Gebieten diskutiert. Wesentliche Themen sind:

- Das Auswertungspotential der mittelformatigen Rolleimetric-Kameras.
- Die Qualität der frei verfügbaren Passpunkte-Quellen.
- Die Automatisierungsmöglichkeiten und.
- Die Genauigkeit der erhobenen Daten.

Unter diesen Aspekten werden die oben aufgeführten Ergebnisse beurteilt.

3.6.1 Aerotriangulation und Selbstkalibrierung

Im Rahmen der Arbeit wurde meist dem traditionellen Weg der Bestimmung der Bildorientierung durch Bündelblockausgleichung gefolgt. Dafür wurden aus Bildzuordnungs-Verfahren semiautomatisch generierte Verknüpfungspunkte und manuell gemessene Passpunkte eingesetzt. Als Bildmaterial wurden digitale mittelformatige Luftbilder der Rolleimetric-Kameras, AIC-P20 und AIC-P45 verwendet. Die erste wurde zur Analyse der Baumbestände eingesetzt, während die AIC-P45 nur zur Genauigkeitsanalyse der Passpunkte Verwendung fand.

Einer der Nachteile der Rolleimetric Kameras besteht in der großen Objektivverzeichnung dieses Mittelformat-Kamaretyps. Sie ist deutlich stärker ausgeprägt bei der AIC-P45 aufgrund ihres nicht-quadratischen Bildformats. Zur Korrektur dieses Phänomens werden in der Regel sowohl aus Labor stammende Kalibrierungsparameter als auch die sogenannten Selbstkalibrierungsparameter verwendet. Obwohl für diese Arbeit die Labor-Parameter zur Verfügung standen, waren diese nicht zur vollständigen Korrektur der Verzerrung ausreichend. Die Selbstkalibrierung wurde also mittels der vom angewandten Aerotriangulationssoftwarepaket angebotenen Parameter durchgeführt. Dies

erfordert aber die vorherige Eliminierung der mangelhaften Verknüpfungs- und Passpunkte. Die Ergebnisse bei der AIC-P20 haben die positive Wirkung der Selbstkalibrierung eindeutig nachgewiesen, indem das σ_0 (Ausdruck der relativen Genauigkeit) in den meisten Fällen von 1 Pixel auf $\frac{1}{3}$ Pixel zurückgegangen ist. Auch die graphische Darstellung der überlagerten Bildresiduen hat eine starke Verkleinerung der systematischen Restfehler über die gesamte Bildoberfläche gezeigt. Das hebt die Notwendigkeit der Selbstkalibrierung bei der Verwendung von mittelformatigen Kameras hervor. Dieser Aspekt wurde schon von JACOBSEN (2009) und JACOBSEN ET AL. (2010) für die AIC-P45 beschrieben. Die Autoren fanden nach der Bearbeitung des Blockes mit Standardparametern lokale nicht kompensierte systematische Bildfehler, die sich aber nur teilweise durch zusätzliche Parameter des Programms BLUH verringern ließen.

Die Rolle AIC-P20 bietet sich als eine preiswertige Lösung für kleine Projekte an. Sie verfügt zwar über eine relativ gute geometrische und radiometrische Bildqualität, hat aber den großen Nachteil einer sehr geringen Flächenabdeckung im Vergleich zu Großformatkameras. So zum Beispiel wären, um eine Fläche von 1 km^2 mit einer Längs- und Quer-Überlappung von 60 und 30% mit einer gewünschten GSD von 10 cm zu erfassen, ungefähr 21 RGB-Bildaufnahmen der AIC-P20 aber nur 3, 4 RGB-Bilder der DMC (Z/I Imaging) (mit Pansharpening) erforderlich. Das macht die Auswertung der kleinen Bilder zeitaufwendiger als die größerer Bildformate. In einem Block mit über 230 Bildern, wie beim Gebiet in Santa Fé de Antioquia, konnte diese Schwierigkeit selbst in Erfahrung gebracht werden. Es sind nicht nur mehr Passpunkte erforderlich, sondern die Messung von Verknüpfungspunkten bereitet erhöhten Aufwand. Die Tendenz der Mittelformatkameras schreitet allerdings rasant zu größeren Sensoren voran und es ist inzwischen mit 80 MB die fünffache Größe der AIC-P20 und damit das Ausmaß der Flächenabdeckung von konventionellen analogen Luftbildkameras erreicht.

Die erleichternden Elemente wie Kamerastabilisierung und der Einsatz von zusätzlichen GPS / IMU-Komponenten standen nicht zur Verfügung und machten diese Auswertung deshalb besonders aufwendig. Wie JACOBSEN ET AL. (2010) beschreiben, ist für einen operationellen Einsatz eine bessere Einhaltung der vorgesehenen Bildflugplanung und die Bestimmung der Sensororientierungs-Parameter bei der Befliegung - zumindest Koordinaten der Projektionszentren - empfehlenswert. Allerdings hat es sich durch verschiedene Tests am Geographischen Institut der HHUD erwiesen, dass manchmal die Projektionszentren allein nicht ausreichend sind. Sogar mit Passpunktgenauigkeiten unter 0,2 m durch kinematische DGPS lässt sich bei kontrastarmen Flächen oder mit Bereichen gleich bleibender Bildtextur aufgrund der hohen Variation von Orientie-

zungswinkeln Omega und Phi bei unruhigen Flügen keine gute automatische Verknüpfung erreichen. Leider ist die Antwort auf die Herausforderung der voll automatischen Generierung von genügend und gleichverteilten Verknüpfungspunkten in den Bildern ohne Sensororientierungsparameter noch nicht befriedigend gelöst. Das wirkt sich wiederum auf die Kosten aus. Allein die Anschaffung von einem präzisen kommerziellen GPS/IMU System erfordert mindestens 150.000,- und kann sich durchaus auf 400.000 bis 500.000 EURO belaufen.

Andere vorteilhafte Aspekte bei der Anwendung der Mittelformatkameras in den Tropen sind ihre Tragbarkeit (geringes Gewicht), eine einfache Handhabung und die Möglichkeit zum Einsatz von Wechselobjektiven (Weitwinkel- bis Tele-Objektiven) für stark reliefabhängige Befliegungen und kleineres Fluggerät als mit Großformatkameras. Das würde bedeuten, dass für ein GSD von 10 cm eine Befliegungshöhe von 567 m für die AIC-P20 (51 mm Objektiv) anstatt den 1000 m für die DMC (120 mm Objektiv) nötig wäre. Dieser Faktor ist besonders wichtig, da in vielen feuchten Regionen eine konstante Wolkenbedeckung vorhanden ist und somit unter der Wolkendecke geflogen werden kann.

3.6.2 Verwendung von Passpunkten, gewonnen aus Landsat-Kompositen und SRTM-Höhendaten

In dieser Arbeit wurden teilweise zur Passpunktgewinnung frei verfügbare Datenquellen genutzt und ihre Genauigkeit überprüft. Komplette Jahrgänge von Landsat-Aufnahmen, die von USGS (www.glovis.usgs.gov) angeboten werden, können zur Lagepasspunkt-Gewinnung verwendet werden. Die meisten dieser Daten werden zum 1T-Niveau (Standard Terrain Correction) zur Verfügung gestellt, das heißt, unter Einbeziehung von Passpunkt- und DGM-Korrekturen. Die Genauigkeit der Daten hängt also von der Präzision der herangezogenen Passpunkte und DGMs ab. Ebenso sind Höhenpasspunkte mit 90 m - Pixelauflösung kostenlos von dem interferometrischen Radar basierenden DGM der SRTM-Mision (<http://seamless.usgs.gov> und <http://srtm.csi.cgiar.org>) erhältlich.

Die hier genutzte Methode zur Passpunktgewinnung ist nicht ganz neu. Schon in einigen vom Geographischen Institut der Heinrich-Heine-Universität durchgeführten Projekten, hat sich das Potenzial dieser Methode erwiesen. Beispielsweise, HECK (2006)

zog Landsat- und SRTM-Passpunkte zur ökologischen Kartierung des Nationalparks von Puracé in Kolumbien mit Genauigkeiten von 13, 7; 8, 3 und 9, 1 m in X , Y und Z heran. Trotzdem sind diese Ergebnisse mit Vorsicht zu verwenden, da normalerweise in diesen Analysen die in den Satellitendaten enthaltenden nicht durch 1T-Niveau und DGMS korrigierten Lageversätze nicht berücksichtigt worden sind. Die Grundidee dieses Teils der Dissertation war, diese Ungenauigkeiten abzuschätzen. Nach dem in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Verfahren wurden absolute Fehler von 11, 7; 11, 3 und 12, 4 m in der Probesträhle von Yumbo festgestellt, wenn nur die Landsat- und SRTM-Daten als Passpunkte herangezogen waren. Wenn aber sehr präzise DGPS-Daten zu Verfügung standen, sind diese Fehler auf 13; 15, 5 und 17, 9 m gestiegen. Das deutet darauf hin, dass die implizierten Lagefehler dieser Datenquellen (zwischen den Systemen vorhandene Fehler) für diesen Bereich ungefähr 2 bis 5 m erreichten. Bei der Höhe lagen die Mittelfehler von SRTM-Daten um 5 m. Dies entspricht annähernd den Ergebnissen von GOROKHOVICH & VOUSTIANIOUK (2006), welche Höhenfehler der SRTM Daten von 7, 8 m in Thailand und 4, 07 m in Catskills in den USA fanden. Sie sind auch besser als die in den Originalquellen prognostizierten Fehler von 16 m des SRTM-Systems. Andere kostenlose Höhen-Datenquellen bestehen aus den 30 m Pixelauflösung ASTER-Daten, die aber nicht in Rahmen dieses Projekts verwendet werden konnten. In diesem Zusammenhang wies jüngst JACOBSEN ET AL. (2010) nach, dass im Durchschnitt die Genauigkeit der SRTM-Höhenmodelle besser ist als die der ASTER-Daten. Die Qualität der SRTM ist auch abhängig vom Geländeraussehen (Gebäude und Vegetation) (KOCH ET AL. (2002)).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die erreichbare Genauigkeit aus frei zugänglichen Datensätzen entnommener Passpunkte in einem für die forstwirtschaftlichen Arbeiten akzeptablen Rahmen liegt. Die darauf basierenden Aerotriangulationen sind in vielen Fällen aufgrund der teilweisen Unzugänglichkeit einzelner Bereiche die einzige Möglichkeit, zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten. Allerdings können Schwierigkeiten für die Punktmarkierung aufgrund des in den tropischen Waldgebieten häufig vorhandenen hohen Bewölkungsgrads auftreten. Dies kann aber durch die Verwendung von verschiedenen Satellitendaten-Jahrgängen behoben werden. Probleme können sich aber durch zeitlich bedingte Objektverlagerungen in den Satellitenaufnahmen ergeben, die dann in den verschiedenen Jahrgängen die Position von z.B. Flussläufen, einzelnen Bäumen usw. verändern.

Ein Versuch zur gemeinsamen Nutzung von Landsat-Passpunkten und im Gelände gewonnenen DGPS-Passpunkten wurde im Untersuchungsgebiet von Santa Fé de Antio-

quia durchgeführt. Diese Kombination von großen Flächen abdeckenden Passpunkten (aus Satelliten) und präzise vermessenen Punkten vor Ort hat sich allerdings nicht als sinnvoll erwiesen und in allen Fällen zu instabilen Blockausgleichungen geführt.

3.6.3 Höhengenaugigkeit der digitalen Oberflächenmodelle (DOM) des Kronendachs von Busch- und Waldbeständen

Die Höhengenaugigkeit der automatisch abgeleiteten DOMs wurde nur auf dem Niveau des Kronendaches evaluiert. Als Referenz wurden manuelle stereoskopische Messungen herangezogen. Die Ergebnisse waren sehr erfolgversprechend, da generell unabhängig von ausgewerteten Höhenklassen der Bäume und verwendeten Softwarepaketen mittlere Fehler unter 1 m erreicht werden konnten. Allerdings gab es in Einzelfall auch große Fehler bei den Ergebnissen, wie aus den erreichten Standardabweichungen (RMS-Fehler) bis 4,4 m zu entnehmen ist. In Relation zu der Untersuchung von BALTSAVIAS ET AL. (2008) mit Bildern der DMC-Kamera bei ähnlicher Vorgehensweise in bewaldeten Gebieten Europas werden vergleichbare Ergebnisse erreicht. Da betragen die mittleren Fehler 0,51 m und die RMS-Fehler 2,41 m.

Die Qualität der Ergebnisse hängt nicht nur von den Zuordnungsalgorithmen ab, sondern auch von Faktoren wie Bildinhalt, den eingesetzten Interpolations- und Filteralgorithmen sowie der Qualität der rekonstruierten Bildgeometrie (HAALA & WOLFF (2009)). Auch die Fehler der Referenzmessungen tragen zur Größe der Fehler bei. In dieser Arbeit zum Beispiel wird ein Fehler im Bereich von ca. 0,5 – 1 m im Kauf genommen, wie sich aus einigen wiederholten Messungen ableiten ließ.

Bezüglich des Bildinhalts in Waldbeständen sind in der Literatur außer Rauschen verschiedene Faktoren als problematisch erwähnt, wie Bildverdeckung (sichttote Bereiche), Schlagschatten des benachbarten Baumes und die nicht Erfassung der Lücken im Kronenbereich. So neigen die kleinen Lücken im Kronendach dazu, mit anderer Höheninformation aufgefüllt zu werden. Insbesondere konnte bei dieser Arbeit festgestellt werden, dass Bäume mit langen schlanken Gestalten und nicht so dichter Belaubung, wie Palmen *Cocos nucifera* und die einheimische *Acrocomia antioquiensis*, schwieriger von Zuordnungsverfahren zu treffen waren als andere Laubbäume. In diesem Sinne fand HEURICH (2006) bei der Modellierung von Nadelbäumen mit ihren spitzen Formen ähnlich fehlerbehaftete Ergebnisse wie sie hier mit o.g. Palmengattungen erzielt

wurden.

Die Interpolations-Verfahren zur Rasterisierung der Höhenpunkte wie TIN tragen auch zu den Fehlern bei (ZHANG (2005)). Eine Alternative dazu wäre die direkte Bearbeitung der 3D-Punktwolken von Baumkronen. Bei der hier dargelegten Untersuchung wurde diese Möglichkeit verworfen, da sie nicht alle verwendeten Programme zur Verfügung stellten, unter anderem nicht Ngate.

In den letzten Jahren hat eine erhebliche Weiterentwicklung in der automatischen bildbasierten Erzeugung von Höhendaten stattgefunden, die von Autoren wie BALTSAVIAS ET AL. (2008) sowie HAALA & WOLFF (2009) hervorgehoben wird. Ein Teil davon kann auf die bessere Bildqualität der digitalen Bildaufnahmen gegenüber gescanntem Filmmaterial zurückgeführt werden. Diese hat zudem zu einer Wiederbelebung der Entwicklung von Bildzuordnungsalgorithmen geführt. Kommerzielle Beispiele dafür, die bei dieser Arbeit Verwendung fanden, sind Ngate von BAE Systems und Match-T von Inpho GmbH. LPS von Erdas Inc. hat auch mit neuen Zuordnungsalgorithmen unter der Version vom Ende 2009 (hier nicht angewendet) nachgezogen. Die relativ neu entwickelten Algorithmen erlauben die Höhenpunkt-Bestimmung jedes einzelnen Pixels. Die Tendenz zeigt, dass die besten Ergebnisse bisher auf der Kombination von "Area based Matching" (ABM) und "Feature based matching" (FBM) Funktionen basieren. Darüber hinaus ermöglicht die potentielle Nutzung von Mehrfachüberdeckungen die Erzeugung von engmaschigen Daten. Diese Produkte verfügen oftmals über größere Punktdichten als sie mit den meisten LIDAR-Systemen bei ähnlichen Maßstäben generiert werden. Die Qualität und Detailliertheit dieser Bildkorrelationen nähern sich zunehmend der von Laserscanning (HAALA & WOLFF (2009)) in diesem Bereich, so dass Autoren wie BALTSAVIAS ET AL. (2008) sogar von besseren Ergebnissen in bewaldeten Gebieten berichten als sie mit LIDAR erzielt werden. Diese Verbesserung gehen jedoch zu Lasten von deutlich höheren Rechenzeiten.

3.6.4 Genauigkeiten der von DOMs abgeleiteten digitalen Geländemodelle (DGMs)

Die weltweit aktuelle Tendenz zur DGM-Gewinnung weist das LIDAR als die führende Methode aus. Wie in Abschnitt 3.3.5 (siehe Tabelle 3.1) dargestellt wurde, werden schon Genauigkeiten in Waldbereichen in gemäßigten Regionen von unter 1 m und unter 3 m

im tropischen Regenwald (z.B. CLARK ET AL. (2004)) erreicht. Das LIDAR-System ist aber normalerweise in tropischen Ländern aus technischen oder ökonomischen Gründen noch beschränkt einsetzbar oder befindet sich noch in der Anfangsphase von Erprobungen. Die Photogrammetrie kommt als eine Alternative zur DGM-Gewinnung auf Basis der Filterung von DOMs in Frage. Viele dieser Algorithmen sind Weiterentwicklungen der LIDAR-Technologie und sind daher ein intensiver integrativer Forschungsbereich, um die Bodenoberfläche sicherer zu bestimmen.

In dieser Untersuchung wurden die Softwarepakete NGate, Inpho und LPS zu diesem Zweck verwendet. Dabei zeigte sich, dass Parameter wie Bodenbedeckung und Topographie eindeutigen Einfluss auf die erzeugten Modelle hatten. Dies wird schon von mehreren Studien festgestellt (z.B. HYYPPÄ ET AL. (2000), HODGSON ET AL. (2003), CLARK ET AL. (2004)). Die größten Fehler haben sich in dieser Arbeit in dicht bewaldeten Bildbereichen einer hügeligen Parzelle ergeben, wo Werte über 5 m unabhängig vom verwendeten Programm die Regel waren. Die weitgehend ebenen Gebiete haben hingegen sehr akzeptable mittlere Differenzen ergeben, mit Fehlern unter 1,5 m bei der Verwendung von Inpho und NGate. Bereits Autoren wie JACOBSEN & LOHMANN (2003) haben diese Tendenzen bei der Geländemodellierung unterstrichen.

Die Strategien von LPS und Ngate wirken sich überwiegend als Eliminierung von einzelnen Objekten aufgrund der Anpassung an das Gelände mit Hilfe geneigter Geraden aus. Das kann aber dazu führen, dass markante Geländestrukturen wie Hügelkämme, die vom Programm als relevante Objekte erkannt werden sollten, abgeschnitten werden. Inpho dagegen bestimmt die vereinzelt oder unregelmäßig auf der Reliefoberfläche in Erscheinung tretenden Objekte durch iterative Profilanalyse. Dadurch bleiben immer bei offenen Bestandsflächen an den Positionen der Bäume Vollformen nach der Filterung erhalten oder Hohlformen werden nicht in voller Tiefe repräsentiert. Einige der gefundenen Probleme sind in Abbildung 3.11 dargestellt.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für den späteren Erfolg bei der Filterung ist die hinreichende Eindringkapazität des Sensors bei der Findung von Bodenpunkten während der Aufnahme. In den Luftbildern ist dieser noch kritischer als beim Laserscanning infolge der Abhängigkeit von den Sichtbedingungen innerhalb des Waldbestandes. Was ähnlich, aber in geringerem Maße, für die Durchdringung mit Laserstrahlen durch die Dichte der Belaubung gilt. Alternativen wie die Anwendung des texturverstärkenden Wallis Filters können die Schatteneffekte in Luftbildern etwas abmildern, aber sie nicht definitiv beseitigen. Immerhin ist die Anwendbarkeit beider Methoden (Luftbild und

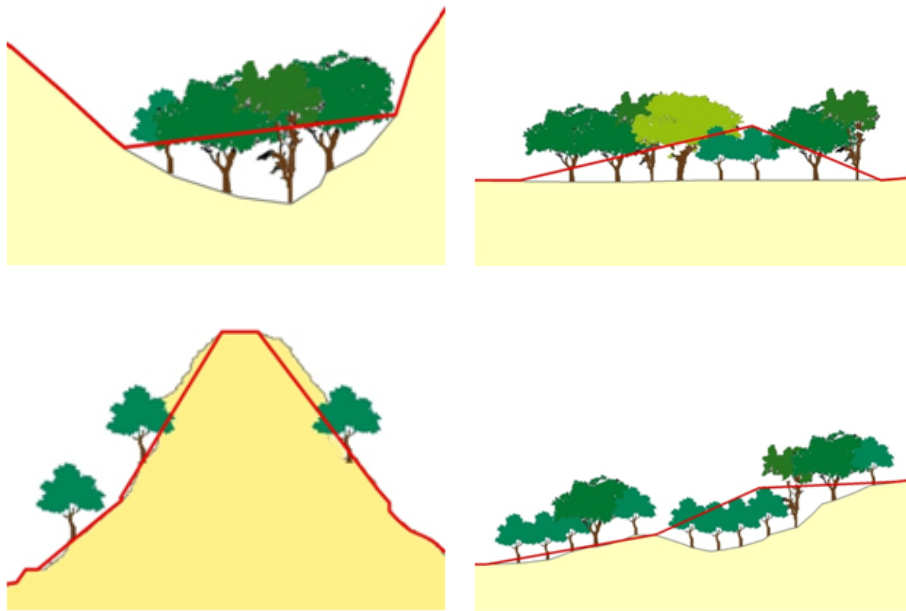


Abbildung 3.11: Häufig gefundene Schwierigkeiten bei der automatischen Geländemodellierung in bewaldeten Gebieten. Die rote Linie stellt das generierte DGM und die graue Linie das tatsächliche Relief dar (Eigene Darstellung).

LIDAR) immer noch in bestimmten Situationen sehr beschränkt vor allem in mehrstufigen geschlossenen Regenwäldern oder in Wäldern mit dichtem Unterholz. Eine partielle Lösung wäre die direkte Modellierung auf Basis der Baumkronenoberfläche, wie von KRAUS & PFEIFER (1998) bereits 1998 erwähnt, aber nie mit Erfolg ausgebaut wurde. Ein Grund dafür ist sicher, dass das Verhältnis zwischen Kronendurchmesser und Baumhöhe in heterogenen Wäldern, vor allem typisch für die Tropen, nicht immer linear ist.

3.6.5 Genauigkeit der Baumhöhenbestimmungen

Die genaue Abschätzung der Baumhöhen ist stets von großer Bedeutung in der Forstwirtschaft, da die meisten Waldbestandsmessungen und Forstmodellierungen darauf basieren. Bei dieser Arbeit wurde das DKM (digitales Kronenmodell) zur Baumhöhenbestimmung verwendet. Dies besteht aus der Differenz zwischen DOM und DGM. Es hat sich gezeigt, dass der kritische Schwachpunkt bei der richtigen Erfassung der Baumhöhe in den meisten Fällen an der DGM-Gewinnung liegt (siehe Abschnitten 3.5.4 und 3.6.4). Aus diesem Grund ergeben sich die kleineren Fehler bei den ebenen Geländeformen. Diese betragen bei der Anwendung von DKM aus Inpho und Ngate im Durchschnitt weniger als 1 m und Abweichungen zwischen 1 bis 3,5 m mit einer normalen Häu-

figkeitsverteilung der Residuen. Andererseits ist dieser Fehler bei der welligen Parzelle auf etwas mehr als 3 m gestiegen. Das betont nochmals, wie bei der DGM-Gewinnung, die Limitierungen der Zuordnungsmethoden für die Baumhöhenbestimmung in nicht vorwiegend flachem Gelände und in dicht bewaldeten Gebieten. Das hat nicht so große Bedeutung für andere Untersuchungsmöglichkeiten. Beispielweise würde die Bodenerfassung für die Wachstums- bzw. Holznutzungs-Abschätzungen durch multitemporale Luftbildanalyse nicht so gewichtig sein.

Ebenso wie von anderen Forschern berichtet (z.B., HEURICH (2006)), war eine starke Korrelation zwischen Baumhöhen und ermittelten Fehler deutlich zu sehen (siehe Abschnitt 3.5.5). Mit anderen Worten, je höher der Baum, umso größer der Fehler bei der Abschätzung seiner Höhe. Die Rolle der Baumform bzw. der Baumart ist auch nicht zu unterschätzen wie von mehreren Autoren ständig unterstrichen wird (HEURICH (2006), HYYPPÄ ET AL. (2008), usw.).

Ein anderer bewerteter Parameter war der Einfluss der Bildauflösung auf die Höhenbestimmungen. Hierfür wurden Befliegungen von GSD ca. 10 und 20 cm untersucht. Diese deuten darauf hin, dass bessere Ergebnisse bei höheren Auflösungen zu erwarten sind, wie aus den mittleren Fehlern ersichtlich wird. Trotzdem sollte man hier vorsichtig sein, weil auch andere Einflussfaktoren wie Lichtbedingungen während der Befliegung eine bedeutende Rolle dabei spielen (siehe Tabelle 3.10).

3.7 Zusammenfassung der photogrammetrischen Anwendungen

In diesem Kapitel wurden Ergebnisse zu verschiedenen Themen in Bezug auf die Anwendung von photogrammetrischen Ansätzen präsentiert. Diese umfassten von der Aerotriangulation von digitalen mittelformatigen Luftbildern und der Selbstkalibrierung von Luftbildsensoren bis hin zur Bewertung der erreichten Genauigkeiten bei der Generierung von DOMs und DGMs und der Bestimmung der Baumhöhen mittels automatischer Verfahren. Auch die Verwendung von frei zugänglichen Datenquellen (Landsat- und SRTM-Datensätzen) als Referenzdaten für die Aerotriangulation wurde analysiert und bewertet.

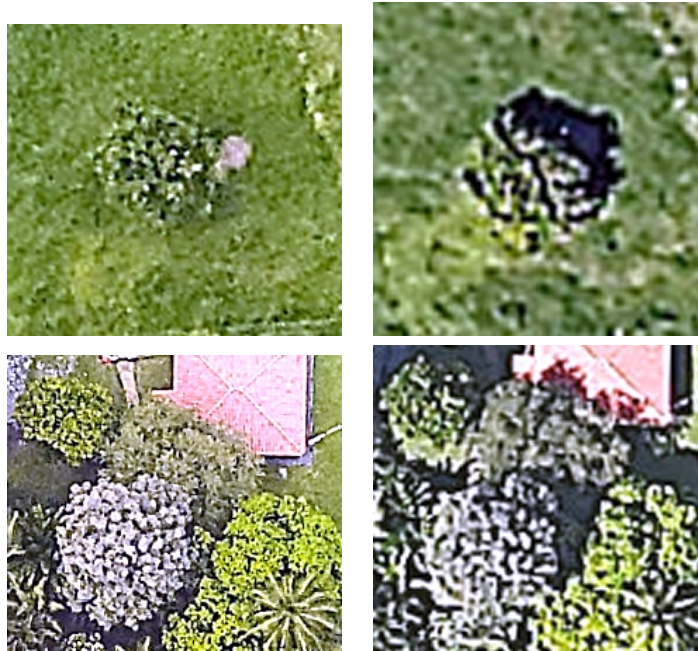


Tabelle 3.10: Effekt der Schattierungen auf die Sichtbarkeit der Bäume bei zwei unterschiedlichen Befliegungszeitpunkten und Auflösungen (GSD): 10 cm (links) und 20 cm (rechts) (Eigene Darstellung).

Bei der Aerotriangulation konnten Genauigkeiten unter einem halben Pixel, sogar oftmals einem Drittel Pixel der verschiedenen Bildblöcke sowohl mit Bingo als auch mit Orima erreicht werden. Dies erforderte allerdings die Anwendung von zusätzlichen Parametern bei der Blockausgleichung aufgrund der starken Verzerrung der Objektive von Mittelformatkameras und der Weitergabe der Produkte an den Nutzer ohne Vorbehandlung. Bei der Rolle Kameras AIC-P20 und AIC-P45 konnte dieses Problem weitgehend bereinigt werden. Allerdings sind kleine Residuenfehler an den Bildecken noch verblieben, insbesondere bei der AIC-P45, die sich bis auf ca. ein Pixel ($6,2 \mu\text{m}$) beliefen.

Die Anwendung von Satelliten-Passpunkten mit Genauigkeiten von 15 m für die Lagekoordinaten und SRTM- Höhendaten (mit einer 90 m - Auflösung) hat absolute Fehler zwischen 10 und 20 m in Lage- und Höhengenaugigkeit insgesamt ergeben. Fehler aus den Datenquellen selbst sind mit 3 – 10 m Größenordnung zusätzlich zu berücksichtigen. Die Erkennbarkeit der Passpunkt-Bildobjekte ist von sehr großer Bedeutung bei den Ergebnissen. So haben sich zum Beispiel Flussbiegungen und Straßenkreuzungen, Baumkronen, Felsen sowie Parzellenecken als zufriedenstellende Passpunkte erwiesen. Die Topographie und Bodenbedeckung spielen auch eine wichtige Rolle, so dass geringere Höhenfehler in eher flachem bzw. offenem Gelände zu erwarten sind. Grundsätzlich ist diese Methode sehr nützlich, da relativ große Oberflächen in abgelegenen oder

unzugänglichen Bereichen in Entwicklungsregionen damit erfasst und evaluiert werden können.

Die von den Bildzuordnungsverfahren abgeleiteten DOMs wurden auf Kronendachniveau in der Parzelle A2 von Santa Fé de Antioquia bewertet. Die Genauigkeiten haben je nach verwendeten Softwarepaketen nicht sehr unterschiedliche Ergebnisse erbracht. So betragen die Differenzen im Vergleich zu stereoskopisch gemessenen Punkten allgemein weniger als 1 m. Diese Daten weisen eine normale Häufigkeitsverteilung mit Abweichungen (RMSE-Werten) von weniger als 3 m auf. Die Baumhöhe hat anscheinend keinen großen Einfluss auf die Höhengenaugigkeit der DOMs. Die Baumkronengestalt hat sich hingegen als bedeutsamerer Einflussfaktor erwiesen, wie in den größeren Fehlern bei den Höhenbestimmungen der Palmen zu sehen ist. Die Palmen zeigen im Gegensatz zu den anderen Bäumen kleinere nicht kompakte Baumkronen mit federförmig radialsymmetrisch angeordneten Blättern, die zu unsichereren Ergebnissen führen.

Die DGMs wurden aus den DOMs durch Filterungsverfahren abgeleitet. LPS, Ngate und Inpho wurden zu diesem Zweck genutzt. Zur Analyse wurde das Gelände in offene Weide mit verstreuten Bäumen und dicht bewaldete Oberflächen untergliedert. Es zeigte sich bei den Höhenmodellen eine Abhängigkeit von der Geländeneigung und der Bodenbedeckung. So war die Erzeugung von digitalen Geländemodellen in Gebieten mit geringer bis mäßiger Geländeneigung erfolgreicher als in hügeligen Gebieten. Im ersten Fall waren die Fehler unter 1,5 m für Ngate und Inpho, während diese auf 1,7 bis 5,3 m im zweiten Fall stiegen. Die Fehler in bewaldeten Gebieten waren zwei bis dreimal so groß wie bei offenen Oberflächen mit Einzelbaumbeständen.

Abschließend wurden die Baumhöhen analysiert. Diese errechnen sich als Differenz zwischen DOM und DGM. Als Referenz wurden die maximalen stereoskopischen Höhenmessungen der Bäume eingesetzt. Dieselben Softwarepakete wie bei der DGM-Generierung fanden hier Verwendung. Inpho zeigte die besten Ergebnisse in flachen Gebieten, während Ngate im welligen Areal am besten abschnitt. Allgemein hat sich gezeigt, dass der Fehler bei der Baumhöhenbestimmung umso höher ausfällt, je höher der Baum ist.

Kapitel 4

Erfassung von einzelnen Laubbaumindividuen und Palmen anhand digitaler Oberflächenmodelle und Orthophotomosaik

4.1 Einleitung

Die automatische Extraktion von Baumindividuen aus Luftbildern oder digitalen Oberflächenmodellen zu Baumkatasterzwecken ist heutzutage ein intensives Forschungsthema in der Forstwirtschaft und Fernerkundung. Dieser Prozess vereinfacht nicht nur die Bauminventur in Waldgebieten oder Städten, sondern es können auch nachfolgende wichtige Anwendungen darauf aufgebaut werden. Zu diesen gehören die Zählung von Baumindividuen, die Baumartenklassifizierungen (behandelt im Kapitel 5) und die indirekte Ableitung von anderen Forstparametern (z.B. Baumhöhe und Holzvolumen) aus Messungen des Kronendurchmessers.

Zahlreiche Algorithmen zur automatischen Baumkronenextraktion sind in den letzten Jahren entwickelt worden, angetrieben besonders durch die Erschließung von Aufnahmesensoren mit hohen Auflösungen und die verbesserte Rechenleistung neuer PCs. Die ersten Verfahren reichen auf die Arbeiten von GOUGEON (1995) und POLLOCK (1996)

zurück. Im Allgemeinen haben die meisten dieser Arbeiten unkompliziert strukturierte Wälder, einschließlich natürlicher Bestände oder Forste von Nadelwäldern sowie Obstplantagen behandelt, wo nur eine oder wenige Baumspesies auftreten. Die untersuchten Arten weisen typischerweise eine radialsymmetrische Kronenform mit einer auffälligen Spitze in der Nähe des Kronenschwerpunktes auf. Dabei wird der Baumspitzenbereich entweder spektral oder unter Bezug auf seine Höhe betrachtet. Viele Ansätze gehen daher davon aus, dass die Baumkronen nur ein einziges spektrales Maximum und eindeutige Kronengrenzen ohne Überlappung mit anderen Bäumen oder Abschattungen von Nachbarindividuen zeigen (BUNTING & LUCAS (2006)). Es fehlt dabei sicher zu stellen, ob die hierbei gewonnenen Algorithmen sinnvolle Verwendung auf die komplexen natürlichen insbesondere tropischen Wälder finden können, wo die Artenvielfalt weit höher ist, das Kronendach in der Regel mehrschichtig gestaffelt auftritt und die Kronenformen demzufolge überwiegend unregelmäßig sind (LECKIE ET AL. (2005)).

In diesem Kapitel soll nun der Versuch der automatischen Baumkronenabgrenzung für eines der bereits beschriebenen Untersuchungsgebiete durch die Kombination von in der Literatur (z.B. POULIOT ET AL. (2002), STRAUB (2003) und TIEDE & HOFFMAN (2006)) verfügbaren Algorithmen behandelt werden. Hierfür wird eine neue Algorithmen-Kombination auf der Basis von digitalen Kronenmodellen für das Gebiet La Concordia (Ecuador) vorgestellt, die sich für verschiedene Stichproben der Untersuchungen in Santa Fé de Antioquia als effizienter herausgestellt hat.

Dabei werden im Abschnitt 4.2 die Grundkonzepte der verwendeten Methoden, sowie einige in der Literatur dokumentierte Umsetzungen in Waldbeständen präsentiert. Anschließend werden im Abschnitt 4.3 die für die Anwendung in den Tropen weiterentwickelten Methoden ausführlich dargelegt, deren Ergebnisse im Abschnitt 4.4 vorgestellt und im Abschnitt 4.5 diskutiert.

Dabei wird auf die folgenden Fragestellungen eingegangen:

- Eignet sich die Kombination der spektralen Information aus Orthophotomosaiken und der Höhenangaben aus digitalen Kronenmodellen für Segmentierungsverfahren in verschiedenen Waldbestandstypen in den Tropen?.
- Welche Erfolgsquoten können durch die Einrichtung solche Verfahren für die Extraktion von Baumkronen in einem tropischen Gebiet mit verschiedenen Waldbestandstypen erreicht werden?.

4.2 Grundlagen der Baumkronen-Segmentierung und Erkennung von Baumindividuen

In den folgenden Abschnitten werden die Konzepte, Definitionen und Grundzüge der Methoden erläutert, welche im Rahmen dieser Arbeit als Grundlagen für den Aufbau einer Vorgehensweise für die Segmentierung der Baumkronen und die Identifizierung von Baumindividuen, wie im Abschnitt 4.2.1 dargelegt wird, dienen. Die meisten der hier verwendeten Methode haben ihren Ursprung in der Theorie der Bildverarbeitung, welche sich mit der Extraktion von Information aus digitalen Bildern befasst. Darüber hinaus werden einige der bereits publizierten Untersuchungen zur Baumextraktion vorgestellt (siehe Abschnitt 4.2.3).

4.2.1 Bildsegmentierung

Bei der Bildsegmentierung wird versucht, das Bild in verschiedene homogene Areale einzuteilen, welche gemeinsame Eigenschaften besitzen. Im Allgemein gibt es Ansätze zur Segmentierung, die auf Pixelwerten, Kanten und Regionen beruhen. Während pixelbasierte Methoden nur die Grauwerte der einzelnen Pixel benutzen (JÄHNE (2002, S.449)), bestimmen Kriterien der Diskontinuität oder Homogenität der Pixelwerte die Vorgehensweise der anderen zwei Methoden (SOILLE (2003)). Eine viel verwendete pixelbezogene Methode ist das Schwellwert-Verfahren. Kantenbasierte Techniken suchen nach markanten Variationen in den Pixelwerten, die als Linien oder Objektkanten auftreten. Regionenbasierte Methoden versuchen hingegen, die Pixel in homogenen Bereichen (mit ähnlichen Eigenschaften) zu verschmelzen. Unter diesen Methoden finden sich Algorithmen zum Regionenwachstum (engl. *Region Growing*), Regionensplitting (engl. *Split-and-Merge*) und Clustering (CHENG ET AL. (2001)).

Bei der Segmentierung eines Bildes sollte in der Regel a priori Wissen über die Eigenschaften der gesuchten Objekte bestehen. Beispiele dafür sind die Form, Größe, Orientierung, Textur und Grauwertverteilung. Allerdings ist es manchmal nicht einfach, eine klare Definition dieser Objekte wegen Änderungen der Beleuchtung, Auflösung, Aufnahmewinkel, des Rauschniveaus usw. festzulegen (SOILLE (2003)).

Einige der oben aufgeführten Methoden, die in dieser Arbeit Verwendung fanden, wer-

den wie folgt kurz vorgestellt.

Schwellenwerte

Diese Methode ist eine der elementarsten Techniken zur Bildsegmentierung. Dabei werden im einfachsten Fall alle Pixel über den ausgewählten Schwellwert einer Objektklasse (normalerweise dem Vordergrund oder “Eins” in Binärbetrachtung) und alle anderen einer zweiten Klasse (dem Hintergrund oder der “Null”) zugeordnet. Als wichtige Herausforderung steht die Ermittlung eines optimalen Schwellenwerts, der häufig auf Basis des Bildhistogramms oder einfach von “Versuch und Irrtum” (Try and Error)-Proben bestimmt wird (PHILLIPS (2000, S.103)). Probleme treten u. a. auf, wenn es starkes Rauschen gibt oder wenn sich die Grauwerte des Objektes und ihrer Nachbarn über einen breiten Spektralbereich erstrecken (PRATT (2001, S.552)).

Regionenwachstums (Region Growing)- Algorithmen

Das Wachstumsverfahren ist eine der sogenannten “bottom-up” Methoden zur Bildsegmentierung. Das bedeutet, dass das Wachstum von einzelnen Pixeln ausgeht und schrittweise durch ihre Gruppierungen in größere Einheiten erfolgt (siehe Abbildung 4.1). Zunächst wird eine Anfangsregion oder ein Startpunkt ausgewählt, dem anschließend ein iterativer Vergleich mit all ihren/seinen Nachbarn mit Hilfe von Ähnlichkeitsmaßen (z.B. Mittelwert eines Farbkanals) folgt. Bei Homogenität wird eine Ausdehnung der Anfangsregionen auf diese Nachbarpixel durchgeführt (CHENG ET AL. (2001), SOILLE (2003)). Dieser Prozess wiederholt sich mehrmals bis die Regionsgrenzen im Normalfall zusammenstoßen. Eine Schwäche dieses Verfahrens ist ihre Abhängigkeit von der Festlegung der Anfangsregion und der Reihenfolge bei der Analyse der benachbarten Pixelkandidaten (CHENG ET AL. (2001)).

Regionsplitting

Die Split-and-Merge Methode beruht auf Verfahren für Bildzerlegung und Fusionierung der Bildregionen (siehe Abbildung 4.2). Hier wird von einem “top-down”-Vorgang ge-

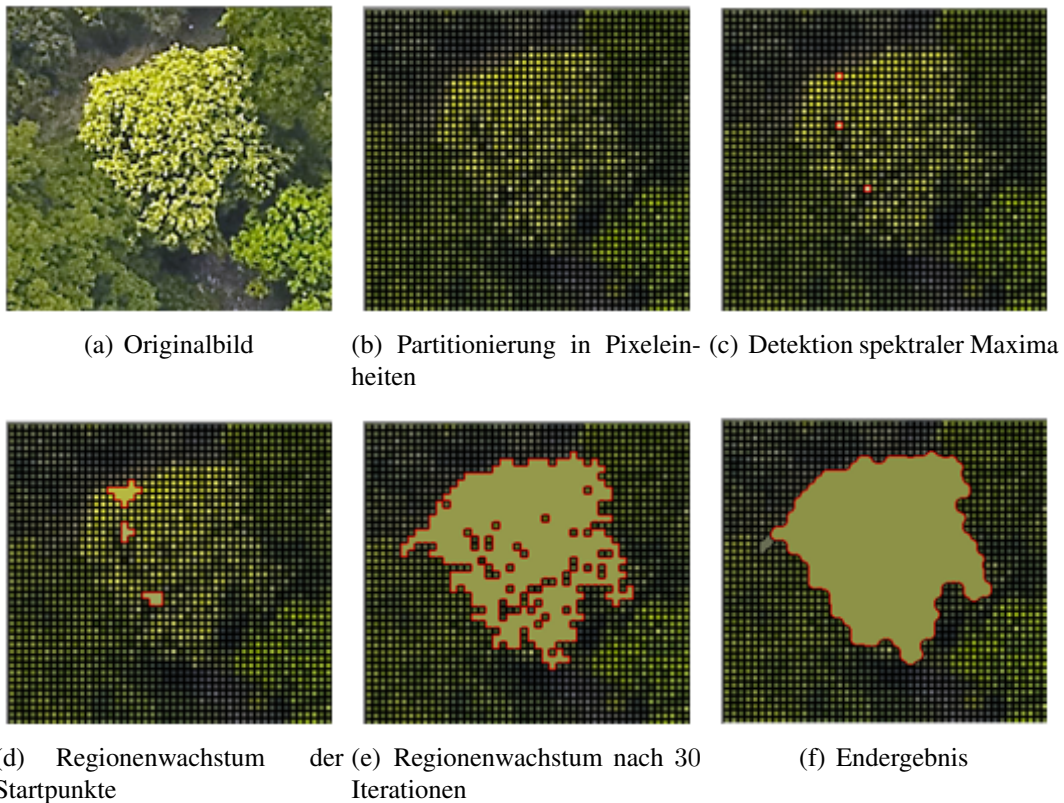


Abbildung 4.1: Beispiel eines Regionenwachstumsverfahrens in einem bewaldeten Gebiet. (a) Originalbild; (b) Partitionierung in Pixeleinheiten; (c) Detektion spektraler Maxima (Startpunkte, in Rot); (d) Regionenwachstum der Startpunkte auf Basis spektralen Unterschieden zwischen Nachbarpixeln, nach zwei Iterationen; (e) Regionenwachstum nach 30 Iterationen; (f) Endergebnis nach Auffüllung der Lücken und Verfeinerung der Baumkontur. Eigene Darstellung mit Hilfe vom Definiens Developer.

sprochen, da die Segmentierung in der Regel mit dem ganzen Bild anfängt. Als Homogenitätskriterien für die Zerlegung verwendet das Verfahren in der Regel Bildhistogramme, Farben oder andere lokale statistische Eigenschaften.

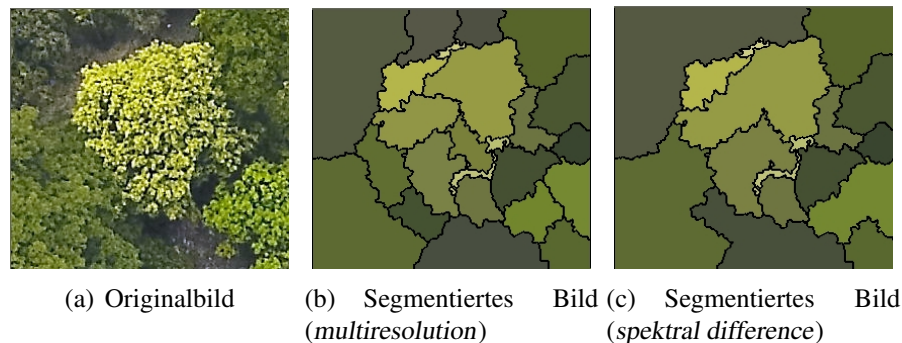


Abbildung 4.2: Beispiel eines Regionsplittings in einem bewaldeten Gebiet. Links ist das Originalbild. In der Mitte steht das segmentierte Bild nach erster Partitionierung (“multiresolution segmentation”-Funktion). Rechts ist das Bild nach Verschmelzen einiger Regionen mit ähnlichen spektralen Eigenschaften (“spektral difference segmentation”-Funktion). Eigene Darstellung mit Hilfe vom Definiens Developer.

Nach jedem Iterationszyklus wird jede Region mit ihren Nachbarn verglichen und, im Falle starker Gemeinsamkeit, werden diese zusammengefügt. Als Nachteil dieser Methode können kleine Unterregionen innerhalb großer homogener Bereiche nicht berücksichtigt werden (RUSS (2007, S.437)).

4.2.2 Bestimmung lokaler Maxima

Die Regionenwachstums-Verfahren und andere Algorithmen zur Objektidentifizierung basieren auf der Festlegung geeigneter Pixelmaxima im Bild. Als lokales Maximum können ein einziges Pixel oder eine Gruppe von verbundenen Pixeln mit ähnlichen Werten, deren Höhe gegenüber den Nachbarpixeln markant größer ist, bezeichnet werden (SOILLE (2003, S.201)). Bei der Baumbestimmung sollte dieses Maximum bestens dem Höhenmaximum in DKMs oder dem Schwerpunkt der Baumkrone in Luftphotographien entsprechen.

Zur Detektion von Maxima werden mehrere Techniken in der Literatur erwähnt, zu ihnen zählen die bewegten Fenster, 4 oder 8-Nachbarschaft-Bewertung, Hochpassfilter, der “Converging-Squares”-Algorithmus, lokale Schwellenwerte, die morphologische Filterung durch Zylinderhut-Operatoren (SOILLE (2003, S.121)) und der Kreiszyylinder (AURICH (2008)).

4.2.3 Detektion und Extraktion der Baumkrone

Die Detektion und Extraktion der Baumkrone sind einige der Forschungsbereiche in der Forstwirtschaft, die in den letzten Jahren eine bemerkenswerte Entwicklung erfahren haben. Wenn nur die Position eines Baumindividuums (normalerweise durch ihren Schwerpunkt) festgelegt wird, handelt es sich um die Kronendetektion. Überdies wird in vielen Fällen zusätzlich eine Abgrenzung der Baumkronen beabsichtigt, was dann zu einer Extraktion der Baumkronen führt.

Als Basis für die Ansätze zur automatischen Baumkronenextraktion werden drei Datenquellentypen verwendet, nämlich hochauflösende Luftbilddaufnahmen/Satellitenaufnahmen, digitale Oberflächenmodelle (DOM)/Kronenmodelle (DKM) und 3D-Höhenpunkte. Die erste Gruppe benutzt spektrale Information aus digitalen Farbluftbildern, Satelliten wie IKONOS, Quickbird oder Orbview-3 und hyperspektralen Sensoren wie CASI, HYDICE und HYMAP. Die DOMs und 3D-Punkte werden aus Luftbildern oder, immer mehr, aus Lidar abgeleitet.

In der Literatur besteht eine erhebliche Vielfalt an Algorithmen und Strategien, die zur Abgrenzung der Baumkronen dienen. Da ein vollständiger Überblick demzufolge sehr umfassend wäre, werden hier nur einige der bedeutendsten Ansätze kurz erläutert. Die meisten der Methoden gehören zu einem oder mehreren der folgenden Anwendungsgebiete (POULIOT ET AL. (2002), BRANDTBERG & WARNER (2006)):

- Muster-Vergleich (Template Matching) auf Basis vom Pollock-Modell.
- Regionenwachstum aus lokalen Maxima.
- Netz von Minima.
- Berücksichtigung mehrerer Maßstabebenen.
- Segmentierung nach homogenen spektralen Regionen.
- Klassifizierung von 3D-Punkten.

Mehrere dieser Prinzipien wirken normalerweise in den verschiedenen Untersuchungen zusammen, wie in den nächsten Abschnitten zu sehen ist.

Muster-Vergleich POLLOCK (1996) führte ein mathematisches Modell zur Näherung der Baumkronenform in 3D ein. Dieses Baummodell benutzt ein Ellipsoid mit drei Parametern: Baumhöhe (a), Kronendurchmesser (b) und ein Formmerkmal (c).

$$\frac{z^n}{a^n} + \frac{(x^2 + y^2)^{\frac{n}{2}}}{b^n} = 1, \quad (4.1)$$

wobei x, y, z die Punktkoordinaten sind. In Abbildung 4.3 sind zwei Beispiele bei der Anwendung unterschiedlicher Parametrisierung zu sehen. Das Pollock-Modell wird meist zur Modellierung des Reflexionsverhaltens der Baumkronen mit Hilfe von Mustern (Templates) verwendet. Das Muster besteht aus der resultierenden Reflexion für jedes Bildelement der Baumkrone in Abhängigkeit von seiner Position im Bild. Durch eine hohe Kreuzkorrelation zwischen dem 2D Muster und dem Bild lassen sich Bäume detektieren. Basierend auf diesem Verfahren haben Autoren wie ERIKSON & OLOFSSON (2005), OLOFSSON & HAGNER (2006) und HEURICH (2006) in Nadelwäldern eigene Modelle entwickelt und Untersuchungen durchgeführt. Die Anwendung dieser Technik in Laubwaldbeständen hat aufgrund der ineinandergreifenden Kronen keine gute Ergebnisse ergeben (HEURICH (2006, S.120)).

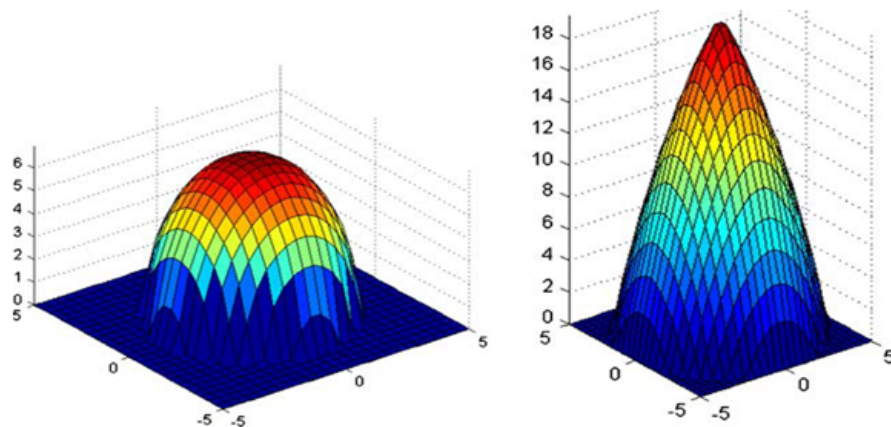


Abbildung 4.3: Pollock-Baummodelle. Links wird ein möglicher Laubbaum mit $a = 7$; $b = 3,5$ und $n = 2$ modelliert, während rechts ein Nadelbaum mit $a = 20$; $b = 5$ und $n = 1,2$ (Quelle: WOLF & HEIPKE (2007)).

Regionenwachstum aus lokalen Maxima Lokale Maxima sind sehr intensiv in unterschiedlichen Untersuchungen zur Baumlokalisierung genutzt worden, sowohl in Bilddaten als auch mit Höhendaten. Überdies werden sie häufig in den ersten Segmentierungsschritten der Methoden zur Abgrenzung von Baumkronen eingesetzt, insbesondere in Regionenwachstums-Verfahren (KOCH ET AL. (2009)). Die typische Konvexform eines Einzelbaumes bedeutet, dass der Baumgipfel in Luftbildern unter verschiedenen Be-

leuchtungsbedingungen mit höherer Wahrscheinlichkeit direkt angestrahlt wird als andere Teile der Krone und damit üblicherweise als spektrale Spitze auftritt (CULVENOR (2002)). Auch in geschlossenen Baumbeständen treten Baumzentren als relativ glänzende Bereiche im Vergleich zu den umgebenen dunkleren Flächenteilen in der Nähe der Kronenränder in Erscheinung (BRANDTBERG & WARNER (2006)).

Am häufigsten werden die Maxima durch ein bewegliches quadrat- oder kreisförmiges Fenster bestimmt. Diese Fenster können sich überlappen oder auch nicht. Als entscheidender Faktor fungiert daher die Größe des Operatorfensters, da mit großen Fenstern kleine Baumspitzen übersehen und mit sehr kleinen Fenstern mehrere falsche Spitzen identifiziert werden können (POULIOT ET AL. (2002)). Die Auswahlkriterien eines Maximums sind je nach Autor, Datensatz und Information unterschiedlich. Im einfachsten Fall wird, wie bei der Arbeit von PERSSON ET AL. (2002) und KOCH ET AL. (2006) mit Baumhöhendaten, ein Bildpunkt als Maximum bezeichnet, wenn seine 4-Nachbarpixel niedriger liegen. TIEDE & HOFFMAN (2006) wenden verschiedene Suchradien des Fensters je Waldtyp an: einen kleinen Radius für Nadelwälder und einen größeren für Laubwälder. Im Folgenden werden als Beispiel einige Methoden zusammenfassend vorgestellt, die auf dem Punktmaxima-Kriterium aufbauen.

POULIOT ET AL. (2002) stellen ein Verfahren für die Detektion und Extraktion von Kronen von 6-jährigen Bäumen in Farbinfrarot-Bildern auf Basis von lokalen spektralen Profilen dar, die von der gefundenen Position der Baumspitze als Radien abgetastet werden (siehe Abbildung 4.4). Die Forschung findet in kanadischen Nadelwäldern statt. Für die Detektion der Maxima werden nicht überlappende Fenster genutzt. Dieser Ansatz verwendet auf der Suche nach dem Kronenrand den maximalen Wert der Ableitung erster Ordnung (maximale Veränderung) entlang jedes Profils. Obwohl bis zu 360 Profile genutzt werden können, beläuft sich die Anzahl normalerweise auf 15 bis 20. Zur Beschränkung der Streckenlänge (Profillänge) auf der evaluierten Baumkrone wird ein Polynom 4. Grades schrittweise an das Profil angepasst bis ein Bestimmtheitsmaß (R^2) von mindestens 0,90 erreicht wird.

CULVENOR (2002) entwickelt den TIDA (engl. *Tree Identification and Delineation Algorithm*)-Algorithmus für die Baumidentifizierung und Extraktion der Eukalyptusbaumkronen in Bildern von den südöstlichen australischen Wäldern. Dieser Ansatz benutzt Verfahren zur Identifizierung von lokalen Maxima, lokalen Minima und der Gruppierung der Kronenpixel. Auf der Suche nach Maxima werden zunächst die hellsten Pixel lokalisiert. Die Suche erfolgt anhand linearer Strecken. Nur wenn ein Pixel in 3-4

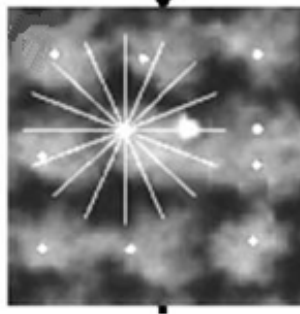


Abbildung 4.4: Abgetastete Radien aus einem lokalen Maximum (Baumspitze) für die Evaluierung von spektralen Profilen (Quelle: POULIOT ET AL. (2002)).

Suchrichtungen (zwei diagonal und zwei achsen-parallel) als Maximum auftritt, wird dies als ein mögliches Baumzentrum bezeichnet. Minima werden ähnlich gesucht, aber es reicht nur ein ‐Treffer‐ für ihre Bezeichnung als Minimum. Lücken zwischen Minima werden gefüllt, um ein Netz von Minima aufzubauen, welches nachher auf eine Breite von 1 Pixel ausgedünnt wird. Zur Baumkronen-Abgrenzung wird das ‐Saatpixel‐ (Maximum) bergab wachsen gelassen, bis es ein Netz von Minima oder eine andere Baumkrone findet oder einen Mindestschwellenwert unterschreitet.

KOCH ET AL. (2006) verwenden ein Regionenwachstumsverfahren (manchmal auch Pouring-Algorithm genannt) für die Extraktion von Kronen in Mooswald, Freiburg. Das Problem dabei ist, dass daraus normalerweise eine Übersegmentierung resultiert. Als Strategien zur Korrektur dieser Fehler werden folgenden Verfahren angewandt:

1. Zwei Baumklassen nach Baumhöhen (A: $\leq 20\text{m}$ und B: $> 20\text{m}$) werden aufgebaut.
2. Kleine Segmente (A: $< 1\text{m}^2$ und B: $< 3\text{m}^2$) werden mit ihren größeren umhüllenden Nachbarn verschmolzen.
3. Zwei benachbarte Segmente werden fusioniert, wenn sie eine Mindestdistanz (A: 1m und B: 2m) nicht aufweisen.
4. Nicht mehr als 4 Segmente können fusioniert werden.

Darüber hinaus werden Segmente mit über dem 2,5-fachen der Breite und dem 3-fachen der Größe der erlaubten Werte je Baumklasse als Baumgruppe bezeichnet. Für die Auflösung jeder Gruppe wird der größte innere anpassende Kreis gefunden und dieser von der Gruppe abgezogen. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die Mindestfläche

der Baumklasse unterschritten wird. Anschließend lässt man die resultierenden Kreise sich bis zu einer maximalen Höhendifferenz von 60 cm ausdehnen, oder ihre Grenzen sich berühren bzw. ihre Grenzen den Rand der ursprünglichen Gruppe erreichen. Die Kronenkontur wird durch ähnliche Suchvektoren (Radien) wie bei POULIOT ET AL. (2002) verfeinert, aber diesmal werden mehr Strahlen und als Stop-Kriterium wird das Übertreffen einer maximalen Neigung verwendet.

In TIEDE & HOFFMAN (2006) werden das Softwarepaket Ecognition (jetzt Definiens Developer) und Kronenhöhendaten (DKM) zur Kronenabgrenzung von Bäumen in Mischwäldern des Bavarian-Forest- Nationalparks eingesetzt. Zunächst wird das DKM in Objekte mit 1 Pixel-Größe aufgeteilt und die lokalen Maxima werden markiert. Ausgehend von den gefundenen Baumspitzen wird ein Regionenwachstum-Algorithmus genutzt. Das Wachstum wird durch die folgenden Kriterien begrenzt:

1. Das Verhältnis zwischen Pixelwert und Spitzenhöhe bleibt ($> 0,75$).
2. Es werden ein maximaler Radius von 10 m und ein minimaler Pixelwert von 5 m vorgegeben.

Zur Verfeinerung werden die inneren Objekt-Lücken durch die Funktion “find enclosed by” mit dem umgebenden Objekt fusioniert.

Netz von Minima Lokale Minima finden auch als Startpunkt für die Kronenextraktion Verwendung. In Analogie zu Reliefformen werden Minima-Bereiche oft Täler genannt (BRANDTBERG & WALTER (1998)). In Bildern bezwecken die auf Minima basierten Ansätze die beschatteten Bereiche am Kronenrand zu verfolgen. Die Anwendbarkeit dieser Methode ist nicht nur auf Nadelwälder beschränkt, sondern auch Laubbäume mit irregulären Kronen lassen sich so eingrenzen (OLOFSSON & HAGNER (2006)). Trotzdem neigen Baumkonturen in selektiv abgeholzten Wäldern oder in Waldbeständen mit mehreren Schichten dazu, sich mit projizierten Abschattungen von höheren Bäumen zu vermischen (POULIOT ET AL. (2002), BUNTING & LUCAS (2006)).

GOUGEON (1995) beschreibt die Anwendung von lokalen Minima/Tälern zur Kronenextraktion in kanadischen Nadelwäldern. Dabei wird in den Bildaufnahmen ein Netz von lokalen spektralen Minima markiert, das entlang der dunkleren Täler am Rande der Baumkronen verläuft. Die Täler enthalten die Pixel, deren Nachbarn höhere Werte

aufweisen. Die markierten Minima-Segmente werden anhand mehrerer Regeln so vervollständigt, dass eine geschlossene Umrandung der Bäume erzeugt wird.

In WARNER ET AL. (2006) werden die Schatten der Baumkronen zur Kronenabgrenzung in Mischwäldern von Virginia (USA) genutzt. So werden zunächst die gewünschten Schatten durch einen Schwellenwert markiert. Dann werden diese Linien durch einen Minimum-Kosten-Pfad-Algorithmus (eng. *minimum cost path*) verbunden, um eine kontinuierliche Kronengrenze zu erzeugen. Die Ergebnisse waren jedoch nicht sehr gut, da nur 28% der Baumkronen korrekt abgegrenzt werden konnten.

Berücksichtigung mehrerer Maßstabebenen Mit hoch aufgelöster Information ist eine Glättung der Daten in der Regel empfehlenswert. Insbesondere mit Bilddaten tritt eine große spektrale Varianz innerhalb der Krone wegen Ästen und Schattierungseffekten auf (POULIOT ET AL. (2002)). Die Glättung reduziert die räumliche und spektrale Auflösung und Varianz der Daten und daher diese Effekte. Ihre Wirkung zeigt sich ebenfalls, indem weniger Pseudo-Bäume identifiziert werden (PERSSON ET AL. (2002)) sowie Kronenunregelmäßigkeiten innerhalb des Kronendachs und deren Kanteneffekt verringert werden (KOCH ET AL. (2006)). Glättungsverfahren verwischen allerdings die Kronenränder und erschweren ihre genaue Identifizierung. Um mit dieser Schwierigkeit umzugehen, haben Autoren wie BRANDTBERG & WALTER (1998), PERSSON ET AL. (2002) und STRAUB (2003) das Konzept der Multi-Maßstabs-Repräsentation in ihre Modelle eingebunden, damit die diversen Baumkronen-Größen und Formen bestmöglich erfasst werden. Diese verschiedenen Maßstabebenen stammen in der Regel aus der Anwendung von mehreren Glättungsintensitäten an den Datensätzen (siehe Abbildung 4.5). Als Glättungsfunktion wird üblicherweise die Gaußglocke verwendet. Die daraus abgeleiteten Informationen (z.B. Punkte oder Objekte) werden durch Funktionen oder Regeln verglichen und aggregiert, damit am Ende aus mehreren Hypothesen einer Baumidentifizierung die optimale Auswahl getroffen wird.

Der Ansatz von BRANDTBERG & WALTER (1998) basiert beispielweise auf der Extraktion von Kanten aus der Intensitätskomponente des Farbinfrarotbildes und der Berechnung der Krümmung für die Kantenpixel. Für die mit konvexer Krümmung über mehrere Maßstabebenen akkumulierten Kantensegmente wird der Radius eines inneren Kreises ermittelt. Dadurch entstehen Krümmungszentren in jedem Maßstab, die idealerweise nahe der Mitte der Baumkrone liegen. Die Kronengrenzen werden durch ein Regionenwachstums-Verfahren aus den Kronenmittelpunkten definiert.

STRAUB (2003) glättet schrittweise das DOM, um verschiedene Maßstäbe zu erhalten. Zur Begrenzung der Kronen werden die durch Einsatz eines Laplace-Differenzialoperators (Ableitung zweiter Ordnung/Krümmung des DOMs) bestimmten Kanten einbezogen. Anschließend wird die Wasserscheidentransformation (für eine Definition siehe z.B. STRAUB (2003, S.18)) zur Segmentierung angewandt. Basierend auf verschiedenen Zugehörigkeitsfunktionen (auf den Merkmalen: Größe, Konvexität, Kreisförmigkeit und Vitalität der Krone) und topologischen Relationen (Übergangsbeziehungen) der in unterschiedlichen Maßstabsebenen extrahierten Segmente werden die hypothetischen Bäume bewertend verglichen.

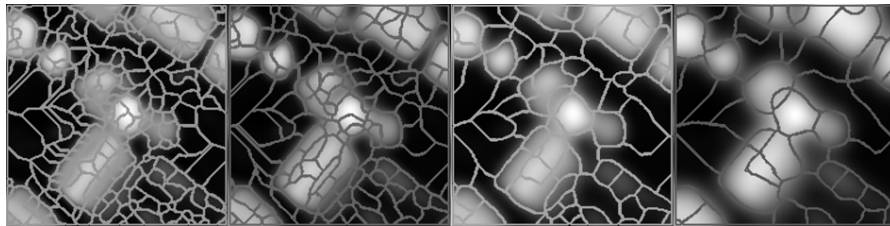


Abbildung 4.5: Segmentierung eines DOMs in vier Maßstabsebenen (Glättungsgrade) (Quelle: STRAUB (2003, S.55)).

Segmentierung nach homogenen spektralen Regionen Die Grundidee dieses Typs von Modellen ist die Nutzung der erwarteten spektralen Homogenität innerhalb der Kronen-Pixelregionen eines Baumindividuums zur Bildsegmentierung. Hierfür werden Methoden wie **Schwellenwerte-**, **Regionenwachstum-**, **Regionsplitting-** sowie **Klassifizierungsverfahren** (in Abschnitt 5.2.2) verwendet. Die Arbeitseinheiten sind in der Regel die Segmente bzw. Objekte anstatt der Pixel. Ein typisches Beispiel ist die Arbeit von HEURICH (2006) mittels des Programms Ecognition (und seinem dort aufgebauten Fractal-Net-Evolution Algorithmus) und RGB-Infrarot-Bildern bayerischer Wälder in Deutschland. Dabei wurden die besten Ergebnisse für die Kronendächer der Laubwälder mit einer Trefferquote von 84,3% erzielt. Insgesamt waren die detektierten Kronen zu klein im Vergleich zu den tatsächlichen Kronen. Dies lag an der großen Heterogenität der spektralen Verhältnisse von Beleuchtung und Laub, was eine Trennung zwischen zwei Baumindividuen erschwert. Die Arbeit von BUNTING & LUCAS (2006), die weiter unten erläutert wird, gehört ebenfalls zu dieser Kategorie.

Klassifizierung von 3D-Punkten Eine große Anzahl der zur Baumextraktion eingesetzten Algorithmen stützt sich auf zwei-dimensionale DOMs (REITBERGER ET AL. (2008)). Damit sind die "unsichtbaren" Bäume der unteren Schichten allerdings kaum erfassbar. Die 3D-Modellierung von LIDAR-Punkten ermöglicht je nach Waldschlussgrad, Punktdichte (WANG ET AL. (2008)) und anderen Bedingungen (siehe Abschnitt

5.2.2) die Erkennung der Bäume der mittleren und unteren Schichten des Waldbestands. Diese relativ neue Tendenz in der Extraktion der Baumkronen baut auf die Modellierung der Baumindividuen aus Höhenpunkten (siehe Abbildung 4.6) und der darauf bezogenen Ableitung von 3D-Formparametern (z.B. Baumhöhe, Verteilung der Baumhöhe, Verteilung der Kronendurchmesser und Kronenvolumen) auf.

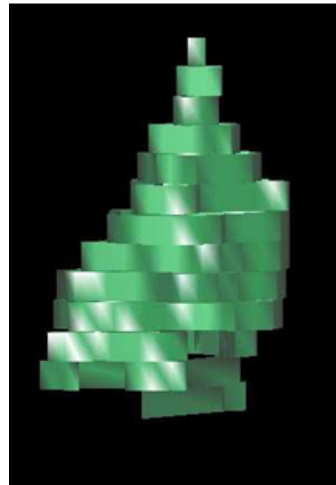


Abbildung 4.6: 3D-Modellierung eines Baumes aus Lidar-Höhendaten durch VRML (*Virtual Reality Modelling Language*) (Quelle: WANG ET AL. (2008)).

Beispiele für die Anwendung dieser Art von Ansätzen finden sich in REITBERGER ET AL. (2008), WANG ET AL. (2008) und KOCH ET AL. (2009) für Laub- und Nadelwälder Deutschlands und Polens.

Andere benutzte Algorithmen, die sich sehr schwer in eine Kategorie einordnen lassen, umfassen: Aktive-Konturen (STRAUB (2003), HORVÁTH ET AL. (2009)), Brownscher Bewegung (engl. *Brown Motion*; ERIKSON (2004)); Fuzzy-Regeln und Krümmungen (ERIKSON (2004)), Randon Walks (ERIKSON (2004), ERIKSON & OLOFSSON (2005)).

Anwendungen in den Tropen Anders als in den gemäßigten Regionen der Erde sind die Studien über die automatische Kronenabgrenzung in den tropischen Gebieten eher selten. Im Folgenden werden die Hauptaspekte der bisher bekannten Untersuchungen vorgestellt.

ERIKSON (2004) entwickelt die Methode der “Random Walks” und wendet sie auf RGB-Luftbilder eines tropischen Regenwalds in Ecuador (Estación de Biodiversidad Tiputini) an. Es handelt sich um ein Regionenwachstums-Verfahren mit Verwendung

von Zufallsvektoren. Hier werden zunächst die Kronen mit Hilfe von Schwellenwerten getrennt. Durch eine Distanz-Transformation (Pixelabstand zu Schattenbereichen) werden die "Saatpunkte" (Schwerpunkte) für jede Krone als die Maxima im Distanzbild bestimmt. Ausgehend vom "Saatpunkt" werden gleichverteilte Zufallsvektoren generiert, so dann mit einer Funktion des Grauwertes des Zielpixels gewichtet und abschließend addiert. Nach Millionen Wiederholungen wird gezählt, wie viel Mal ein Pixel getroffen wird. Die Segmentierung erfolgt durch Schwellenwerte und ein Expansions-Verfahren. Die Ergebnisse wurden nur graphisch präsentiert (siehe Abbildung 4.7).

DISPERATI & OLIVEIRA (2005) arbeiten mit Schwellenwerten auf RGB-Fotos (GSD von 8 cm) in Araucaria-Baumbeständen in Brasilien. Die Grundidee ist zwischen den Bäumen eine Trennung anhand der Schattierungen zu schaffen. Die Ergebnisse waren nicht befriedigend.

In den australischen trockenen Mischwäldern von Queensland benutzen BUNTING & LUCAS (2006) die Software Ecognition zur Kronentrennung in multispektralen Bilddaten. Dabei wird von einer Trennung des Waldes vom Hintergrund und einer Segmentierung des Waldbestandes (multiresolution segmentation) ausgegangen. Anschließend wird der Waldbestand in vier spektrale und strukturelle Klassen gegliedert. Somit wird für jede Gruppe eine bestimmte Parametrisierung eingesetzt. Maxima, die durch Schwellenwerte gefunden werden, dehnen sich in benachbarte Pixel aus bis die Grauwertdifferenz zwischen Maximum und bewerteten Pixel einen vorgegebenen Wert erreicht hat. Kleine Segmente werden mit Nachbarpixeln verschmolzen. Gruppen von Bäumen werden identifiziert, indem Schwellenwerte analysierter Parameter (Fläche, Ellipsoid-Formen, Rundheit, spektrale Merkmale, usw.) übertroffen werden. Die Auflösung der Gruppen wird iterativ durchgeführt, indem das Maximum in jeder Gruppe lokalisiert und ihre Ausdehnung bis zum einen Schwellenwert zugelassen wird. Der Prozess wiederholt sich für das nächste Maximum mit einem abnehmenden Schwellenwert und so weiter. Strategien sind auch für die Gruppierung kleinerer benachbarter Segmente vorgesehen. Dieses Verfahren konnte zwischen 24,2 und 51,4% der Bäume mit Stammdurchmesser größer als 10 cm richtig abgrenzen.

IKONOS-Bilder von 1 m-Auflösung werden von PALACE ET AL. (2008) verwendet, um die Struktur des Kronendaches im amazonischen Regenwald Brasiliens zu analysieren. Sie greifen auf die von POULIOT ET AL. (2002) und KOCH ET AL. (2006) entwickelten Methoden, unter Verwendung von 365- Suchvektoren je "Saatpunkt", für die Kronenabgrenzung zurück. Letztendlich wird die Kronenform durch einen Kreis ge-

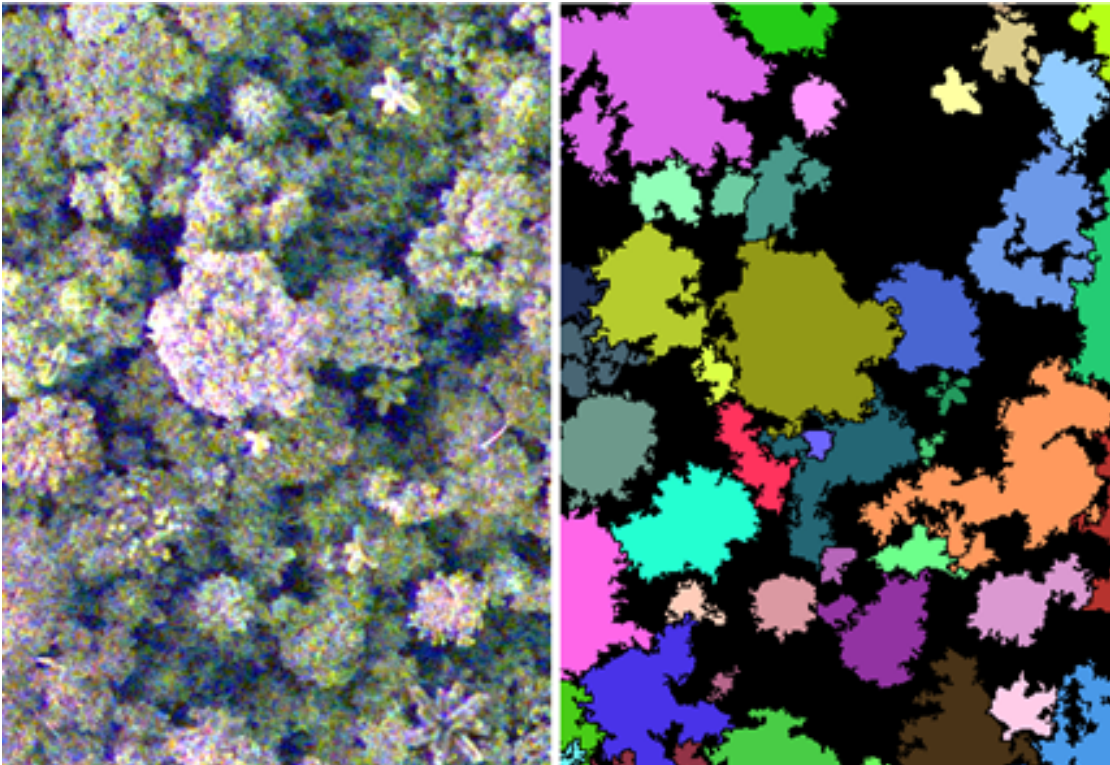


Abbildung 4.7: Kronenabgrenzung anhand des “Random Walks”-Verfahrens in einem Regenwald in Ecuador (Quelle: ERIKSON (2004)).

neralisiert, dessen Radius dem mittleren Wert der zwei größten Suchvektoren entspricht. Daraus wird als Parameter der mittlere Kronendurchmesser extrahiert und bewertet. Abweichungen zu Felddaten erreichen 3%.

BISCHOF (2009) versucht eine Zählung der Individuen der Ölpalme (*Elaeis guineensis*) mit Hilfe der Software Definiens Developer in Indonesien. Als Basis dient ein DKM. Eine Reduktion der Auflösung (von 0,12 bis 1,2 m), Hochpass-Filterung (mit Laplace-Operator) sowie die morphologische Operation “Erosion” finden hierfür Verwendung. Die korrekte Erfassung der Palmindividuen erreichte 95%.

4.3 Methodisches Vorgehen

In diesem Abschnitt werden die Vorgehensweisen für die automatische Extraktion der Baumkronen in einem natürlichen tropischen Waldbestand (Santa Fé de Antioquia, Kolumbien) sowie in einer Ölpalmlantage (La Concordia, Ecuador) beschrieben.

4.3.1 Verfügbare Datengrundlagen

Als Basis für die Modelle dienten die in dem vorangegangenen Kapitel (vgl. Kapitel 3) dargelegten digitalen Kronenmodelle (DKM) und Orthophotomosaik. Aus den Untersuchungsgebieten von Santa Fé de Antioquia und La Concordia wurden jeweils 1 (100 x 100 m) und 2 (200 x 200 m) Subparzellen extrahiert, die zum Aufbau des Modells und zur Bewertung der Ergebnisse Verwendung fanden. Die gesamte Fläche der Parzellen bzw. des Untersuchungsgebiets wurde nicht eingesetzt, weil der hohe Rechenaufwand wiederholt zum Absturz der Programme führte.

Das DKM-Raster wurde aus der Differenz zwischen automatisch mit dem Programm Inpho abgeleitetem DSM und manuell gemessenem DGM berechnet. Die GSD erreicht ca. 30 cm.

Der Kern des Algorithmus wurde in die Software Definiens Developer, auch bekannt als Ecognition, implementiert. Ecognition wendet die Grundlagen der Objekt-basierte Bildanalyse (OBIA, engl. *Object-based image analysis*) an. Das OBIA-Modell bietet einen methodischen Rahmen für die Analyse von hochauflösenden Bildern durch die Interpretation von Objekten und Klassen, die anhand spektraler, räumlicher, struktureller und hierarchischer Eigenschaften definiert werden. In der OBIA sind die Objekte das zentrale Element der Untersuchung, welche aus der Gruppierung von Pixeln mit ähnlichen spektralen und räumlichen Eigenschaften entstehen (NAVULUR (2007)). Dieses Softwarepaket ist bereits erfolgreich in der Kronenbaumabgrenzung in unterschiedlichen Waldgebieten eingesetzt worden: beispielweise TIEDE & HOFFMAN (2006), BUNTING & LUCAS (2006) und HEURICH (2006). Bei der Aufbereitung der Daten wurden auch die Programme ArcGIS und GRASS und Bibliotheken in C eingesetzt (AURICH (2008)).

4.3.2 Methode

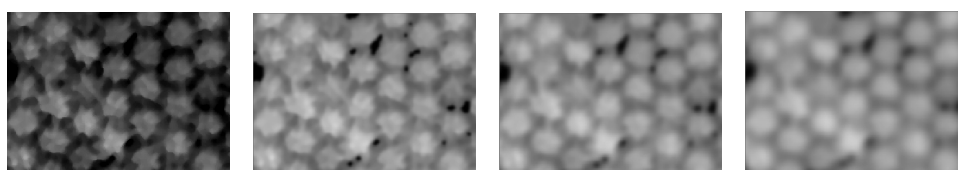
Bei der entwickelten Methode zur Kronenabgrenzung handelt es sich um ein Modell, dass Regionenwachstumsverfahren in unterschiedlichen Maßstabebenen schrittweise anwendet. Es fängt mit der Baumabgrenzung im größten Maßstab (geringe Auflösung) an und arbeitet sich mit abnehmendem Maßstab (höhere Auflösung) vor. Diese Methode baut auf den folgenden Schritten, mit kleinen Unterschieden für jedes Gebiet, auf:

A. Erstellung der Grundinformation: Drei Typen von Informationen unterstützten die Modellierung der Kronen:

1. Geglättete DKMs.
2. Höhenminima-Netze.
3. Maximale Höhenwerte.

Diese wurden wie folgt hergestellt:

Zu 1. Glättung des DKMs mit drei Intensitäten anhand eines Gaußfilters mit Sigma σ von jeweils 1, 2 und 3 Pixeln (DKM1, DKM2 und DKM3). Das Ziel war hier, drei Maßstabebenen der Höhenmodelle zu generieren (siehe Abbildung 4.8).



(a) Originales DKM (b) $\sigma = 1$ (DKM1) (c) $\sigma = 2$ (DKM2) (d) $\sigma = 3$ (DKM3)

Abbildung 4.8: Effekte verschiedenen Glättungsgraden (Radius/Sigma σ) anhand von Gaußfiltern auf ein DKM einer Ölpalmpflantage (Eigene Darstellung).

Zu 2. Aufbau eines Minima-Netzes aus dem DKM3 mittels der Funktion “minimum curvature” (minic) des Programms GRASS, das die Krümmung senkrecht zur Richtung der maximalen Krümmung berechnet. Diese Funktion basiert auf der Arbeit von WOOD (1996). Die Größe des verwendeten Bearbeitungsfensters war 9x9 Pixel. Anschließend wurde ein Schwellenwert (zwischen -1 und -0.5 je nach Waldtyp) zur Markierung der kleinsten Werte des Minima-Netzes eingesetzt. Da das binäre in einigen Strecken

nicht geschlossen war, wurde der Dilations-Algorithmus zu ihrer Ausdehnung verwendet. Dieser morphologische Operator basiert auf Maximum-Operationen und arbeitet hier mit kreisförmigen Strukturelementen auf Binärbildern (mehr in SOILLE (2003, S.65)). Die Regionen/Linien wurden durch einen Skelettierungs-Algorithmus ausgedünnt. Das heißt, dass die Breite der Linien auf 1 Pixel reduziert wird. Der Vorgang wird in Abbildung 4.9 dargestellt. Letztendlich wurde dieses Raster mit dem Programm ArcGIS in Vektor-Polygone umgewandelt.

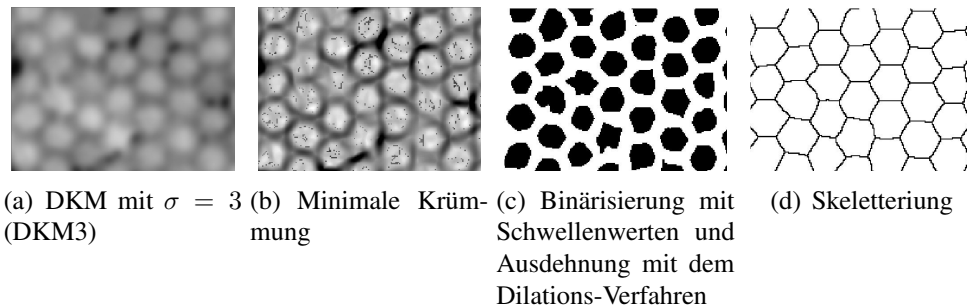


Abbildung 4.9: Aufbau eines Minima-Netzes auf Basis der Funktion Minimum-Krümmung von GRASS, Schwellenwerte- und Skelettierungs-Verfahren (Eigene Darstellung).

Zu 3. Maxima-Berechnung. Maximale Höhenwerte wurden innerhalb einer 8-Nachbarschaft jeweils in DKM1, DKM2 und DKM3 berechnet. Das bedeutet, dass ein Pixel als Maximum bezeichnet wird, wenn seine unmittelbaren Nachbarpixel in alle Richtungen kleinere Werte aufweisen. Die sich ergebenden Layer wurden MAX1, MAX2 und MAX3 genannt.

B. Trennung der Klassen: Baumbestände, Hintergrund und andere Objekte in Definiens Developer Der Hintergrund und Objekte wie Häuser wurden von den Baumbeständen nach zwei Merkmalen getrennt. Einerseits wurden Pixelwerte vom DKM kleiner als 3 Meter als Hintergrund gekennzeichnet. Auf der anderen Seite wurde der Blau-Kanal mit einem variablen Schwellenwert je Parzelle genutzt, um andere Objekte abzutrennen. In Abbildung 4.10 wird das Ergebnis dieses Vorgangs für eine Parzelle in einer Palmenplantage wiedergegeben

C. Segmentierung In Definiens Developer wurde der Algorithmus “Multiresolution-Segmentation” zur Segmentierung der originalen Szene verwendet. Dabei war das Ziel die Polygone der Skelettierung und die Maxima der größten Auflösung (MAX3) als Objekte zu definieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.11 zu sehen.



Abbildung 4.10: Trennung der Baumbestände von Hintergrund und anderen Objekten.

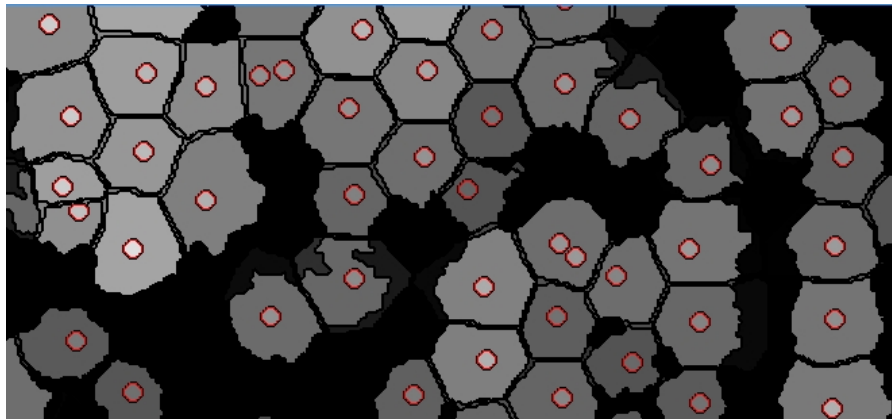


Abbildung 4.11: Segmentierung des Datensatzes in Skelettierungs-Polygonen und Maxima.

D. Gliederung der Baumbestände Die Baumbestände wurden in zwei Kategorien gegliedert, je nachdem wie viele Maxima (MAX3) sich innerhalb jedes Polygons finden:

Einzelne Bäume: wenn ein Maximum oder zwei dicht zusammenliegende Maxima (Abstand zwischen den Zentren der Maxima kleiner als 4,5 m) je Polygon auftreten.

Baumgruppen: wenn mehr als zwei nicht dicht zusammenliegende Maxima (Abstand zwischen den Zentren der Maxima größer als 4,5 m) je Polygon auftreten.

E. Regionenwachstum der Maxima von der Klasse "einzelne Bäume" Das Wachstum der maximalen Werte in niedrigeren Nachbarpixeln wurde schrittweise in Definiens Developer umgesetzt. Zuerst wurden die einzelnen Bäume und dann die Baumgruppen analysiert. Die größte Baumkrone wurde zunächst bewertet und dann mit abnehmender Größe die restlichen Kronen.

Obwohl die im Abschnitt A beschriebenen DKMs (DKM1, DKM2 und DKM3) als Basis für das Wachstum dienten, wurde auch der Grün-Kanal des Orthophotomosaiks

für die Palmölplantage als Kriterium verwendet. Im ersten Schritt wurde der MAX3 der größten Baumkrone auf das DKM3 ausgedehnt. Die Ausbreitung der Region wurde durch eine der folgenden Kriterien abgebrochen:

- Die Differenz zwischen dem Randpixel des Maximum (MAX3)-Objektes und des evaluierten DKM3-Pixel überschreitet den Wert $-0,2$ m. Das bedeutet, dass ab diesem Pixel die Höhen des DKMs anfangen wieder anzuwachsen.
- Das Verhältnis zwischen Pixelhöhe des evaluierten Pixel und Maximum-Pixelhöhe des MAX3-Objektes wird kleiner als 0,5. Dieses Kriterium wurde von TIEDE & HOFFMAN (2006) übernommen.
- Der Grauwert des Grün-Kanals am evaluierten Pixel ist kleiner als 50 (Schatten zwischen Palmenblättern).
- Es wird eine maximale Objektbreite (MAX3-Objekte) von 12 m in der Palmplantage und 25 m in den Wäldern erreicht.

Wenn das Maximum sein Wachstum beendet, wird es als Baum bezeichnet. Kleine Lücken können innerhalb der Baumkrone auftreten. Diese wurden mit dem umhüllenden Baum, mit dem sie die längste Grenze teilen, anhand der Funktion "Remove Objects" verschmolzen.

F. Separierung der Bäume innerhalb der Klasse "Baumgruppen" Nachdem alle "einzelnen Bäume" evaluiert sind, werden die Baumgruppen behandelt. Hier wird wieder das größte Segment (Gruppe) als Initialelement und dann allmählich die kleineren bewertet.

Jedes Maximum innerhalb der analysierten Gruppe wird gleichzeitig durch ein Regionenwachstumsverfahren ausgedehnt. Es werden hier die gleichen Bedingungen wie unter Punkt E benutzt. Wenn zwei Maxima sich treffen, bricht der Vorgang ebenfalls ab.

G. Maßstabebenen-Analysis Der Vorgang von C bis F wird für die MAX2 und danach für die MAX1 durchgeführt, damit neue Bäume aus diesen Maßstäben extrahiert werden können.

4.3.3 Bewertung des Verfahrens

Die Genauigkeit der Kronenabgrenzung wird durch das Schema von WARNER ET AL. (2006) bewertet, welches in der Abbildung 4.12 zu sehen ist. Außerdem werden die nicht erfassten Bäume gezählt.

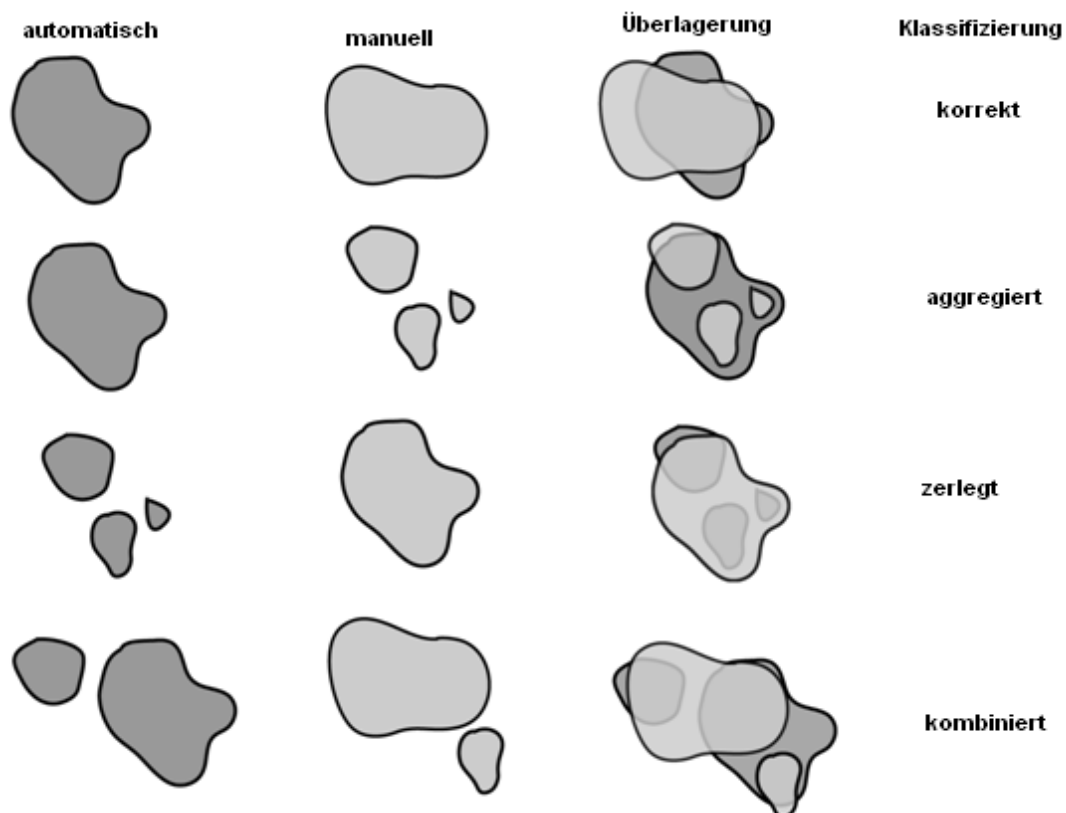


Abbildung 4.12: Schema zur Bewertung der Korrektheit der automatischen Abgrenzung von Baumkronen (Quelle: WARNER ET AL. (2006))

4.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Segmentierung der Baumkronen für die drei ausgewerteten Subparzellen sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Eine graphische Darstellung der Ergebnisse für die einzelnen Subparzellen befindet sich im Anhang E.

Bewertung der Kronen	SF1 (Santa Fé de Antioquia)	SPA1 (La Concordia)*	SPA2 (La Concordia)
Korrekt	34 (52, 3%)	445 (97%)	397 (92, 7%)
Aggregiert	1 (1, 5%)	0 (0%)	12 (2, 8%)
Zerlegt	4 (6, 2%)	7 (1, 5%)	5 (1, 2%)
Kombiniert	21 (32, 3%)	0 (0%)	0 (0%)
Nicht erfasst	5 (7, 7%)	7 (1, 5%)	14 (3, 3%)
Gesamt	65 (100%)	459 (100%)	428 (100%)

* Trainingsparzelle.

Tabelle 4.1: Kronenbaumabgrenzung für einen natürlichen Waldbestand (Santa Fé de Antioquia) und zwei Ölpalmlantagen (La Concordia) nach eigenen Verfahren (bewertet mit dem Warner-Schema (WARNER ET AL. (2006))).

Die besten Ergebnisse erhält man, wie erwartet, von den Ölbaumplantagen (La Concordia) mit einer mittleren Trefferquote von 94,8% (jeweils 97 und 92,7%), wobei die der Trainingsparzelle mit 97% naturgemäß am höchsten liegt. Die Parzelle von Santa Fé de Antioquia zeigt hingegen nur für die Hälfte der Bäume eine korrekte Segmentierung. Der vorwiegende Fehlertyp ist ebenfalls unterschiedlich. So ist der häufigste Fehler in den Plantagen die Nicht-Erfassung der Baumindividuen mit einem mittleren Wert von 2,4% (1,5 und 3,3%). Hauptgründe dafür sind, dass einige Baumindividuen nicht richtig bei der photogrammetrischen Modellierung erfasst wurden und andererseits in einigen Bereichen Ungenauigkeiten bei der Berechnung des digitalen Geländemodells auftraten (siehe Diskussion in Abschnitten 3.6.3 und 3.6.4). Die geringe überschneidende Aggregation mehrerer Individuen war ebenso mit nur 1,4% (0 und 2,8%) auffallend. Bei dem natürlichen Laubwaldbestand (Santa Fé de Antioquia) ist die Kombination von Baumindividuen mit 32,3% die häufigste Fehlerquelle, die bei Palmbeständen überhaupt nicht auftritt. Die Nicht-Erfassung ist mit 7,7% mit Abstand die zweithäufigste Fehlerquelle im Laubbaumbestand Santa Fés.

4.5 Diskussion der Ergebnisse

Die hier entwickelte Methode basiert hauptsächlich auf der Idee, dass Bäume eine dominierende maximale Höhe zeigen und durch Höhenminima getrennt sind. Dabei wurde das digitale Kronenmodell (DKM) als Grundlage benutzt. Konzepte wie das Erzeugen von Maßstabebenen durch verschiedene Glättungsgrade, das Auffinden von Minima entlang der Kronenränder und die Bestimmung der Höhenmaxima erwiesen sich als

wichtigste Differenzierungskriterien (siehe Abschnitt 4.2.3). Diese Konzepte sind nicht neu, aber ihre Kombination wurde in dieser Arbeit bestmöglich optimiert. So werden beispielsweise die Maßstabebenen von STRAUB (2003) als Kernkriterium für die Evaluierung von Baumhypothesen genutzt. In diesem Sinne erweist sich die Glättung auch in den behandelten Tropenbeispielen als sinnvoll, da die großen Bäume deutlicher in den groben Maßstäben (stark geglättet) extrahierbar sind, während die kleinen nur in den feineren Maßstäben (geringe Glättung) richtig erfasst werden können.

Die Minima-Netze zeigen im Rahmen dieser Arbeit einen großen Erfolg bei der Abgrenzung der Bäume in den Palmenplantagen. Bei der Parzelle in Santa Fé de Antioquia haben sie dazu beigetragen, eine Übersegmentierung der hervorragenden oder isolierten Bäume zu vermeiden. Sie können allerdings eine Segmentierung der nicht so kompakten Kronen hervorrufen. Die Höhenmaxima haben hier, wie bei zahlreichen Untersuchungen (z.B. TIEDE & HOFFMAN (2006)), die korrekte Steuerung der Methode zum Großteil bestimmt. Wenn ein einziges Maximum dem Schwerpunkt eines Baumes entspricht, wird der Baum in der Regel korrekt identifiziert. Obgleich dieses Maximum mit dem höchsten Punkt der Baumkrone bei bestimmten Arten von Nadelbäumen, Aufforstungen und Verjüngungen übereinstimmt, gilt dies normalerweise nicht für Laubbäume mit breiten und irregulären Kronen, bei denen mehrere Spitze oder eine einzige Spitze in der Nähe des Kronenrandes auftreten kann (LUCAS ET AL. (2008A)). In dem nicht geglätteten DKM einer Palme kann eine Baumspitze für jedes Blatt auftreten.

Die Ergebnisse dieses Kapitels weisen insbesondere die Schwierigkeiten bei der Kronenabgrenzung in natürlichen Waldbeständen, aber auch das gut nutzbare Potenzial der verwendeten Technik für Monokultur-Plantagen, auf. Dieser Aspekt konnte schon bei mehreren Untersuchungen, am besten in gemäßigten Breiten, aber auch in den Tropen, bestätigt werden. Die Tendenz zeigt, dass bei Baumbeständen mit homogenen, gleichaltrigen und weit auseinander entfernten Baumindividuen bessere Ergebnisse erreicht werden. Im Allgemeinen zeigen Nadelwälder auch höhere Trefferquoten als Laubwälder (HEURICH (2006), KOCH ET AL. (2006)). Die natürlichen Laubwälder und tropischen Wälder, mit ihrer Vielfalt an Kronenformen und -farben, stellen nach wie vor eine große Herausforderung für die automatische Segmentierung dar. In diesem Sinne ist es bisher schwierig sich ein Modell vorzustellen, das eine erfolgreiche universale Verwendung finden kann. Diese Arbeit ist keine Ausnahme. Wenn die für die Probenparzelle (Ölpalmenplantage) entwickelte Methode und die dort benutzten Parameter auf einen natürlichen Baumbestand übertragen werden, gehen die Erfolgsquoten deutlich von 97% auf 52% zurück.

Ein direkter Vergleich mit anderen Arbeiten ist allerdings schwierig. Nicht nur aufgrund der Unterschiede in den Eigenschaften der untersuchten Waldbestände, sondern auch aufgrund der unterschiedlichen Informationsdaten. Die räumliche Auflösung, Anzahl der nicht korrelierten Kanäle und Datenqualität spielen hierbei eine bedeutende Rolle. Eine größere (feinere) räumliche Auflösung beinhaltet mehr Details aber auch eine größere Variabilität. Während die Textur einer Baumkrone deutlicher in hoch aufgelösten Bildern in Erscheinung tritt, zeigen die Farben dabei sehr heterogene spektrale Information. Das führt dazu, dass man die Aufnahmen in der Regel glätten sollte. Versuche, in denen ausschließlich die Farbinformationen genutzt werden, haben bei Testversuche in dieser Arbeit inkorrekte und ungleichmäßige Ergebnisse erbracht, insbesondere mit den Palmen. Auf den gleichen Effekt weist BISCHOF (2009) bei seinen Untersuchungen der Palmplantagen in Indonesien hin. Sie hat sehr unterschiedliche Ursachen. Ihre zusätzliche Kombination mit der Höheninformation (aus DKMs) in dieser Arbeit hat allerdings einige Verbesserungen erbracht, obwohl sich die Umsetzung als schwierig herausstellte. Die Schatten zum Beispiel, die in anderen Arbeiten (z.B. CULVENOR (2002), ERIKSON & OLOFSSON (2005)) als entscheidende Parameter zur Kronenabgrenzung gelten, kommen hier nicht nur als partielle Rahmen eines Baumindividuums vor, sondern treten auch unregelmäßig innerhalb der Kronen, insbesondere in stark differenzierten Kronen, häufig auf. Außerdem können die Beleuchtungsbedingungen auf dem Orthophotomosaik von Bildteil zu Bildteil stark variieren, wie bei der Palmparzelle von La Concordia, wodurch die Parametrisierung nur für dieses untersuchte Gebiet optimal ist. Farbunterschiede zwischen den Individuen sind ebenfalls deutlicher in beleuchteten Kronenbereichen ausgeprägt als in den abgeschatteten Teilen am Rande der Kronen, wo eine spektrale Farbmischung von benachbarten Bäumen, Unterholz und Waldboden stattfindet, wie auch schon von (BUNTING & LUCAS (2006)) festgestellt wurde.

Neben der typischen RGB-Farbkombination tragen andere Kanäle weitere wichtige diskriminierende Information zur Kronenabgrenzung bei. Arbeiten von Autoren wie HEURICH (2006) betonen beispielweise die Wichtigkeit der Anwendung des Infrarot-Kanals in Luftbildern. Andere, wie BUNTING & LUCAS (2006), haben eine höhere Differenzierungs-Kapazität in der Kombination von Indexen von Nahinfrarot- und anderen Kanälen aus dem CASI-Multispektral-Sensor beschrieben. Diese Möglichkeit stand hier nicht zur Verfügung.

Bei der Verwendung von digitalen Kronenmodellen zur Baumsegmentierung konnte festgestellt werden, dass Ungenauigkeiten der Höhendaten in bestimmten Fällen die

korrekte Identifizierung der Bäume beeinträchtigt haben. So wurden einige kleine und schlanke Baumindividuen (überwiegend Palmen), wie schon im Abschnitt 3.6.3 erläutert wurde, durch das DKM nicht richtig modelliert. Auch beschattete Bäume können davon betroffen sein.

Die größten Schwierigkeiten bei der Detektion der Bäume in Santa Fé de Antioquia lagen bei den kleinen und mittelgroßen Baumindividuen innerhalb einer Baumgruppe. Während die isolierten oder in den oberen Schichten auftretenden Bäume mit großer Wahrscheinlichkeit richtig abgegrenzt werden, sind die Individuen in den mittleren und unteren Schichten des Waldes bei der Identifizierung benachteiligt. PERSSON ET AL. (2002), HEURICH (2006) und KOCH ET AL. (2006) sind zu ähnlichen Schlussfolgerungen in den Außertropen gekommen. Benachbarte Bäume mit fusionierten Kronen, die ein kontinuierliches Kronendach bilden, oder Bäume mit mehreren Kronenteilen (Verzweigung), und daher mit mehrfachen Maxima, verursachten ebenfalls Schwierigkeiten. TIEDE & HOFFMAN (2006) unterstreichen zusätzlich die schwierige Modellierung der flachen Kronen.

4.6 Zusammenfassung

Dieses Kapitel behandelt die Detektion der Baumkronen in einem natürlichen Waldbestand und in einer Ölpalmenplantage mittels eines digitalen Kronenmodells und Orthophotomosaiken in den Tropen. Dafür wurden Konzepte wie die Maßstabebenen-Analyse, Höhenmaxima und Netze von Höhenminima hauptsächlich in Definiens Developer umgesetzt. Die Ergebnisse zeigen kontrastierende Erfolgsquoten von ca. 95% in den Ölpalmenplantagen und 52% im natürlichen Baumbestand. Während in der Plantage Schwierigkeiten bei der Erfassung einiger Individuen aufgrund der Qualität des DKMs auftraten, waren diese in natürlichen Wäldern eher auf die komplizierte Trennung von Baumindividuen der mittleren und niedrigeren Stratenschichten des Waldbestandes zurückzuführen. Ebenfalls konnte in allen Beständen die Farbinformation nicht optimal mit den Höhendaten kombiniert werden.

Kapitel 5

Klassifizierung von Baumarten anhand digitaler Orthomosaik und Oberflächenmodelle

5.1 Einleitung

Der digitale Verarbeitungsprozess, der zu einer Gruppierung von Bildelementen nach bestimmten Einheitlichkeitsprädikaten und ihrer Zuordnung zu Informationsklassen führt, wird als Klassifizierung bezeichnet.

In der Anfangszeit der digitalen Klassifizierung basierten die Klassifizierungsverfahren auf der Gruppierung der Pixel nach spektralen Signaturen. Diese konventionellen Verfahren beruhten somit nur auf den spektralen Werten der Bildelemente, meist Grauwertunterscheidungen. Dabei treten häufig objektbedingte Schwierigkeiten auf, die sich aus der Variabilität der spektralen Objektsignaturen und der Ähnlichkeit von Signaturen verschiedenartiger Objektklassen ergeben (HILDEBRANDT (1996, S.526), COCHRANE (2000)). In diesem Zusammenhang hat sich zunehmend die Anwendung zusätzlicher Informationen als sinnvoll erwiesen. So zum Beispiel werden zur Baumartenerkennung immer häufiger Texturmerkmale, formbeschreibende Merkmale und strukturelle Elemente aus den Bildern oder digitalen Oberflächenmodellen herangezogen.

Die digitalen Klassifizierungsverfahren haben bereits eine lange Tradition in der Forstwirtschaft. Insbesondere haben Satellitendatensätze für viele Jahre die automatische Klassifikation der Vegetation bis auf Waldbestandsebene unterstützt. In den letzten Jahren hat der Einsatz hochauflösender Sensoren die Entwicklung von Techniken zur Baumbestimmung vorangetrieben. Die dadurch bedingte höhere spektrale und räumliche Differenzierung hat neue Ansatzmöglichkeiten erschlossen, aber auch weitere Herausforderungen gestellt. So werden die einzelnen Bäume durch mehr kleinere Pixel und eine wesentlich höhere Vielzahl von Farbvariationen dargestellt, die strukturelle Elemente wie Laub, Äste, Licht und Schatten besser hervorheben. Sie sollten bei aktuellen Arbeiten insgesamt in den Klassifikationsschemen herangezogen oder zumindest berücksichtigt werden.

Schwierigkeiten bei der Klassifizierung von Bäumen treten häufig auf. Außer dem starken Einfluss der Aufnahmebedingungen (wie atmosphärische- und Beleuchtungsverhältnisse) auf die Ergebnisse, kommen auch andere Faktoren der Oberflächeneigenschaften und Baumgeometrie hinzu. So können Kronenteile eines Baumindividuums durch andere Kronen abgeschattet werden; insbesondere Bäume der unteren Schichten können partiell verdeckt werden. Mischsignaturen aus mehreren Baumkronenelementen, Rückstrahlung vom Waldboden und Unterholz, abgestorbene Kronenteile, Lianen oder Epiphyten erschweren noch mehr die Situation (CLARK ET AL. (2005), KALACKSKA ET AL. (2007), PALACE ET AL. (2008)). Auch der phänologische Zustand, verschiedenartige Krankheiten, Vitalitätsunterschiede oder das Wachstumsstadium des Baumes u.a. sollten dabei beachtet werden. In dieser Hinsicht können die vorhandenen Oberflächenmodelle bzw. Kronenmodelle wertvolle, von einigen dieser Faktoren unabhängige Informationen bereitstellen, welche leichter und eindeutiger interpretierbar sind. Allerdings ist es oftmals der Fall, dass die Baumarten eine unterschiedliche Kronenmorphologie aufweisen und selbst der Kronenaufbau einer Art stark variieren kann (HILDEBRANDT (1996, S.303), HEURICH (2006, S.117)).

Die meisten der Untersuchungen im Bereich der Baumklassifizierung sind in den gemäßigten Landschaftszonen der Erde durchgeführt worden. Diese haben normalerweise nur einige wenige Baumarten oder Baumgruppen anvisiert. Im einfachsten Fall ist zwischen Laubbäumen und Nadelbäumen eine deutliche Trennung weitgehend möglich. Wenn aber mehrere Baumarten einbezogen werden, gehen die Erfolgsraten zurück. Die Artenbestimmung ist besonders schwierig innerhalb der Laubbaumgruppe. Allerdings können einige dieser Arten, zumindest anhand intensiver visueller Interpretation, mit bestimmter Sicherheit (mit Trefferquoten höher als 80%) unterschieden werden. Wenn

aber automatische Verfahren eingesetzt werden, sind die Ergebnisse für einige Arten nicht so treffend. Auf der anderen Seite sind die Analysen dieser Art in den Tropen noch relativ selten und auch nur mäßig erfolgreich (JANSEN ET AL. (2008)). Es ist auch zu erwarten, dass aufgrund der deutlich größeren Artenvielfalt mehr Schwierigkeiten auftreten werden.

Im diesem Kapitel wird beabsichtigt, die Genauigkeiten einiger Klassifizierungsverfahren durch die Verwendung von digitalen Luftbildern aus Mittelformatkameras und die daraus abgeleiteten digitalen Oberflächenmodelle für die Baumklassifizierung zu ermitteln. Dabei werden zwei unterschiedliche tropische Landschaftstypen und zwei Bildmaßstäbe untersucht. Es wird insbesondere auf die zwei folgenden Fragestellungen eingegangen:

- Welche Merkmale sind am besten zur Klassifizierung der Bäume geeignet?
- Lassen sich einzelne Baumarten unterscheiden?

Dabei werden die Hauptaspekte der Klassifizierung digitaler Bildinformationen im Abschnitt 5.2 behandelt. Anschließend werden im Abschnitt 5.2.2 die Grundlagen der hier verwendeten Ansätze beschrieben. Die insgesamt gesammelten Erfahrungen für die Tropen werden im Abschnitt 5.2.3 zusammengefasst. In den Abschnitten 5.3 und 5.4 werden die angewandten Methoden und Ergebnisse dargestellt. Abschließend wird eine Diskussion der eigenen Ergebnisse in Rahmen der bisherigen Untersuchungen durchgeführt.

5.2 Grundlagen der Baumklassifizierung

Das Hauptproblem einer Klassifikation besteht darin, die Gruppen- /Klassenzugehörigkeit von Pixeln oder Bildsegmenten aus den Merkmalswerten abzuschätzen (FUCHS (2003)). In der Regel werden mehrdimensionale Merkmal-Vektoren für jedes Pixel oder Objekt aus verschiedenen Informationsquellen generiert. Letztendlich ist die Aufgabe eines Klassifikators, die korrekte Trennung zwischen den Regionen des Merkmalsraums zu finden (SOILLE (2003)).

5.2.1 Merkmale zur Baumklassifizierung

Die Erkennbarkeit von Objekten hängt außer von den Parametern des Aufnahmesystems in starkem Maße von den Objekteigenschaften, dem Kontrast zur Umgebung usw. ab (ALBERTZ (2009, S.85)). Die Wahrscheinlichkeit, mehrere Objektklassen mit in sich ähnlichen spektralen Signaturen richtig zu klassifizieren steigt, wenn weitere wenig korrelierte spektrale Datentypen gleichzeitig herangezogen werden (HILDEBRANDT (1996, S.527)).

Zum Erkennen von Objekten und Sachverhalten in Luftbildern trägt eine Reihe von zusammenwirkenden Einzelfaktoren bei. ALBERTZ (2009, S.125) erwähnt die Helligkeit, die Schattierungen, die Textur, die Form und Größe der Objekte sowie die relative Lage von Objekten.

Spektrale Merkmale Die RGB-Kombination ist die konventionelle Farbdarstellung des vom menschlichen Auge sichtbaren Spektralbereichs eines Bildes, in der die Farben als Mischprodukt der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau zusammengeführt werden. Andere Farbräume, wie IHS (Intensity: Intensität; Hue: Farbton; Saturation: Sättigung) oder CIE (*Commission Internationale de l'éclairage*), stammen aus der linearen bzw. nicht-linearen Transformation des RGB-Systems. Alle diese Farbrepräsentationen werden gewöhnlich in der Bildklassifizierung angewandt. Allerdings hat sich keine den andern gegenüber als deutlich überlegen erwiesen, wobei jedoch das IHS-System Vorteile bei der Bildsegmentierung aufweist, wenn die Bilder ungleichmäßige Beleuchtung wegen Schattierungen enthalten (CHENG ET AL. (2001)). In Farbbildern werden die Intensität (I), der Farbton (H) und die Sättigung (S) als Hilfsmittel zum Erkennen und Unterscheiden von Objekten genutzt. Die Helligkeit oder Intensität ist ein farbusabhängiges Merkmal und entspricht der Graustufen-Wiedergabe eines Farbbildes. Durch den Farbton unterscheiden sich die "echten" Farben von Weiß, Grau und Schwarz. Die Sättigung beschreibt die Intensität des Farbtons, d.h. wie blass bzw. wie kräftig eine Farbe erscheint (SCHLICHT (1995, S.28-29)).

Auch Schattierungen und Tönungskontraste können sehr wichtig zum Erkennen von Oberflächenformen sein, die durch eine bestimmte Zusammensetzung von Feinstrukturen charakterisiert sind. Bei der Baumbestimmung finden sie nicht nur für die Baumkronenabgrenzung Verwendung, sondern auch Texturparameter können daraus abgeleitet werden (SCHNEIDER (1974, S.160)).

Texturen Unter Textur versteht man die Ton(Farb-)musterung, die sich in einer Bildfläche aufgrund einer gegebenen Ordnung von gleichartigen Feinstrukturen, Objekten oder Oberflächeneigenschaften ergibt. So treten häufig Begriffe auf wie körnig, fleckig, flockig, sternförmig, streifig zur Beschreibung der Texturen, je nachdem welche Elemente sie zusammensetzen. In der Bildverarbeitung wird normalerweise davon ausgegangen, dass diese kleinen Elemente sich periodisch oder quasiperiodisch im Raum wiederholen (PRATT (2001, S.519)). Allerdings ist die Textur aufgrund der Ungleichmäßigkeiten und Diskontinuitäten des Musters nicht so einfach zu charakterisieren. Außerdem ist die Textur eine lokale Eigenschaft. Das bedeutet, dass sie sich auf eine Region mit Pixelkombinationen und nicht auf ein einzelnes Pixel bezieht (TRIAS-SANZ ET AL. (2008)).

Das Auftreten von Texturen ist eng mit dem Bildmaßstab verknüpft (SCHNEIDER (1974, S.160)). Die Texturen der einzelnen Baumkronen werden beispielweise im großen Maßstab meistens durch die Anordnung von Blättern und Zweigen repräsentiert, während mit abnehmenden Maßstab die Texturen innerhalb einer Baumkrone zunehmend feiner werden und schließlich verschwinden (HILDEBRANDT (1996, S.292)).

Zur Registrierung von Texturmerkmalen werden in der Regel statistische Merkmale berechnet. Diese werden normalerweise in zwei Gruppen aufgeteilt: Texturparameter erster Ordnung, die ein quantitatives Maß für die Grauwerte innerhalb eines bewegten Fensters ohne Berücksichtigung der Wertverteilung ermittelt, und Texturparameter zweiter Ordnung, die die Nachbarschaftbeziehungen von Grauwerten unter Einbeziehung der Orientierung und Distanzen benachbarter Pixel beschreibt. Zu den klassischen Texturmerkmalen erster Ordnung zählen der Mittelwert, die Varianz/Standardabweichung und andere höhere Momente wie Schiefe und Entropie (PRATT (2001, S.513)). Diese zeigen eine Invarianz gegenüber einer Permutation der Pixel (FUCHS (2003)). Zur Berechnung der Parameter zweiter Ordnung wird häufig die so genannte Grauwert-Abhängigkeits-Matrix (*Gray-Level Co-occurrence Matrix*, kurz GLCM) nach HARALICK ET AL. (1973) ermittelt, die die Häufigkeit von Grauwertkombinationen von Pixelpaaren innerhalb eines Fensters/Polygons berechnet. Die Bildpixel eines Paares befinden sich immer in einer festen Lagebeziehung zueinander, die durch einen Verschiebungsvektor definiert ist. Die Verbundwahrscheinlichkeit zweier Pixel kann durch die entsprechende relative Häufigkeit ausgedrückt werden (ERNST (1991, S.125)):

$$P_d(a, b) = N_d \frac{(a, b)}{N}, \quad (5.1)$$

wobei

$N_d(a, b)$ = Auftretenshäufigkeit von Pixelpaaren mit einem festgelegten Verschiebungsvektor

a = Grauwert des ersten Pixels

b = Grauwert des zweitens Pixels

N = Anzahl der betrachteten Bildpixel

bedeuten. Wenn die $p_d(a, b)$ durch ein quadratisches Schema angeordnet werden, wird die GLCM erhalten. Korrelation (*Correlation*), Energie (*Energy*) und Homogenität (*Homogeneity*) sind einige der typischerweise verwendeten Texturparameter zweiter Ordnung, die aus der GLCM ermittelt werden (VAN DER SANDEN & HOEKMAN (2005)).

Formmerkmale Bildgestaltungen treten als zweidimensionale Darstellungen eines Objektes auf, die sich durch die Abgrenzung von ihrer Umgebung abzeichnen. Normalerweise bilden sich auf den Aufnahmen Grenzlinien durch unterschiedliche Helligkeiten (oder Farben) aus, die Umrisse und Kanten der Objekte kennzeichnen (ALBERTZ (2009, S.125)). Als Erkennungsmerkmale bleiben die 2D-Kronenformen, unabhängig von Beleuchtung oder Lage, gegenüber den spektralen oder textuellen Eigenschaften das ganze Jahr über relativ konstant, was sehr vorteilhaft ist. Die Form hängt vom Bildmaßstab, der Baumart, dem Alter und der Zusammensetzung des Bestandes ab (SCHNEIDER (1974, S.290)). Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von hochaufgelösten Bildern werden Objekt-Form und Größe und die daraus gewonnenen Merkmale zum Baumerkennen immer mehr benutzt. FUCHS (2003, S.95) verwendet beispielweise zur Baumartbestimmung Merkmale wie Kompaktheit, Länglichkeit, Umfang und Orientierung, die direkt aus der Objektform oder einer Näherung an eine Oberfläche (Kreis, Ellipse usw.) abgeleitet werden.

Raumgestalt der Kronen Neben Formmerkmalen kann die dreidimensionale Auswertung der Bildflächen zur Baumdifferenzierung beitragen. Zu diesem Zweck

werden räumliche Gestaltmerkmale aus stereoskopischen digitalen Modellen oder Laserscanning-Punkten gewonnen. Dazu kommen auch die absoluten und relativen Höhen und Höhendifferenzen innerhalb der Baumkrone gewöhnlich zum Einsatz (HILDEBRANDT (1996, S.292), FUCHS (2003)).

Verschiedene Autoren (z.B. FUCHS (2003), WEINACKER ET AL. (2004), PERSSON ET AL. (2006), KOCH ET AL. (2009)) haben mehrere Merkmale aus 3D-Daten zur Baumbeschreibung vorgeschlagen. Diese basieren auf Messgrößen der dreidimensionalen Oberfläche (z.B. Krümmung), auf der Parametrisierung der Anpassung von geometrischen Modellkörpern (z.B. Kugelschnitte oder Kegel) oder auf der Parametrisierung von Höhenpunkten.

5.2.2 Klassifizierungsmethode

Für rechnergestützte Klassifizierungen liegen verschiedene methodische und mathematische Ansätze vor. Die Klassifikatoren basieren beim geometrischen Vorgehen auf Zuordnungs-, Trenn-, oder Diskriminanzfunktionen und bei statistischen Verfahren auf Verteilungsfaktoren (HILDEBRANDT (1996, S.528)). Zu den am häufigsten verwendeten Algorithmen zählen:

- Schwellwertverfahren.
- Überwachte und unüberwachte Klassifizierungen.
- Hierarchische Klassifizierungen.
- Hybride Klassifizierungen mit numerischen Verfahren und visueller Interpretation.

Im Rahmen dieser Arbeit werden überwachte Klassifizierungsverfahren verwendet. Diese Verfahren basieren auf der Vorbestimmung der Objektklassen durch den Auswerter. Vorausgesetzt wird auch die Abgrenzung/Bestimmung mehrerer Trainingspolygone je Baumart, für die mehrere statistische Merkmale (n-dimensionale Vektoren) eingesetzt werden. Diese Trainingsgebiete müssen repräsentativ für die gewünschten Baumarten sein, aber auch ihre jeweilige Variabilität erfassen (HILDEBRANDT (1996,

S.534)). Die Analyse der Merkmale selbst kann durch verschiedene Ansätze erfolgen. Von den verschiedenen vorhandenen Klassifikatoren werden hier der Maximum-Likelihood-Algorithmus und die Diskriminanzanalyse verwendet und daher im Folgenden beschrieben.

Maximum-Likelihood-Algorithmus (ML) Das Maximum-Likelihood-Verfahren ist einer der am häufigsten verwendeten Algorithmen in der Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten. Die Gruppenzuordnung von einzelnen Pixeln bzw. Elementen wird nach der maximalen Wahrscheinlichkeit getroffen, die aus Trainings-Daten geschätzt wird. Die Trennungsfunktion erfordert die Berechnung der Kovarianzen und Mittelwertvektoren (FUCHS (2003)). Als Voraussetzung wird davon ausgegangen, dass die Werte der zu einer Objektklasse gehörenden Bildelemente in den Trainingsgebieten eine normale Häufungsverteilung um den jeweiligen Mittelwert der Musterklasse aufweisen (HILDEBRANDT (1996, S.540)).

Diskriminanzanalyse (DA) Die Diskriminanzanalyse ist eine multivariate Methode zur Analyse von Gruppenunterschieden. Sie ermöglicht eine Untersuchung der Bedeutung mehrerer abhängiger Variablen für die Unterscheidung der Gruppen. Ein weiterer Anwendungsbereich besteht in der Klassifikation neuer Elemente, wobei vorausgesetzt wird, dass Datensätze mit bekannter Gruppenzugehörigkeit vorliegen (WEBB (2002, S.123), BACKHAUS & PLINKE (2008, S.182)).

Ausgehend von vorgegebenen Gruppen eines Trainings-Datensatzes und einer Reihe von ausgewählten Merkmalsvariablen werden Koordinatenachsen berechnet, die eine optimale Trennung der Gruppen mittels Diskriminanzfunktionen ermöglichen. Die Anzahl der Gruppen soll nicht größer sein als die Anzahl der Merkmalsvariablen. Im Allgemeinen wird eine Diskriminanzfunktion durch die folgende lineare Form (BACKHAUS & PLINKE (2008, S.186)) repräsentiert:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_jX_j \quad (5.2)$$

wobei

Y = Diskriminanzfunktion

X_j = Merkmalsvariable j mit $j = 1, 2, \dots, J$

b_0 = Konstantes Glied

b_j = Diskriminanzkoeffizient für Merkmalsvariable j

darstellen. Die Diskriminanzfunktion gibt für jedes Element i ($i = 1, \dots, I_g$) einer Gruppe g ($g = 1, \dots, G$) mit den Merkmalswerten X_{jgi} ($j = 1, 2, \dots, J$) einen Diskriminanzwert Y_{gi} an.

Das Hauptdiskriminanzkriterium für die Verschiedenheit mehrerer Gruppen g ist das Verhältnis von der Streuung innerhalb der Gruppen und der Streuung zwischen den Gruppen (Verhältnis als I bezeichnet). Desgleichen ist der Abstand zwischen den Gruppenschwerpunkten als weiteres Kriterium zu berücksichtigen. Je größer das Verhältnis der Streuungen (I) sowie die Distanz der Gruppencentroide sind, umso besser ist die Unterscheidung. Bei mehr als zwei Gruppen lassen sich mehrere Diskriminanzfunktionen ermitteln, die jeweils orthogonal zueinander stehen. Zu jeder Diskriminanzfunktion wird ein Eigenwert berechnet, der als Maximalwert des Diskriminanzkriteriums $Y = \max I$ definiert wird. Als Maß für die relative Wichtigkeit einer Diskriminanzfunktion wird der Eigenwertanteil verwendet, der die durch die k -te Diskriminanzfunktion erklärte Streuung als Anteil der Gesamtstreuung liefert (WEBB (2002, S.145), TIMM (2002, S.434-439), BACKHAUS & PLINKE (2008, S.189-200)).

5.2.3 Baumklassifizierung in tropischen Bereichen

Die Klassifizierungen von einzelnen Baumarten auf Kronen-Niveau haben auf visuellen Identifizierungen oder automatischen Verfahren aufgebaut. Im Allgemeinen haben sich die automatischen Klassifizierungen auf wenige Arten beschränkt (weniger als 12 Baumarten), während die visuelle Interpretation sich mit deutlich mehr Baumarten befasst hat (bis zu 111 Baumarten von MYERS (1982) in Australien. Allerdings werden manchmal Gruppierungen aufgrund der ähnlich ausgewiesenen Merkmale von mehreren Baumarten benötigt, wie BOHLMAN & LASHLEE (2005) für die Laubbäume in Panamá nachgewiesen haben.

Das Einsetzen von Farbluftbildern zur Identifizierung von einzelnen Baumarten reicht

schon mehrere Jahrzehnte zurück. Sogar in den Tropen sind Arbeiten bereits seit den 70er Jahren vorhanden (z.B. CLÉMENT & GUELLEC (1974)). Die Forschungen in diesen Gebieten haben sich hauptsächlich auf die Interpretationsfähigkeit von Experten bei der visuellen oder stereoskopischen Erkennung beschränkt (z. B. CLÉMENT & GUELLEC (1974), MYERS (1982), TRICHON & JULIEN (2006)). Die Arbeit von SAYN-WITTGENSTEIN ET AL. (1978) hat die Basis für die Erstellung von verschiedenen Interpretationsschlüsseln in den Tropen geschaffen (MYERS (1982), TRICHON & JULIEN (2006), GONZÁLEZ-OROZCO ET AL. (2010)). Dabei werden außer der Farbe noch andere Merkmale für die Beschreibung der Baumkrone, wie Baumarchitektur (Verzweigung und Schichtung), Form, Größe, Lichtdurchlässigkeit und Textur, sowie die vertikale Positionierung der Krone (Dominanzgrad, Schichtung) einbezogen. Die sich dabei ergebenden Ergebnisse in den tropischen Regenwäldern sind vielversprechend, mit Erfolgsquoten über 75% bei mehr als 20 Arten (siehe Tabelle 5.1) (MYERS (1982)). Die Erforschung der automatischen Verfahren für die Tropen befindet sich allerdings noch in der Anfangsphase, geschweige denn umfasst die Anwendung für die Baumklassifizierung bisher Höheninformation anhand von digitalen Kronenmodellen oder LIDAR-Daten.

Die automatischen Klassifikationsverfahren haben insbesondere in den Gemäßigten Breiten seit ungefähr einem Jahrzehnt aufgrund des verstärkten Einsatzes von Sensoren mit hoher Auflösung eine erhebliche Entwicklung gefunden. In diesem Bereich liegen mehrere Arbeiten über die automatische (semi-automatische) Klassifizierung von Nadel- und Laubbaumarten in der Literatur vor (z.B. FUCHS (2003), ERIKSON (2004), HEURICH (2006), HIRSCHMUGL ET AL. (2007), ØRKA ET AL. (2009), WASER ET AL. (2011)). Die wenigen Untersuchungen über die automatische Identifizierung von Baumarten anhand hochaufgelöster Fernerkundungsdaten in den tropischen Gebieten haben sich auf die Anwendung von hyperspektralen Daten beschränkt. In der Tabelle 5.1 sind die gefundenen Aufsätze aus diesem Bereich angegeben. Die erste Publikation dieses Typs geht auf die Arbeit von CLARK ET AL. (2005) im tropischen Regenwald Costa Ricas unter Verwendung hyperspektraler Daten aus HYDICE (*Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment*) zurück. Andere hyperspektrale Sensoren wie CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) oder HyMAP wurden von LUCAS ET AL. (2008B) bei der Baumklassifizierung in trockenen Eucalyptus-Wäldern Australiens genutzt. Identifizierungen in anderen tropischen Ökosystemen wie Mangroven mit Hilfe von hyperspektralen Daten wurden auf Pixelbezug ohne Berücksichtigung von Objekten wie Baum-Individuen und Grenzen durchgeführt (HELD ET AL. (2003), WANG ET AL. (2004)). Obgleich die hyperspektralen Sensoren mehr spektra-

Arbeit / Ort	Sensor (Auflösung)	Klassifizierten Baumarten	Verwendete Merkmale	Klassifikator	Beste erreichte Trefferquote
Clément & Guellec (1974) / Gabun (tropischer Regenwald)	Analoge Farbluftbilder 1 : 5000	<i>Okoumé (Aucoumea klaineana)</i>	Farbe, Textur, Verzweigung	Visuelle Interpretation, Interpretationsschlüssel	73%
Myers (1982) / Australien - Nord Queensland (tropischer Regenwald)	Analoge Farbluftbilder 1 : 2000 - 1 : 6000	111 Baumarten, u.a.: <i>Agathis atropurpurea</i> , <i>Backhousia bankroftii</i> , <i>Toona australis</i>	Farbe, Größe, Dominanz, Form, Textur, Verzweigung, Habitus	Visuelle Interpretation / Interpretationsschlüssel. Basiert auf Sayn-Wittgenstein et al. (1978)	24 Arten mit über 75%, 11 Arten mit 100%
Trichon & Julien (2006) / Französisch-Guayana (tropischer Regenwald)	Analoge Farbluftbilder 1 : 5000 - 1 : 8000	12 Artgruppe, u.a.: <i>Dicorynia guianensis</i> , <i>Carapa procera</i> , <i>Goupia glabra</i> , <i>Ocotea rubra</i> , <i>Qualea rosea</i> , <i>Symphonia globulifera</i>	Farbe, Größe, Dominanz, Form, Textur, Verzweigung, Habitus	Visuelle Interpretation/ Interpretationsschlüssel. Basiert auf Sayn-Wittgenstein et al. (1978)	Von 43% für <i>Goupia glabra</i> bis 97% für <i>Carapa guianensis</i>
González-Orozco et al. (2010) / Ecuador (tropischer Regenwald)	Digitale Luftbilder (GSD 21, 6 cm)	10 Arten, u.a.: <i>Astrocaryum chambira</i> , <i>Cecropia sp.</i> , <i>Iriartea deltoidea</i> , <i>Inga sp.</i> , <i>Porouma sp.</i>	Form, Textur	Visuelle Interpretation / Online - Interpretationsschlüssel. Basiert auf Trichon & Julien (2006)	Zwischen 70% und 95% für <i>Iriartea deltoidea</i> , <i>Astrocaryum Cecropia</i>
Clark et al. (2005) / Costa Rica (tropischer Regenwald)	HYDICE (1, 6 m)	7 Baumarten, u.a.: <i>Ceiba pentandra</i> , <i>Dipteryx panamensis</i> , <i>Hyeronima alcherneoides</i> , <i>Lecythisampla</i>	Farbe	Diskriminanzanalyse (LDA), Maximum-Likelihood, Spectral Angle Mapper	92% mit LDA und 30 Bänder
Lucas et al. (2008b) / Australien - Mitte Sud Queensland (Eucalyptus Mischwälder)	14 Bänder von CASI (1 m) und 114 Bänder von HyMap (2, 6 m)	8 Baumarten. u.a.: <i>Acacia spp.</i> , <i>Angophora leiocarpa</i> , <i>Callitris glaucophylla</i> , <i>Eremophylla michelli</i> , <i>Eucalyptus spp.</i>	Farbe: verschiedene Indizes und Kombinationen	Schrittweise Diskriminanzanalyse	87%: (Trainingsdaten) 75%: (Neuer Bäume)

Tabelle 5.1: Klassifizierungen anhand hochauflösender Fernerkundungssensoren in tropischen Regionen.

le Information für die Baumtrennung zur Verfügung stellen, haben sie in der Regel eine geringere räumliche Auflösung (über 1 m), was die Charakterisierung von bestimmten Merkmalen wie Textur oder Form erschwert. In diesem Sinne bieten im Augenblick Luftbilder, verbessert digitale, die einzige Möglichkeit, mit Pixel-Auflösungen kleiner als 40 cm zu arbeiten. Außerdem sind die Untersuchungen im Hyperspektralbereich zurzeit noch Sonderforschungen, die etwas abseits von verbreiteten Fernerkundungsverfahren liegen.

Neben den hohen inneren farbspektralen Varianzen der Baumkronen gleicher Arten treten einige spezielle Schwierigkeiten bei der Klassifizierung besonders von tropischen Baumbeständen auf. Eine davon ist die häufig geringe Repräsentanz der einzelnen Arten (Individuenarmut an Arten) im Waldbestand und im Kronendach. Dies macht die Identifizierung von seltenen Baumarten aufgrund des Mangels an ausreichenden Individuen für Training- und Klassifizierungsverfahren besonders schwierig. Hinzu kommt die mehrfache Schichtung von bis zu fünf Kronenniveaus in tropischen Wäldern. Dies bedeutet, dass ein großer Anteil der Individuen im Baumbestand nicht oder nur teilweise bei den senkrechten Bildaufnahmen sichtbar ist. TRICHON & JULIEN (2006) haben beispielweise gefunden, dass nur zwischen 20,8 bis 24,5% der Bestandsbäume mit Stammdurchmesser größer als 10 cm im Kronendach eines Regenwaldes repräsentiert waren.

5.3 Methodisches Vorgehen

Die Klassifizierung der Baumarten/Baumartengruppen baut auf den folgenden gemeinsamen Aspekten auf:

- Die digitalen Orthophotomosaike und die entsprechenden Oberflächenmodelle waren Grundlage der Merkmalsgewinnung für die thematische Klassifikation. Die Erstellung dieser wurde bereits in Kapitel 3 beschrieben. Zwei mittlere Maßstäbe wurden analysiert, die den Untersuchungsgebieten von Santa Fé de Antioquia und Medellín entsprechen. So haben die Orthophotomosaike Auflösungen von 10 und 20 cm. Die abgeleiteten digitalen Oberflächenmodelle (DOM) weisen jeweils eine GSD (Ground Sampling Distance) von 0,3 und 0,6 m auf.
- Bei der Erhebung der Trainingsdaten und der Klassifizierung selbst wurden nur

die Individuen der ausgewählten Baumarten einbezogen. 11 Baumarten wurden je Maßstab analysiert. Hierfür wurde als Auswahlkriterium das Vorkommen von mindestens 16 Individuen im Untersuchungsgebiet ausgesucht. Das erlaubt die Nutzung von 8 Individuen zu Trainingszwecken und den Rest für die Klassifizierung der anderen Individuen zu verwenden. Wenn eine Baumart durch weniger als insgesamt 60 Individuen repräsentiert war, wurden die Hälfte der Individuen jeweils zum Training und die andere Hälfte zur Klassifizierung benutzt. Bei mehr als 60 Individuen wurden 30 als Trainingsdaten verwendet. Die Tabellen 5.2 und 5.3 zeigen die klassifizierten Baumarten mit der entsprechenden Anzahl von Individuen. Eine vollständige Liste der identifizierten Baumarten und ihrer Häufigkeit kann im Anhang A ebenso wie die Baumkartierung für die einzelnen Parzellen in Anhängen F.1 bis F.5 verglichen werden. Im Anhang F.6 sind terrestrische Photos und die entsprechenden Luftbildaufnahmen von Individuen einiger Baumarten von Santa Fé de Antioquia zu sehen.

- Methodisch wurden zwei Typen von Klassifizierungen evaluiert, nämlich das Pixelniveau durch die ML (Maximum-Likelihood)-Klassifikation, und das Kronenniveau durch die lineare Diskriminanzanalyse. Das Pixelniveau bedeutet, dass jeder einzelne Pixelwert in der statistischen Datensammlung und bei der Klassifizierung erfasst wurde. Diese Klassifizierung wurde nur anhand spektraler Merkmale umgesetzt. Auf der anderen Seite deutet das Kronenniveau darauf hin, dass nur ein Merkmalswert für jedes Baumpolygon erzeugt und dieser in der Klassifizierung als repräsentativ für das Baumindividuum einbezogen wurde. Die Polygone wurden zuvor durch eine visuelle stereoskopische Markierung des Kronenrandes abgegrenzt, zu denen die im Gelände bestimmten Baumarten als Attribut zugeordnet wurden. Die Verwendung dieser Polygone als Flächeneinheit ermöglichte die zusätzliche Einbeziehung von Merkmalen wie Textur, Form und Gestalt bei der Merkmalsgewinnung.

Im Folgenden werden detaillierte Aspekte der Klassifizierung behandelt.

5.3.1 Merkmalsextraktion

Vier Merkmalsarten wurden gewonnen: spektrale, Textur-, Form- und dreidimensionale gestaltbezogene Eigenschaften. Eine gesamte Liste der im Rahmen dieser Arbeit überprüften Merkmalsvariablen kann in Anhang F.1 nachgeschlagen werden.

Baumart	Baumtyp	Kurzbezeichnung	Anzahl von Individuen
<i>Acrocomia aculeata</i>	einheimische Palme	AC	15
<i>Cocos nucifera</i>	eingeführte Palme	CO	149
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	einheimisch	EN	18
<i>Gliricidia sepium</i>	einheimischer Heckenbaum	GL	60
<i>Guazuma ulmifolia</i>	einheimisch	GU	32
<i>Mangifera indica</i>	eingeführter Obstbaum	MA	150
<i>Melicoccus bijugatus</i>	einheimischer Obstbaum	ME	32
<i>Pseudosamanea guachapele</i>	einheimisch	PS	52
<i>Quararibea cordata</i>	Obstbaum	QU	83
<i>Roystonea regia</i>	eingeführte Palme	RO	58
<i>Tamarindus indica</i>	Obstbaum	TA	36

Tabelle 5.2: Ausgewertete Baumarten für die automatische Klassifizierung aus dem Gebiet von Santa Fé de Antioquia. Die Kurzbezeichnungen für jede Art, sowie die gesamte Anzahl von Individuen werden in der zweiten und dritten Spalte präsentiert. Das GSD des Orthophotomosaiks beträgt ca. 10 cm.

Baumart	Baumtyp	Kurzbezeichnung	Anzahl von Individuen
<i>Eucalyptus sp.</i>	eingeführt	EuSp	45
<i>Erythrina fusca</i>	einheimisch	ErFu	68
<i>Ficus benjamina</i>	eingeführt	FiBe	50
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	eingeführt	JaMi	21
<i>Mangifera indica</i>	Obstbaum	MaIn	58
<i>Pitecellobium dulce</i>	eingeführt	PiDu	22
<i>Psidium guajaba</i>	einheimischer Obstbaum	PsGu	43
<i>Pseudobombax septenatum</i>	eingeführt	PsSe	16
<i>Roystonea regia</i>	eingeführte Palme	RoRe	115
<i>Spathodea campanulata</i>	eingeführt	SpCa	38
<i>Tabebuia rosea</i>	einheimisch	TaRo	20

Tabelle 5.3: Ausgewertete Baumarten für die automatische Klassifizierung aus dem Gebiet von Medellín. Die Kurzbezeichnungen für jede Art sowie die gesamte Anzahl von Individuen werden in der zweiten und dritten Spalte präsentiert. Das GSD des Orthophotomosaiks beträgt ca. 20 cm.

Spektrale Merkmale Die spektralen Eigenschaften wurden aus den Orthophotomosaiken für jedes Pixel bzw. Baumpolygon gewonnen. Grundlage sind die Grauwerte der 3 RGB-Kanäle (Blau, Grün, Rot) und der 3 Kanäle der IHS-Transformation (Intensität, Farbton, Sättigung). Außerdem wurde der normalisierte Wert R_i (BUNTING & LUCAS (2006)) berechnet, der den Anteil jedes Kanals der RGB-Farbkomposite vermittelt:

$$R_i = \frac{c_i}{c_r + c_g + c_b}, \quad (5.3)$$

wobei c_r , c_g und c_b die Werte in jedem RGB-Band vertreten und i den R, G oder B Bestandteil annimmt. Eine solche Ratiobildung wird häufig berechnet, um die Beleuchtungsunterschiede zu reduzieren und die Intensität der einzelnen Kanäle anzugleichen.

Texturmerkmale Es wurden Texturmerkmale erster und zweiter Ordnung für die Klassifizierung auf Kronenniveau berechnet. In der ersten Gruppe wurde die Standardabweichung der RGB- und IHS-Kanäle und der ersten Hauptkomponenten (PCA1) innerhalb jedes Baumpolygons ermittelt. Die Standardabweichung ist ein einfach zu ermittelnder Parameter, der sehr effektiv zur Messung der Datenstreuung dient. Eine weitere Beschreibung dieser Parameter kann beispielweise in PRATT (2001, S.512) nachgelesen werden.

Die hier verwendeten Merkmale zweiter Ordnung konzentrieren sich auf die Methode der Grauwert-Abhängigkeits-Matrix (GLCM). Die GLCM ist bereits erfolgreich zur Texturunterscheidung und Objektklassifizierung in mehreren Studien im Fernerkundungsbereich (GE ET AL. (2006), SU ET AL. (2008)), einschließlich der Baumartklassifizierung (FUCHS (2003, S.47), HEURICH (2006, S.180)), eingesetzt worden. Die GLCM ist eine Tabulierung davon, wie häufig die verschiedenen Grauwert-Kombinationen in einem Bildsegment (Fenster) auftreten. Um eine bestimmte Richtungs-Invarianz zu erhalten, werden alle 4 Richtungen (0° , 45° , 90° , 135°) zusammengerechnet. Von den klassischen Merkmalen wurden die unten beschriebenen Indizes für jedes Baumpolygon mit dem Programm Definiens Developer berechnet (HARALICK ET AL. (1973), PRATT (2001), FUCHS (2003), DEFINIENS (2007)). Als Bildquelle fungierte die erste Hauptkomponente des Orthophotomosaiks.

- Correlation (Korrelation) Die Korrelation (Cor) misst die lineare Abhängigkeit

der Grauwerte bei benachbarten Pixeln.

$$Cor = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \left[\frac{(i - u_i)(j - u_j)}{\sqrt{(\sigma_i^2)(\sigma_j^2)}} \right] \quad (5.4)$$

- **Entropy (Entropie)** Der Entropie-Wert (*Ent*) ist hoch, wenn die Elemente der GLCM gleichverteilt sind.

$$Ent = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} - \ln P_{i,j} \quad (5.5)$$

- **Homogeneity (Homogenität)** Bei homogenen Bildsegmenten nimmt die Homogenität (*Hom*) hohe Werte an, wenn die höchsten Werte der GLCM in der Nähe der Hauptdiagonalen liegen.

$$Hom = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2}, \quad (5.6)$$

Wobei

i = Spalte der GLCM

j = Zeile der GLCM

N = Anzahl der Zeilen oder Spalten

u_{ij} = Mittelwert der GLCM

σ_{ij} = Standard Abweichung der GLCM

P_{ij} = Auftrittswahrscheinlichkeit der Pixel-Paar-Kombinationen

$$P_{ij} = \frac{V_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^N V_{i,j}}, \quad (5.7)$$

$V_{i,j}$ = Wert der Pixel-Par i, j in der GLCM

bedeuten.

Formbeschreibende Merkmale Merkmale, die die zweidimensionale Form des Baumpolygons beschreiben, wurden hier mit Programm Definiens Developer abgeleitet. Diese sind bereits in verschiedenen Arbeiten an der Baumartenklassifizierung (z.B. FUCHS (2003) und WEINACKER ET AL. (2004)) eingesetzt worden. Die Definitionen für die folgenden Indizes wurden aus DEFINIENS (2007) entnommen:

- **Fläche (F)** Die Fläche errechnet sich aus der Multiplikation der Fläche eines Pixels mit der Anzahl der Pixel innerhalb eines Baumpolygons.
- **Umfang (U)** Hier wird die Länge des Kronenrands als Umfang festgelegt.
- **Kompaktheit (K)** Die Kompaktheit ist als Shape-Index bekannt (DEFINIENS (2007)), die das Verhältnis von Umfang zu Fläche beschreibt.

$$K = \frac{U}{4\sqrt{F}} \quad (5.8)$$

- **Kronenbreite (KB)** Die Kronenbreite wird als Durchmesser eines Kreises berechnet, dessen Flächengröße der Kronenfläche (F) entspricht (FUCHS (2003, S.48)).

$$KB = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad (5.9)$$

- **Länglichkeit (L)** Das Verhältnis Länge/Breite kann als das Verhältnis der Eigenwerte (λ_1 und λ_2) der Kovarianzmatrix ausgedrückt werden.

$$L = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (5.10)$$

3D-Gestaltbeschreibende Merkmale Das DOM (digitales Geländemodell) gilt als Grundlage für die Gewinnung von Eigenschaften, die die dreidimensionale Form eines Baums beschreiben. Die Qualität der hier abgeleiteten Gestaltsmerkmale hängt deshalb im hohen Maß von der Genauigkeit des generierten DOMs ab. Autoren wie FUCHS (2003), WEINACKER ET AL. (2004) und WASER ET AL. (2011) haben erfolgreich einige von den unten aufgeführten Indices verwendet. Die hier genutzten Merkmale wurden mit Funktionen der Programme ERDAS, Definiens Developer und ArcGIS berechnet.

- **Vertikale Kronenlänge (KL)** Die KL wird als die Differenz zwischen der Baumspitze und dem mittleren Höhenwert am inneren Randbereich der Krone ermittelt (DEFINIENS (2007)).
- **Kronenmantelfläche (KMF)** Dieser Index wird als eine Annäherung an einen Kugelschnitt durch die Gleichung 5.11 bestimmt (FUCHS (2003, S.49)).

$$KMF = \pi \left(\frac{KN^2}{4} + KL^2 \right) \quad (5.11)$$

- **Hangneigung des Kronenmantels (HN)** Diese bezieht sich auf den mittleren Neigungswinkel in Grad der Kronenoberfläche, der als die erste Ableitung des DOMs gewonnen wird. Eine umfangreichere Definition dieses Parameters aus der Geomorphometrie kann beispielweise in OLAYA (2009, S.144) nachgelesen werden.
- **Krümmung des Kronenmantels (KR)** Dieses geomorphometrische Merkmal beschreibt die Konkavität bzw. die Konvexität einer Oberfläche. Mathematisch betrachtet wird sie als eine Ableitung zweiter Ordnung, d. h. die Richtungsänderung, definiert. In ArcGIS sind verschiedene Krümmungsrichtungen ermittelbar. Die Quer- (plan curvature) und Längs-Krümmungen (profile curvature) sowie die Differenz dazwischen (difference curvature) fanden hier Verwendung. Eine komplette Beschreibung der Berechnung dieser Parameter kann in WOOD (1996, S.85) und OLAYA (2009, S.149-155) verglichen werden.
- **Rauigkeit (R)** Die Rauigkeit kann als das Verhältnis der Kronenmantelfläche zur Fläche bestimmt werden (FUCHS (2003, S.52)).

$$R = \frac{KMF}{F} \quad (5.12)$$

5.3.2 Baumklassifizierung

Zu Klassifizierungszwecke fanden bei dieser Arbeit, wie schon erwähnt, die Maximum-Likelihood- Algorithmus (ML) und die lineare Diskriminanzanalyse (LDA) Verwendung. Einen Vergleich der Erfolge jeder Methode kann man durch die Klassifikationsmatrix (Confusion-Matrix) ziehen, die die Häufigkeit der korrekt und falsch klassifizierten Bauelemente für die verschiedenen Baumarten zusammenfasst. Außerdem wurden zusätzliche Auswertungen für die Diskrimanzanalyse durchgeführt.

Maximum-Likelihood-Algorithmus (ML) Für die Klassifizierung der Baumarten auf Pixelniveau wurde das klassische ML-Verfahren in ERDAS verwendet. Zu diesem Zweck wurde nur der RGB-Kanal der Orthophotomosaik eingesetzt. Die sich ergebenden klassifizierten Pixel wurden nach Kronenpolygonen analysiert, indem die endgültige Baumklasse zu dem am häufigsten vorhandenen Pixel innerhalb des Polygons zugewiesen wurde.

Lineare Diskriminanzanalyse (LDA) Die Diskriminanzanalyse wurde mit Programm SAS umgesetzt. Hierfür wurden die Funktionen STEPDISC und DISCRIM angewandt. Die erste davon diente zur Auswahl der wichtigsten Merkmalsvariablen und der Entfernung der nicht diskriminatorischen Merkmale durch die Anwendung einer schrittweisen Diskriminanzanalyse. Am Anfang wurden 33 Merkmalsvariablen (siehe Anhang F.1) nach Signifikanz evaluiert. Als Auswahlkriterium wurde die allgemein übliche F-Statistik verwendet, die die Trennfähigkeit (Signifikanz) jeder Variable isoliert überprüft (BACKHAUS & PLINKE (2008, S.206)). Darüber hinaus ging nur das Merkmal mit dem großen F-Wert in die endgültige Klassifikation ein, wenn zwei Merkmale hoch korreliert waren (Korrelationskoeffizient von über 0,9).

Die DISCRIM-Funktion klassifizierte die Trainingsdaten mit Hilfe des Kreuzvalidierung-Verfahrens und die neuen Baumkronen anhand Klassifizierungsfunktionen. Die Kreuzvalidierung besteht darin, dass das zu klassifizierende Element zunächst aus den Daten entfernt wird und dann mit den aus den restlichen Daten erstellten Diskriminanzfunktionen klassifiziert wird. Der Vorgang wiederholt sich für jedes Element. Es wurden gleiche A-priori-Wahrscheinlichkeiten für alle Arten angenommen. Überdies wurden kanonische Diskriminanzfunktionen generiert. Die mittleren standardisierten kanonischen Diskriminanzkoeffizienten gemäß der Formel 5.13 wurden zur Beurteilung der gemeinsamen diskriminatorischen Bedeutung der Variablen analysiert.

$$\bar{b}_j = \sum_{k=1}^K |b_{jk}| * EA_k \quad (5.13)$$

mit

b_{jk} = Standardisierter Diskriminanzkoeffizient für Variable j bezüglich Diskriminanzfunktion k .

EA_k = Eigenwertanteil der Diskriminanzfunktion k .

Die LDA wurde für alle verbleibender Merkmale sowie für jeden einzelnen Merkmals-typ durchgeführt.

5.4 Klassifizierungsergebnisse

Die Ergebnisse werden nach Untersuchungsgebiet und eingesetzter Methode präsentiert. Sowohl für die ML als auch für die LDA wird die Häufigkeit der korrekt und falsch klassifizierten Elemente für die verschiedenen Baumarten übersichtlich in einer Klassifikationsmatrix (Confusion-Matrix) zusammengefasst.

5.4.1 Santa Fé de Antioquia (GSD 10 cm)

Maximum-Likelihood-Algorithmus (ML) Die Tabellen 5.4 und 5.5 zeigen die Klassifikationsmatrizen für die Stichprobe und die Testdaten mit den erreichten Trefferquoten für jede analysierte Baumart. Die mittlere Trefferquote (arithmetischer Mittelwert aller untersuchten Baumarten) in der Untersuchungsstichprobe (Trainingsdaten) betrug 29%, die auf 25% für die Testdaten zurückging. Als Vergleich ist zu beachten, dass bei zufälliger Zuordnung der Elemente (aleatorische Wahrscheinlichkeit) zu den 11 Arten (unter Vernachlässigung der unterschiedlichen Gruppengröße) eine Trefferquote von 9% zu erwarten wäre.

Unter allen Arten erreichten nur vier eine Trefferquote von über 50% in beiden Klassifizierungen: *Acrocomia aculeata* (AC, eine Palme), *Enterolobium cyclocarpum* (EN, Piñón de oreja), *Pseudosamea guachapele* (PS, Cedro amarillo) und *Quararibea cordata* (QU, Zapote, ein Obstbaum). Die höchsten Werte gehörten zu EN (78%) in der Stichprobe und QU (79%) in den Testdaten.

Baumarten wie *Melicoccus bijugatus* (Mamoncillo, ein Obstbaum) und *Roystonea regia* (RO, eine Palme) konnten überhaupt nicht identifiziert werden, während *Glicida Sepium*, ohne richtige Treffer, teilweise als Mangobaum (MA) fehlerhaft klassifiziert wurde.

Diskriminanzanalyse (LDA) Nach der Eliminierung der redundanten oder nicht signifikanten Merkmalsvariablen sind 21 übriggeblieben (siehe Anhang F.1). Die univariante und die gemeinsame diskriminatorische Trennfähigkeit der ersten 10 verbleibenden Merkmalsvariable sind jeweils durch den mittleren Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j) und die F-Statistik in der Tabelle 5.6 wiedergegeben. Die Variablen mit den höchsten Werten

Tatsächliche Gruppenzugehörigkeit	Prognostizierte Gruppenzugehörigkeit											G.
	AC	CO	EN	GL	GU	MA	ME	PS	QU	RO	TA	
<i>Acrocomia aculeata</i> (AC)	6 (75)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (25)	8
<i>Cocos nucifera</i> (CO)	0 (0)	0 (0)	15 (50)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	14 (47)	0 (0)	1 (3)	30
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (EN)	0 (0)	0 (0)	7 (78)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (11)	0 (0)	0 (0)	1 (11)	9
<i>Gliricida sepium</i> (GL)	7 (23)	0 (0)	1 (3)	0 (0)	2 (7)	0 (0)	0 (0)	13 (44)	7 (23)	0 (0)	0 (0)	30
<i>Guazuma ulmifolia</i> (GU)	2 (13)	0 (0)	3 (19)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	5 (31)	0 (0)	6 (37)	16
<i>Mangifera indica</i> (MA)	4 (13)	0 (0)	0 (0)	16 (53)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	8 (27)	2 (7)	0 (0)	0 (0)	30
<i>Melicoccus bijugatus</i> (ME)	2 (13)	0 (0)	9 (56)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (25)	0 (0)	1 (6)	16
<i>Pseudosamanea guachapele</i> (PS)	4 (15)	0 (0)	1 (4)	0 (0)	1 (4)	0 (0)	0 (0)	18 (69)	1 (4)	0 (0)	1 (4)	26
<i>Quararibea cordata</i> (QU)	2 (7)	0 (0)	9 (30)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	18 (60)	0 (0)	0 (0)	30
<i>Roystonea regia</i> (RO)	18 (62)	0 (0)	10 (34)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	29
<i>Tamarindus indica</i> (TA)	1 (6)	0 (0)	9 (50)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (6)	0 (0)	7 (38)	18
Gesamt	46	0	64	16	3	0	0	44	52	0	19	242

Tabelle 5.4: Klassifizierungsergebnisse für die Trainingsdaten von Santa Fé de Antioquia anhand des ML-Verfahrens. Jede Reihe stellt die Fallanzahl und die relativen Häufigkeiten (in Klammern) der klassifizierten Individuen für tatsächliche Baumartzugehörigkeit dar (Spalte links). In der Hauptdiagonale stehen die Fallzahlen bzw. Trefferquoten der korrekt klassifizierten Individuen jeder Art. Alle anderen Zahlen geben die zur falschen Baumart zugeordnete Anzahl der Klassifizierung wieder. Beispiel vorletzte Zeile Spalte 1 (*Tamarindus indica*), hat eine (1) Zuordnung zu *Acrocomia aculeata* (AC), entsprechen 6% Fehlzuordnung zu AC usw (G.:Gesamt).

Gruppen	Prognostizierte Gruppenzugehörigkeit											G.
	AC	CO	EN	GL	GU	MA	ME	PS	QU	RO	TA	
AC	4 (57)	0 (0)	3 (43)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	7
CO	7 (6)	0 (0)	55 (46)	0 (0)	1 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	44 (37)	0 (0)	12 (10)	119
EN	2 (22)	0 (0)	5 (56)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (11)	1 (11)	0 (0)	0 (0)	9
GL	5 (17)	0 (0)	9 (30)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	15 (50)	1 (3)	0 (0)	0 (0)	30
GU	1 (6)	0 (0)	7 (44)	0 (0)	2 (13)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (37)	16
MA	21 (18)	0 (0)	35 (29)	0 (0)	1 (1)	3 (2)	0 (0)	31 (26)	21 (17)	0 (0)	8 (7)	120
ME	0 (0)	0 (0)	7 (44)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	8 (50)	0 (0)	1 (6)	16
PS	6 (23)	0 (0)	7 (27)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	13 (50)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	26
QU	5 (9,5)	0 (0)	1 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	5 (9,5)	42 (79)	0 (0)	0 (0)	53
RO	9 (31)	0 (0)	17 (59)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (10)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	29
TA	3 (17)	0 (0)	11 (61)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (22)	18
Gesamt	63	0	157	0	4	3	0	68	117	0	31	443

Tabelle 5.5: Klassifizierungsergebnisse für die Testdaten von Santa Fé de Antioquia anhand des ML-Verfahrens. Zur Erläuterung siehe Tabelle 5.4

\bar{b}_j sind diejenigen, die am meisten zur Unterschiedlichkeit der Gruppen beitragen. Von diesen schnitten die farbbezogenen Merkmale: Helligkeit (H), Blau (B) und Rot (R) am besten ab. Textur-Merkmale wie die Standardabweichung der Blau- und Farbton- Kanäle waren auch wichtig für die linearen Modelle. Wenn die Variablen isoliert analysiert wurden, waren die formbezogenen Variablen Kompaktheit, Kronenbreite und Umfang die Markantesten.

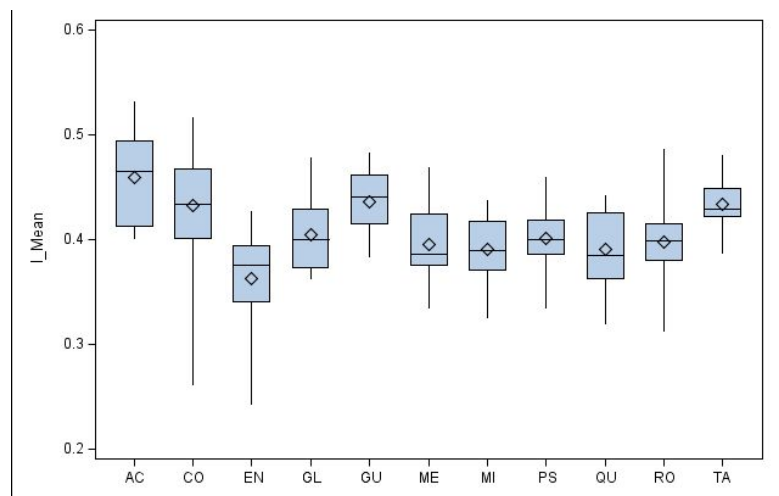
Merkmalsvariable	Mittlere Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j)	F-Statistik
Helligkeit (I_{Mean})	2,80	7,70
Blau (B_{Mean})	2,13	14,04
Rot (R_{Mean})	2,12	7,85
Standardabweichung des Blaukanals (B_{SD})	1,65	40,98
Standardabweichung der Helligkeit (I_{SD})	1,49	33,83
Kompaktheit (K)	1,39	119,31
Kronenbreite (KB)	1,33	56,47
Normalisierter Grünkanal (G_{Norm})	0,82	8,01
Umfang (U)	0,71	41,62
Standardabweichung des normalisierten Grünkanals ($GNorm_{SD}$)	0,68	32,64

Tabelle 5.6: Trennfähigkeit der wichtigsten Variablen in den Diskriminierungsfunktionen. Die F-Statistik gibt die univariate Signifikanz dieser Variablen an.

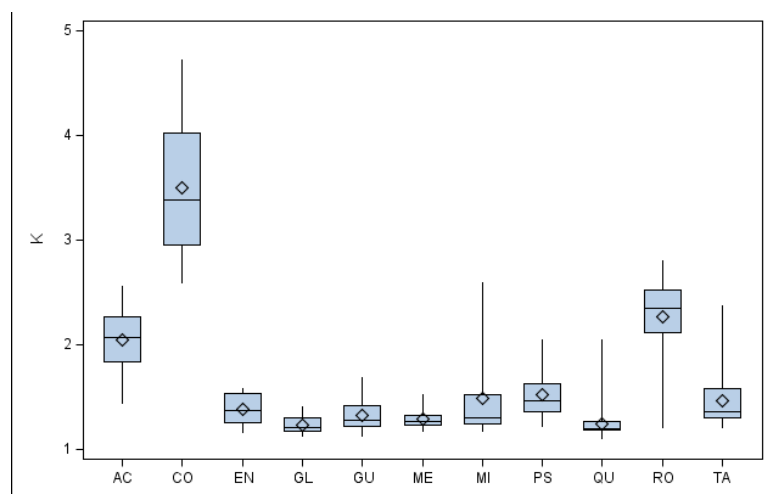
In der Abbildung 5.1 ist es zu sehen, wie sich die Variablen Helligkeit (I_{Mean}) und Kompaktheit (K) entsprechend den Baumarten verteilen. Bei der Intensität/Helligkeit zeigen alle Baumarten, außer *Enterolobium cyclocarpum* (EN), eine starke Überlappung ihrer Streuung. Die Kompaktheit (eine Maßzahl der Form) hingegen deutet darauf hin, dass Baumarten wie die sternförmigen Palmenarten *Cocus nucifera* (Kokosnusspalme), *Roystonea regia* und *Acrocomia aculeata*, mit relativ kleinen Kronen, verhältnismäßig gut differenziert werden können. Sie zeigen aber eine beträchtliche Streuung im Vergleich zu anderen Baumarten.

Die relative Wichtigkeit jeder Diskriminanzfunktion wird in der Regel durch ihren Eigenwertanteil angegeben. Dieser betrug 42% für die erste, 16% für die zweite und 14% für die dritte kanonische Funktion. Das bedeutet, dass circa 73% der Variabilität der Daten durch diese drei linearen Kombinationen der Variablen erläutert werden kann. Trotzdem ist allein bei der graphischen Analyse der ersten Diskriminanzfunktionen keine deutliche Trennung der Arten abzuleiten, wie in der Darstellung der Daten auf den ersten zwei kanonischen Funktionen in der Abbildung 5.2 zu entnehmen ist.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse bei der Klassifizierung nach Merkmalstypen



(a) Helligkeit



(b) Kompaktheit

Abbildung 5.1: Blockgrafik (Boxplot) der Merkmalsvariablen Helligkeit (I_{Mean}), links, und Kompaktheit (K), rechts.

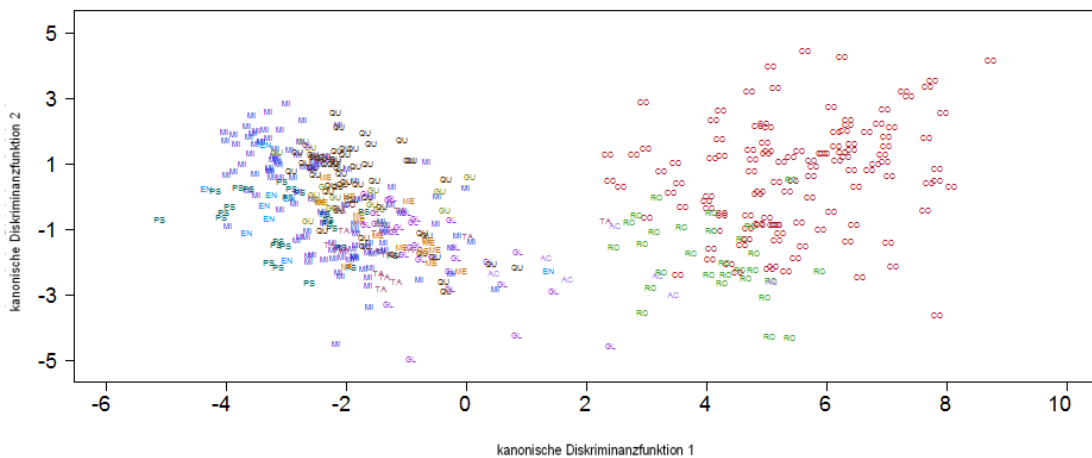


Abbildung 5.2: Erste kanonische Diskriminanzfunktionen bei der Klassifizierung der Trainingsdaten von Medellín. Die Kurzbezeichnungen für die Arten können in Tabelle 5.2 nachgeschlagen werden.

kann in der Tabelle 5.7 für die Stichprobe (Kreuzvalidierung) und die Testdaten (Klassifizierung) verglichen werden. Daraus geht hervor, dass die Anwendung einer Kombination von mehreren Merkmalstypen das beste Ergebnis mit Trefferquoten von über 80% für die Stichprobe und 48% für die Testdaten ergibt. Die Textur-Variablen zeigten eine besonders vielversprechende Trefferquote von 72% von korrekt klassifizierten Individuen bei der Stichprobe. Die eine 3D-Gestalt beschreibenden Variablen weisen hingegen die niedrigste diskriminatorische Fähigkeit auf.

Merkmalstyp	Trefferquote (%)		Baumarten mit Trefferquote bei der Klassifizierung neuer Elemente > 50%
	Kreuzvalidierung	Klassifizierung	
Farbe	60,6	43,5	EN (78), QU (74), GU (62), GL (50), ME (50)
Textur	72,6	43,3	ME (81), EN (79), QU (77), AC (71)
Form	40	33,3	QU (93), RO (83), PS (50)
3D-Gestalt	40,1	27,9	RO (86), ME (69)
Gesamt	81,2	48,4	ME (100), RO (90), QU (72), AC (57), CO (51), PS (50)

Tabelle 5.7: Erreichte Trefferquote bei der Verwendung der Diskriminanzanalyse und verschiedener Merkmalstypen im Untersuchungsgebiet von Santa Fé de Antioquia (GSD von 10 cm).

Die Trefferquoten für jede einzelne Baumart werden in den Tabellen 5.8 und 5.9 für die Stichprobe (Trainingsdaten) und die Testdaten wiedergegeben. Daraus lässt sich erkennen, dass alle Baumarten bei den Trainingsdaten hochprozentig klassifiziert wurden, insbesondere die Palmen *Acrocomia aculeata* und *Cocos nucifera* mit Trefferquoten von 100%. Das war jedoch nicht der Fall bei den Testdaten, wobei fünf Baumarten nicht einmal 50% erreichten und nur *Melicoccus bijugatus* (100%) sowie *Roystonea regia* (90%) diesmal äußerst gut abschnitten.

Gruppen	Prognostizierte Gruppenzugehörigkeit											G
	AC	CO	EN	GL	GU	MA	ME	PS	QU	RO	TA	
AC	8 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	8
CO	0 (0)	30 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	30
EN	0 (0)	0 (0)	5 (56)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (44)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	9
GL	0 (0)	0 (0)	0 (0)	26 (87)	4 (13)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	30
GU	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (6)	10 (62)	3 (19)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (13)	16
MA	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	27 (90)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (7)	30
ME	0 (0)	0 (0)	2 (12)	0 (0)	0 (0)	2 (12)	10 (63)	1 (6)	1 (6)	0 (0)	0 (0)	16
PS	0 (0)	0 (0)	4 (15)	0 (0)	1 (4)	3 (12)	0 (0)	17 (65)	0 (0)	0 (0)	1 (4)	26
QU	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (7)	0 (0)	0 (0)	28 (93)	0 (0)	0 (0)	30
RO	1 (3)	2 (7)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	1 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	24 (83)	0 (0)	29
TA	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (6)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	17 (94)	18
Gesamt	9	32	11	27	17	39	10	22	29	24	22	242

Tabelle 5.8: Klassifizierungsergebnisse für Santa Fé de Antioquia bei der Anwendung der linearen Diskriminanzanalyse auf die Trainingsdaten. Zur Erläuterung siehe Tabelle 5.4.

Gruppen	Prognostizierte Gruppenzugehörigkeit											G.
	AC	CO	EN	GL	GU	MA	ME	PS	QU	RO	TA	
AC	4 (57)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (43)	0 (0)	7
CO	4 (3)	61 (51)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1)	52 (44)	1 (1)	119
EN	0 (0)	0 (0)	2 (22)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (67)	0 (0)	0 (0)	1 (11)	0 (0)	9
GL	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (10)	3 (10)	2 (7)	19 (63)	0 (0)	0 (0)	3 (10)	0 (0)	30
GU	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (19)	0 (0)	13 (81)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	16
MA	0 (0)	0 (0)	4 (3)	3 (2)	8 (7)	34 (28)	49 (41)	4 (3)	8 (7)	0 (0)	10 (9)	120
ME	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	16 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	16
PS	0 (0)	0 (0)	3 (11)	0 (0)	1 (4)	0 (0)	9 (35)	13 (50)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	26
QU	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (6)	0 (0)	12 (22)	0 (0)	38 (72)	0 (0)	0 (0)	53
RO	3 (10)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	26 (90)	0 (0)	29
TA	1 (6)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	11 (61)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (33)	18
Gesamt	12	61	9	6	18	36	135	17	47	85	17	443

Tabelle 5.9: Klassifizierungsergebnisse für Santa Fé de Antioquia bei der Anwendung der linearen Diskriminanzanalyse auf die Testdaten. Zur Erläuterung siehe Tabelle 5.4.

5.4.2 Medellín (GSD 20 cm)

Maximum-Likelihood-Algorithmus (ML) Die erreichten Trefferquoten für jede analysierte Art sind in den Tabellen 5.10 und 5.11 durch die Klassifikationsmatrizen der Stichprobe und der Testdaten wiedergegeben. Die gesamte Trefferquote in der Untersuchungsstichprobe betrug 43%, die auf 26% für die Testdaten geschrumpft ist.

Unter den Arten erreichten nur drei eine Trefferquote von > 50% in beiden Klassifizierungen, nämlich *Erythrina fusca* (ErFu), *Eucalyptus sp* (EuSp), und *Pseudobombax septenatum* (PsSe). Die höchsten Werte gehören zu EuSp (87%) in der Stichprobe und PsSe (87%) in den Testdaten.

Baumarten wie *Pithecellobium dulce* (PiDu), *Psidium guajaba* (PsGu), *Spathodea campanulata* (SpCa) und *Tabebuia rosea* (TaRo) hatten keinen Treffer bei den Testdaten und wurden ständig mit ErFu oder EuSp verwechselt.

Gruppen	Prognostizierte Gruppenzugehörigkeit											G.
	ErFu	EuSp	FiBe	JaMi	MaIn	PiDu	PsGu	PsSe	RoRe	SpCa	TaRo	
ErFu	21 (72)	2 (7)	1 (3)	2 (7)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	2 (7)	29
EuSp	3 (13)	20 (87)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	23
FiBe	12 (48)	3 (12)	5 (20)	2 (8)	0 (0)	0 (0)	1 (4)	0 (0)	2 (8)	0 (0)	0 (0)	25
JaMi	1 (9)	0 (0)	1 (9)	6 (55)	0 (0)	0 (0)	1 (9)	0 (0)	0 (0)	1 (9)	1 (9)	11
MaIn	5 (17)	1 (3,5)	1 (3,5)	9 (31)	8 (28)	1 (3,5)	3 (10)	0 (0)	1 (3,5)	0 (0)	0 (0)	29
PiDu	1 (9)	0 (0)	3 (27)	3 (27)	0 (0)	3 (27)	1 (9)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	11
PsGu	1 (4,6)	0 (0)	0 (0)	13 (59)	0 (0)	0 (0)	4 (18)	1 (4,6)	1 (4,6)	0 (0)	2 (9)	22
PsSe	2 (25)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	5 (62)	0 (0)	1 (12)	0 (0)	8
RoRe	6 (20)	7 (23)	5 (17)	2 (7)	1 (3)	0 (0)	2 (7)	0 (0)	7 (23)	0 (0)	0 (0)	30
SpCa	1 (5)	0 (0)	0 (0)	3 (16)	1 (5)	0 (0)	2 (11)	3 (16)	0 (0)	5 (26)	4 (21)	19
TaRo	1 (10)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (20)	0 (0)	1 (10)	6 (60)	10
Gesamt	54	33	16	40	10	4	14	11	11	9	15	217

Tabelle 5.10: Klassifizierungsergebnisse für die Trainingsdaten von Medellín anhand des ML-Verfahrens. Zur Erläuterung siehe Tabellen 5.3 und 5.4.

Gruppen	Prognostizierte Gruppenzugehörigkeit											G.
	ErFu	EuSp	FiBe	JaMi	MaIn	PiDu	PsGu	PsSe	RoRe	SpCa	TaRo	
ErFu	29 (74)	1 (3)	7 (17)	0 (0)	1 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	0 (0)	39
EuSp	3 (13)	18 (82)	1 (5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	22
FiBe	6 (24)	11 (44)	7 (28)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	25
JaMi	5 (50)	1 (10)	2 (20)	1 (10)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (10)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	10
MaIn	12 (41)	5 (17)	7 (24)	2 (7)	1 (3)	0 (0)	1 (3)	0 (0)	1 (3)	0 (0)	0 (0)	29
PiDu	4 (36)	1 (9)	4 (36)	1 (9)	1 (9)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	11
PsGu	17 (81)	2 (9)	1 (5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (5)	0 (0)	21
PsSe	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	7 (87)	0 (0)	0 (0)	1 (23)	8
RoRe	61 (72)	10 (12)	10 (12)	0 (0)	2 (2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (2)	0 (0)	0 (0)	85
SpCa	16 (85)	1 (5)	1 (5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	19
TaRo	2 (20)	1 (10)	1 (10)	1 (10)	1 (10)	1 (10)	0 (0)	0 (0)	1 (10)	2 (20)	0 (0)	10
Gesamt	155	51	41	5	6	1	2	9	4	4	1	279

Tabelle 5.11: Klassifizierungsergebnisse für die Testdaten von Medellín anhand des ML-Verfahrens. Zur Erläuterung siehe Tabellen 5.3 und 5.4.

Diskriminanzanalyse (LDA) Die univariate und die gemeinsame diskriminatorische Trennfähigkeit der wichtigsten 10 Merkmalsvariable sind jeweils durch die F -Statistik und die mittleren Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j) in Tabelle 5.12 wiedergegeben. Die Variablen mit den höchsten Werten \bar{b}_j sind die formbezogenen Merkmale Kronenbreite, Umfang und Kompaktheit. Textur-Merkmale wie Entropie und die Standardabweichung der B - und I -Kanäle sind ebenfalls wichtig für die linearen Modelle.

Merkmalsvariable	Mittlere Diskriminanzkoeffizienten (\bar{b}_j)	F -Statistik
Kronenbreite (KB)	5,09	53,38
Umfang (U)	3,63	38,98
Kompaktheit (K)	2,89	133,02
Entropie (Ent)	1,21	63,25
F (Fläche)	0,94	30,79
Helligkeit (I_{Mean})	0,93	20,75
Standardabweichung der Blaukanal (B_{SD})	0,87	11,69
Standardabweichung der Helligkeit (I_{SD})	0,76	11,15
Normalisiertes Blaukanal (B_{Norm})	0,72	24,8
Normalisiertes Grünkanal (G_{Norm})	0,66	22,6

Tabelle 5.12: Trennfähigkeit der wichtigsten Variablen in den Diskriminierungsfunktionen. Die F -Statistik gibt die univariate Signifikanz dieser Variablen an.

Der Eigenwertanteil betrug 56% für die erste, 22% für die zweite und 11% für die dritte kanonische Funktion. Das bedeutet, dass circa 90% der Variabilität der Daten durch diese drei linearen Kombinationen der Variablen erklärt wird. Trotzdem ist allein bei der graphischen Analyse der Diskriminanzfunktionen eine deutliche Trennung der Arten nur bei der Art *Roystonea regia* (RoRe) zu erkennen, wie in der Darstellung der Daten für die ersten zwei kanonischen Funktionen in der Abbildung 5.3 zu entnehmen ist.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse bei der Klassifizierung nach Merkmalstypen kann in der Tabelle 5.13 für die Stichprobe und die Testdaten verglichen werden. Die Anwendung einer Kombination von mehreren Merkmalstypen ergibt das beste Ergebnis mit Trefferquoten um 68% für die Stichprobe und 45% für die Testdaten. Ähnlich wie beim Testgebiet von Santa Fé de Antioquia sind die Textur-Variablen diejenigen, die mit 54% von korrekt klassifizierten Individuen in der Stichprobe am besten abschneiden. Die auf die 3D-Gestalt bezogenen sowie die farbbezogen Variablen weisen hingegen die niedrigste diskriminatorische Fähigkeit auf.

Die Trefferquoten für jede einzelne Baumart werden in den Klassifikationsmatrizen in Tabellen 5.14 und 5.15 für die Trainingsdaten und die Testdaten wiedergegeben. Daraus lässt sich erkennen, dass drei Baumarten (RoRe, mit 100%; FiBe, mit 92% und Eu-

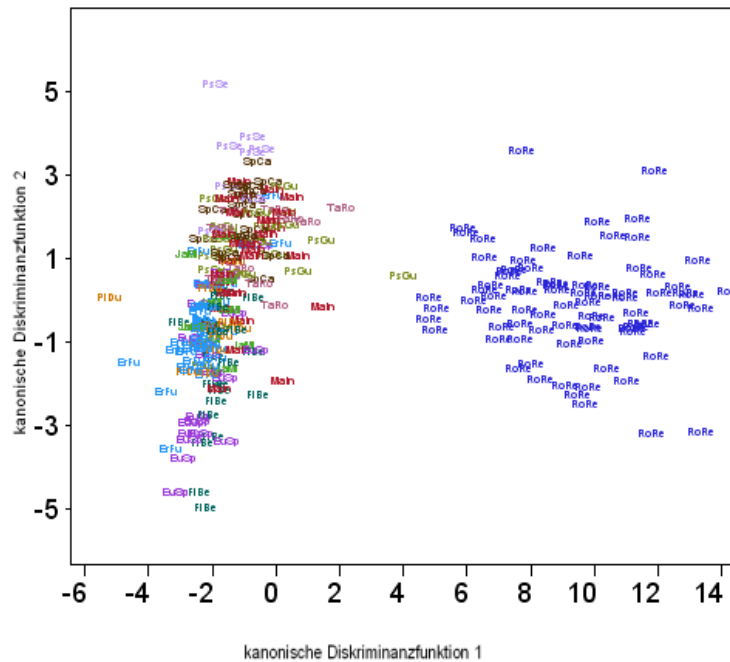


Abbildung 5.3: Erste kanonische Diskriminanzfunktionen bei der Klassifizierung der Trainingsdaten von Santa Fé de Antioquia. Die Kurzbezeichnungen für die Arten können in Tabelle 5.3 gefunden werden.

Merkmalstyp	Trefferquote (%)		Baumarten mit Trefferquote bei der Klassifizierung neuer Elemente > 50%
	Kreuzvalidierung	Klassifizierung	
Farbe	45,3	22,4	PsSe(87), FiBe(60)
Textur	53,9	43,3	PsSe(100), ErFu(85), RoRe(75, 3), FiBe(52)
Form	30,2	30,9	PsSe(87)
3D-Gestalt	31,1	22,8	PsSe(50)
Gesamt	67,9	44,8	RoRe(100), ErFu(90), PsSe(75), MaIn(55, 2)

Tabelle 5.13: Erreichte Trefferquoten bei der Verwendung von verschiedenen Merkmalstypen und der Diskriminanzanalyse im Untersuchungsgebiet von Medellín (GSD von 20 cm).

Sp, mit 87%) bei den Trainingsdaten äußerst gut klassifiziert sind, weitere sechs (ErFu, MaIn, PiDu, PsGu, PsSe und TaRo) weisen Trefferquoten zwischen 60 und 70% auf. In den Testdaten zeigen nur zwei Arten gute Ergebnisse, nämlich *Roystonea regia* (RoRe, mit 100%) und *Erythrina fusca* (ErFu mit 90%). Außer *Pseudobombax septenatum* (PsSe, mit 70%) weist der Rest der Arten Trefferquoten deutlich unter 60% auf.

Gruppen	Prognostizierte Gruppenzugehörigkeit											G.
	ErFu	EuSp	FiBe	JaMi	MaIn	PiDu	PsGu	PsSe	RoRe	SpCa	TaRo	
ErFu	20 (69)	0 (0)	3 (10)	4 (14)	0 (0)	1 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	0 (0)	29
EuSp	0 (0)	20 (87)	3 (13)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	23
FiBe	0 (0)	1 (4)	23 (92)	1 (4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	25
JaMi	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (36)	1 (10)	4 (36)	2 (18)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	11
MaIn	1 (3)	0 (0)	0 (0)	1 (3)	19 (66)	1 (3)	7 (24)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	29
PiDu	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (9)	1 (9)	7 (64)	2 (18)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	11
PsGu	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (9)	2 (9)	2 (9)	14 (64)	0 (0)	0 (0)	1 (4)	1 (4)	22
PsSe	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (25)	0 (0)	0 (0)	5 (62)	0 (0)	1 (12)	0 (0)	8
RoRe	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	30 (100)	0 (0)	0 (0)	30
SpCa	0 (0)	0 (0)	1 (5)	0 (0)	1 (5)	0 (0)	5 (27)	1 (5)	0 (0)	9 (47)	2 (11)	19
TaRo	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (30)	0 (0)	1 (10)	6 (60)	10
Gesamt	21	21	30	13	26	15	30	9	30	13	9	217

Tabelle 5.14: Klassifizierungsergebnisse für Medellín bei der Anwendung von linearen Diskriminanzanalyse auf den Trainingsdaten. Zur Erläuterung siehe Tabelle 5.4.

5.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Klassifizierung sind zwar vielversprechend, insbesondere unter Berücksichtigung der Diskriminanzanalyse mit Kreuzvalidierungs-Verfahren, sie lassen aber auch die bereits bekannten Schwierigkeiten bei der gleichzeitigen Differenzierung von verschiedenen Baumarten erkennen. Wie BOHLMAN & LASHLEE (2005) ausdrückten, ist die Differenzierung aller Baumarten in Waldbeständen mit hoher Artenvielfalt mit den aktuellen Fernerkundungsmethoden fast unmöglich und nur die häufig auftretenden Baumarten oder die Baumarten mit außergewöhnlichen spektralen oder geometrischen Eigenschaften könnten gut erkannt werden. Aus der Gesamtheit von 11

Gruppen	Prognostizierte Gruppenzugehörigkeit											G.
	ErFu	EuSp	FiBe	JaMi	MaIn	PiDu	PsGu	PsSe	RoRe	SpCa	TaRo	
ErFu	35 (90)	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	39
EuSp	3 (14)	7 (32)	4 (18)	2 (9)	0 (0)	4 (18)	1 (4)	0 (0)	0 (0)	1 (4)	0 (0)	22
FiBe	3 (12)	3 (12)	11 (44)	5 (20)	0 (0)	2 (8)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (4)	0 (0)	25
JaMi	7 (70)	0 (0)	0 (0)	1 (10)	2 (20)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	10
MaIn	1 (3,5)	1 (3,5)	0 (0)	5 (17)	16 (55)	2 (7)	0 (0)	1 (3,5)	0 (0)	3 (10,5)	0 (0)	29
PiDu	2 (18)	0 (0)	0 (0)	5 (45,5)	0 (0)	4 (36,5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	11
PsGu	3 (14)	0 (0)	0 (0)	1 (5)	3 (14)	3 (14)	2 (10)	0 (0)	0 (0)	8 (38)	1 (5)	8
PsSe	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (75)	0 (0)	0 (0)	2 (25)	21
RoRe	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	85 (100)	0 (0)	0 (0)	85
SpCa	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (11)	7 (37)	0 (0)	0 (0)	1 (5)	0 (0)	8 (42)	1 (5)	19
TaRo	0 (0)	0 (0)	0 (0)	5 (50)	3 (30)	1 (10)	0 (0)	0 (0)	1 (10)	0 (0)	0 (0)	10
Gesamt	54	11	16	28	32	15	4	8	85	22	4	279

Tabelle 5.15: Klassifizierungsergebnisse für Medellín bei der Anwendung von linearen Diskriminanzanalyse auf den Testdaten. Zur Erläuterung siehe Tabelle 5.4.

hier analysierten Baumarten je Parzelle erreichten im besten Fall (Parzelle Santa Fé de Antioquia) 7 davon Trefferquoten über 80% bei der Anwendung von linearer Diskriminanzanalyse mit der Stichprobe. Die mittlere Trefferquote aller 11 Baumarten erreichte dabei 81%. Somit sind diese Ergebnisse nicht abweichend von denen aus Arbeiten mit ähnlicher Anzahl an Baumarten wie WASER ET AL. (2011) mit 7 Baumarten und 76%; LUCAS ET AL. (2008B) mit 8 Arten und 87% und CLARK ET AL. (2005) mit 7 Arten und 92%. Bei diesen Untersuchungen tropischer Wälder handelt es sich allerdings ausschließlich um 11 ausgewählte Spezies der am häufigsten auftretenden Laubbaumarten in einem artenreichen Gesamtbestand (ca. 45-50 Baumarten).

Die hier verwendeten überwachten Klassifikationsmethoden, nämlich die Maximum-Likelihood (ML) und die lineare Diskriminanzanalyse (LDA), haben unterschiedliche Leistungen erbracht. Die nur auf RGB-Kanäle basierte ML-Methode hat ihre Einschränkungen bestätigt, indem sich stets allgemeine Trefferquoten kleiner als 50% bei der Klassifizierung ergaben und weniger als die Hälfte der vorhandenen Baumarten akzeptabel identifiziert werden konnte. Ein Teil davon lässt sich durch die große Variabilität der spektralen Laubeigenschaften innerhalb einer Art und sogar eines Individuums erklären (COCHRANE (2000)), die sich wiederum sehr schwer nur durch einfache Maßnahmen aus den Signaturdaten erfassen lassen. Andererseits haben bereits frühere Untersuchungen gezeigt, dass eine bessere Trennbarkeit möglich ist, wenn eine Pixelaggregation in der zugehörigen Krone durchgeführt wird und diese in ein Klassifikationsschema auf der Basis der so zusammengestellten Objekte (aggregierte Pixel) einbezogen wird (CLARK ET AL. (2005)). Daraus entstehen die so genannten räumlichen Eigenschaften, wie Textur oder Form, die in anderen Klassifikationsmethoden genutzt werden können, wie zum Beispiel in der Diskriminanzanalyse. Diese aus der Literatur über Baumklassifikationsmethoden erwarteten Tendenzen haben sich in dieser Arbeit vollständig bestätigt.

Bei der LDA wurden Trefferquoten zwischen 45 und 81% erreicht. Die besten Ergebnisse wurden immer mit dem Trainingsdatensatz erzielt, wie es allgemein üblich ist. Zum Beispiel ergaben die Untersuchungen von LUCAS ET AL. (2008B) auch eine solche Abnahme der Erfolgsquoten von 87 auf 75% bei der Klassifikation von 8 Baumarten in Australien (siehe Tabelle 5.1). Somit ist die Trefferquote immer höher, wenn sie auf der Basis derselben Stichprobe berechnet wird, die auch für die Ableitung der Diskriminanzfunktionen eingesetzt wird (BACKHAUS & PLINKE (2008)). Sowohl in Santa Fé de Antioquia als auch in Medellín war es jedoch auffällig, dass sich manchmal die guten Ergebnisse einer Baumart in den Trainingsdaten überhaupt nicht in der Klassifikation

neuer Baumindividuen der gleichen Art widerspiegeln. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass es nicht einfach ist, bei überwachten Klassifikationsverfahren repräsentative Bäume auszuwählen, die eine Baumart möglichst gut abbilden. Schon kleine Änderungen in den Trainingsdaten können die Ergebnisse erheblich beeinflussen, wie auch (HEURICH (2006, S.196)) festgestellt hat.

Die LDA ist eine Methode, die bereits mit Erfolg in anderen Untersuchungen bei Artenklassifizierungen Verwendung gefunden hat (beispielsweise FUCHS (2003), WEINACKER ET AL. (2004), CLARK ET AL. (2005) und LUCAS ET AL. (2008B)), vor allem wenn nur wenige Arten beteiligt sind. Diese weist aber auch ihre Schwierigkeiten und Begrenzungen auf. So wird zum Beispiel in der Regel die Eignung der Variablen für eine Klassentrennung durch ein iteratives Auswahlverfahren (schrittweise) durchgeführt, das in der Theorie die nicht optimalen Merkmalsvariablen entfernt. In der Praxis können jedoch hoch korrelierende Variable verbleiben, die tatsächlich nicht viel zu den linearen Modellen beitragen. Ein anderes Problem kann aufgrund einer hohen Anzahl an analysierten Baumarten entstehen, wie es hier mit 11 Baumarten der Fall war. Dies erfordert die Einbeziehung von mehr Merkmalsvariablen als die Anzahl von Arten und eine große Anzahl von Stichproben (Baumindividuen), wenigstens doppelt so groß wie diese Artenanzahl (BACKHAUS & PLINKE (2008)). Das würde eine Klassifizierung nach Baumarten in vielen artenreichen tropischen Gebieten unpraktisch oder ökonomisch unrentabel machen, wo zahlreiche Baumarten nur durch wenige Individuen vertreten sind.

Eine weitere wichtige Voraussetzung der LDA ist die Normalität der Daten. Bei dieser Arbeit wurde durch Vortests ($Q-Q$ -Diagramme) bewiesen, dass die Daten, insbesondere Baumkronen-Pixelwerte, nicht normalverteilt sind. Diese häufig vorkommende Erscheinung der Baumkronen hat schon ZHANG ET AL. (2006) beschrieben. Deshalb wird für die Behandlung solcher Datensätze die nicht lineare oder nicht parametrische Diskriminanzanalyse empfohlen. Doch erwies sich diese hier in den durchgeführten Proben nicht als sinnvoll, da die daraus ergebenden Trefferquoten deutlich zurückgegangen sind. Weiterhin gibt es die Methode der logistischen Regression, die auf nicht normalverteilte Daten angewandt werden kann. Sie kann dabei helfen, die eingangs erwähnte Behinderung zu umgehen, wie WASER ET AL. (2011) bei der Klassifizierung von 11 Baumarten herausfanden. Es bleibt jedoch das Problem der Verfügbarkeit an genügend diskriminatorischen Variablen, welche artenweise eine ideale geringe Streuung und eine markante Differenzierung ihrer Mittelwerte zeigen können.

Mehrere Autoren haben schon die Bedeutung der Kombination von verschiedenen Klassifikationsmerkmalen hervorgehoben (z.B. FUCHS (2003), HEURICH (2006)). Im Rahmen dieser Arbeit wurden 33 Variable und vier Variablengruppen (Farbe, Textur, Form, 3D-Gestalt) untersucht, von denen insbesondere die Texturmerkmale bei getrennter Anwendung die besten Ergebnisse zeigten, die nur von der Kombination aller Merkmale übertroffen werden. Bei der Texturanalyse ragten einfach gewonnene Merkmale wie die Standardabweichung der Blau(*B*)- und Intensität/Helligkeit (*H*)-Kanäle hervor. Die aus der GLCM (Grauwert-Abhängigkeits-Matrix) ermittelten Maße haben hingegen nicht immer gut abgeschnitten. Nur die Entropie bei der 20 cm- Auflösung hat eine deutliche Unterscheidungsfähigkeit erbracht. In dieser Hinsicht haben TRIAS-SANZ ET AL. (2008) festgestellt, dass die Haralick-GLCM (HARALICK ET AL. (1973)) unter Verwendung von hochauflösten Fernerkundungssystemen nicht besonders diskriminativ wirkt. Autoren wie HEURICH (2006, S.194) haben herausgefunden, dass aus zehn evaluierten Texturparametern keiner einen signifikanten Beitrag zur Klassifizierung der Bäume leistete.

Die Textur ist ein Merkmal, das bereits in anderen Klassifikationsanwendungen einen positiven Einfluss auf die Ergebnisse erbracht hat (z.B. ZHU & YANG (1998), BOHLMAN & LASHLEE (2005), GE ET AL. (2006)). Trotzdem ist diese Eigenschaft aufgrund ihrer Abhängigkeit von anderen Bedingungen (z.B. Beleuchtung und Maßstab) und ihrer räumlichen Unregelmäßigkeiten nicht einfach zu erfassen. Während die formbezogenen Variablen (Kompaktheit, Umfang, Kronenbreite usw.) hier bei der Artdifferenzierung eine wichtige Rolle spielten, erwiesen sich die 3D-gestaltbezogenen Merkmale aus Höhendaten als geringfügig nützlich. Andere Forscher haben hingegen hervorragende Verbesserungen bei der Einbeziehung von Messgrößen aus Laserscanningsdaten erzielt, insbesondere bei der Unterscheidung zwischen Nadel- und Laubbäumen (HEURICH (2006, S.195), PERSSON ET AL. (2006)). Dabei erreichten sie Genauigkeiten von über 90 bis fast 100%. Auch Fuchs (2003) konnte bei der Trennung zwischen Eiche und Buche feststellen, dass die aus DOM gewonnenen Merkmale, nämlich Gaußsche Krümmung und Kronenrauigkeit, sich stärker auswirkten als Farb- oder Texturmerkmale. Allerdings bleibt bei Laubhölzern die Erkennung einzelner Arten nur auf Basis der Kronenformen schwierig (SCHNEIDER (1974, S.293)).

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich schwer mit anderen in den tropischen Regionen vergleichen, die überwiegend auf der Verwendung von Hyperspektraldaten basieren. Die Arbeiten von CLARK ET AL. (2005) und LUCAS ET AL. (2008B) gehören dazu (siehe Tabelle 5.1). Diese verfügten trotz geringer räumlicher Auflösung über erheblich

mehr spektrale Information. Allein die Einbeziehung des NIR (Nahes-Infrarot)-Kanals kann erhebliche Verbesserungen zu den Klassifikationsergebnissen beitragen (WASER ET AL. (2011)).

Schließlich ist zu betonen, dass tendenziell bessere Ergebnisse mit größerer Auflösung des Orthophotomosaiks (10 cm) als mit 20 cm erzielt werden, wenn die LDA zum Einsatz kommt. Das Gegenteil wurde für die Anwendung von Maximum-Likelihood-Verfahren gefunden. Das kann auf die größere Homogenität der Farbkomponenten bei den niedrigeren Auflösungen zurückgeführt werden, während die einwirkende Rolle von Schattierungen, Farbmischungen, Texturen und anderen Baumkronenkomponenten stärker ausgeprägt bei der größeren Auflösung zu erwarten ist. Dabei könnte die Anwendung der Transformation IHS (hier durch den Intensität-Kanal am besten repräsentiert) helfen, diese Schwierigkeiten abzumildern (CHENG ET AL. (2001)). Eindeutige Schlussfolgerungen über den Vergleich beider untersuchten Auflösungen können jedoch nicht gezogen werden, da die Aufnahmebedingungen zu ungleich waren.

5.6 Zusammenfassung der Baumartenerkennung

Anhand der im Orthophotomosaik und den digitalen Oberflächenmodellen enthaltenen Informationen wurde die Trennbarkeit der Baumarten in tropischen Baumbeständen untersucht. Zwei Auflösungen (10 und 20 cm) und zwei Methoden (Maximum Likelihood/ML und lineare Diskriminanzanalyse/LDA) wurden zu Klassifikationszwecken eingesetzt. Das Ziel war dabei, so viel wie möglich Baumarten zu klassifizieren, von denen sich 11 Baumarten je Untersuchungsgebiet als brauchbar erwiesen. Die besten Ergebnisse (mittlere Trefferquote von 81%) wurden bei der Anwendung von LDA mit 21 Variablen in den Trainingsdatensätzen gefunden. Bei der Kreuzvalidierung mit LDA und einer GSD von 10 cm wurden sieben Baumarten mit Trefferquoten von über 80% korrekt klassifiziert, während dieser Anteil bei einer GSD von 20 cm auf vier Baumarten zurückging. Die Klassifikationsergebnisse haben auch gezeigt, dass die Einbeziehung von anderen Merkmalstypen außer der Farbe sinnvoll war. Die Texturmerkmale waren diejenigen, die isoliert mit Trefferquoten von maximal 72% am besten abgeschnitten haben.

Kapitel 6

Fazit

Die vorliegende Arbeit repräsentiert eine der ersten, nach Stand der Recherchen sogar die erste publizierte, Untersuchungen der Anwendbarkeit von Methoden aus der digitalen Photogrammetrie, Bildverarbeitung und Objekterkennung zur automatischen Erfassung, Differenzierung und Klassifizierung von Bäumen in verschiedenen Baumbeständen in Kolumbien. Außerdem befasst sie sich mit der Erkennung von Ölpalmenindividuen einer Plantage in Ecuador.

Aus den durchgeführten Analysen können die folgenden Ergebnisse und Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Der Einsatz von frei zugänglichen Datenquellen (Landsat- und SRTM-Datensätzen) als Referenzdaten für die Aerotriangulation lässt eine ausreichende Lage- und Höhengenaugkeitsbestimmung für die Inventur von Baumbeständen zu, was eine deutliche Reduktion der Kosten bewirkt.
- Mittelformatige Kameras wie die Rollei-Metric stellen Bilder von guter und preiswertiger spektraler Qualität bereit. Sie benötigen jedoch die Berücksichtigung von speziellen Parametern für die Kalibrierung. Die voll automatische Generierung von genügend und gleichverteilten Verknüpfungspunkten in den Bildern ohne Sensororientierungsparameter ist noch ein Engpass für die komplette Automatisierung der Prozesskette.
- Photogrammetrische Softwarepakete sind bei gleichzeitig niedrigeren Kosten

schon in der Lage eine vergleichbare Genauigkeit bei der Erstellung digitaler Oberflächenmodelle der Baumkronen in tropischen Bereichen anzubieten wie die Lasersysteme. Bei der Modellierung des Geländes weisen diese Programme aber noch relativ hohe Ungenauigkeiten, insbesondere in nicht flachen (gebirgigen) Gebieten auf. Neue Filterverfahren sollten die Kronenoberfläche aufgrund der Unsichtbarkeit des Bodens in geschlossenen Baumbeständen berücksichtigen.

- Digitale Kronenmodelle können zu einer zuverlässigen automatischen Detektion von Ölpalmenindividuen in Monokulturen verwendet werden. In Gegensatz dazu ist die Abgrenzung von tropischen Laubbaumindividuen in geschlossenen Baumbeständen aufgrund der Arten-, Formen- und Stratenvielfalt besonders schwierig. Farbe und Textur sollten in neuen Ansätzen der Bildauswertung intensiver einbezogen werden.
- Bestimmte aus Orthophotomosaiken und digitalen Kronenmodellen abgeleitete Parameter können zur Charakterisierung einzelner Baumarten identifiziert werden. Es ist jedoch schwer, den gesamten Baumbestand in eindeutiger Weise zu bestimmen. Je mehr Baumarten vorhanden sind, desto schwieriger wird die Aufgabe ihrer Identifizierung und Klassifizierung.

Diese Arbeit kann als Basis für den Aufbau einer (semi-) automatischen Methodik zur Untersuchung von Baumarten und Waldökosystemen in tropischen Bereichen dienen.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Anwendung von photogrammetrischen Methoden zur automatischen Erfassung von verschiedenen tropischen Waldbeständen aus hochauflösenden mittelformatigen Luftbildern und Oberflächenmodellen vorgestellt. Überdies wurden Bildanalyse- und statistische Verfahren zur Baumkronenabgrenzung und Baumklassifizierung ausgewertet, die bisher ganz überwiegend an außertropischen Beispielen entwickelt wurden. Für die Kronenabgrenzung wurde eine eigene Methode entwickelt.

Ziele der vorliegenden Untersuchung waren:

- Auswertung einer auf Luftbildern basierenden Methodik zur Erfassung der Baumbestände in tropischen Gebieten mit aus Satelliten gewonnenen Passpunkten.
- Entwicklung eines Algorithmus auf Basis digitaler Kronenmodelle für die automatische Identifizierung von Ölpalmenindividuen und Übertragung ihrer Anwendung auf einen tropischen Trockenwald.
- Analyse des Klassifizierungspotentials einiger tropischen Baumarten anhand von Baummerkmalen die aus Orthophotomosaiken und digitalen Kronenmodellen gewonnen wurden.

Die Anwendung von aus Landsat-Satellitenbildern entnommenen Passpunkten hat akzeptable teilweise sogar überraschend gute Ergebnisse bei der Bildaerotriangulation erbracht. Dieses Vorgehen erscheint daher erfolgversprechend für Baumbestandscharakterisierungen. Es kann eine Genauigkeit bei der räumlichen Ortsbestimmung eines Baumes im Bereich von 10-20 m erwartet werden. Diese Methode bietet daher eine Alternative zu herkömmlichen DGPS-Messungen im Feld an, die in geschlossenen Tropenwäldern äußerst schwierig und besonders in Kolumbien manchmal problematisch, wenn nicht unmöglich ist.

Es konnte bestätigt werden, dass die aktuellen photogrammetrischen Softwarepakete eine Qualität bei der Generierung von digitalen Oberflächenmodellen bieten, die eine genaue Modellierung des sichtbaren Teiles einer Baumkrone bereits ermöglicht. Allerdings können bei bestimmten Kronenformen, wie der von Palmen, Schwierigkeiten auftreten. Anders liegt der Fall bei der Erstellung von digitalen Geländemodellen, aus denen wichtige Parameter wie die Baumhöhe indirekt ermittelt werden. Dafür ist das Laserverfahren Lidar vorzuziehen. Obwohl für die Berechnung der mittleren Baumhöhe eines Waldbestandes und somit ihres Volumens bzw. ihrer Biomasse die photogrammetrischen Rechenmodelle ausreichen, führen diese bei der Höhenbestimmung einzelner Bäume in der Regel zu einer deutlichen Unterschätzung der tatsächlichen Werte.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Baumkronensegmentierung basiert auf der systematischen Anwendung von mehreren Ebenen des Maßstabraums zur Detektion von Baumspitzen und deren Ausdehnung in benachbarte Pixel. Außerdem wurden die Minima zwischen Kronenrändern in die Trennung einbezogen. Diese Methode hat bei Palmenplantagen gute Ergebnisse erbracht. Die Schwierigkeiten bei der Trennung der Kronen in natürlichen Waldbeständen waren allerdings offensichtlich. Faktoren wie die starke Überlappung der Krone, abgeflachte Kronenformen oder das Auftreten von mehreren Spitzen in einem Baumindividuum waren schwer zu modellieren und trugen daher zu Fehldeutungen bei.

Die Klassifizierung von Baumarten in Ökosystemen mit hoher Artenvielfalt hat sich als schwierig herausgestellt. Oft weisen nicht nur die identifizierten Baummerkmale zwischen verschiedenen Baumarten sehr ähnliche Kennzeichen auf, sondern es besteht auch eine große Streuung der Merkmale innerhalb der Baumindividuen der gleichen Baumart. Einige Arten konnten jedoch gut identifiziert werden (Trefferquoten über 80%). Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, statt der herkömmlichen Anwendung von Maximum-Likelihood Klassifikatoren Merkmale wie Textur, Farbe und zweidimensio-

nale geometrische Kronenform anhand linearer Diskriminanzfunktionen zu kombinieren.

7.2 Ausblick

Diese Untersuchung repräsentiert nur einen kleinen Beitrag zur Analyse und Kenntnis der komplexen tropischen bewaldeten Ökosysteme von Kolumbien und Ecuador anhand photogrammetrischer Ansätze. Obgleich die Anwendbarkeit ähnlicher Techniken in gemäßigten Regionen bereits nachgewiesen ist, fängt ihre Umsetzung in tropischen Bereichen gerade erst an. In vielen Regionen Kolumbiens ist die Weiterentwicklung ihrer Anwendung die einzige realistische Möglichkeit für die Aufnahme der immensen vorhandenen forstlichen Ressourcen. Allerdings sind Auswertungen in permanent etablierten Parzellen in unterschiedlichen Lebensräumen zur Kalibrierung immer noch notwendig. Das trifft nicht nur auf Kolumbien sondern auch auf andere Länder insbesondere der Tropen zu. Nur in wenigen Forschungsstationen in Brasilien, Costa Rica, Ecuador, Guayana und Panamá werden Daten mittels hyperspektralen Sensoren, Lidar und Luftbildern gesammelt. Viele Wald-Ökosysteme Südamerikas bleiben bislang praktisch völlig unbekannt.

Versuche zur Befliegung und Aufnahme von Parzellen in tropischen Regenwald- und Bergwaldbereichen in Kolumbien und Bolivien sind aus logistischen Gründen gescheitert. Zukünftig sollten daher Untersuchungen auf detailliert terrestrisch baumkartierten Gebieten aufgebaut werden. Die Erfassung dieser Gebiete sollte anhand groß- und mittelmaßstäblicher Luftbilder und, wenn möglich ergänzt mit LIDAR, durchgeführt werden. Das würde nicht nur einen direkten Vergleich mit vorhandenen Felddaten ermöglichen, sondern auch die Ableitung von Abschätzungsüberlegungen und -formeln für dendrometrische Parameter wie zum Beispiel Baumhöhe, Stammdurchmesser, Holzvolumen und Holzvorrat und CO_2 -Reserven. Diese würden ebenfalls als Trainingsgebiete für die automatische Baumartenklassifizierung und zur Kontrolle der Klassifizierungsergebnisse für andere Inventurgebiete dienen können. Eine Beschreibung der wichtigsten Baumeigenschaften (z.B. Textur- und Farbsignaturen, Verzweigungstypen, Schirmflächen, Volumina, Formparameter, Phänologie) und ihre Parametrisierung für gezielte Baumarten sind deshalb unerlässlich für die Übertragung dieser Angaben in andere Gebiete. Insbesondere sollten ökonomisch wichtige oder vom Aussterben bedrohte Baumarten bevorzugt anvisiert werden. In diesem Sinne könnten verstreute Baumindividuen von

Spezies wie beispielweise Paranusbaum (*Bertholletia excelsa*), Caoba (*Swietenia macrophylla*) und Cativo (*Prioria copaifera*) in großen Arealen lokalisiert und überwacht werden, ehe sie völlig vernichtet sind. Damit ließen sich auch Kosten reduzieren. Anwendungen zur Bewertung des Waldzustands, Waldentwicklungsstadien, Änderungen von Waldzusammensetzungen oder CO_2 -Speicherkapazität sind ebenfalls vorstellbar und für Nachhaltigkeitsvorkehrungen sinnvoll. Bereits im Amazonasgebiet in Peru werden CO_2 -Einschätzungen basierend auf LIDAR-Messungen auf regionale Ebene unternommen (ASNER ET AL. (2009)).

In dieser Arbeit wurden nur RGB-Luftbilder zur Baumdetektion und -Klassifizierung eingesetzt. Die Tendenz zeigt allerdings, dass andere spektrale Kanäle (z.B. Infrarot-Kanal) bedeutende Information enthalten. Die meisten photogrammetrischen Kamerasysteme bieten zwar den Infrarot-Kanal an, verwendet werden aber meist die multispektralen Sensoren. Aufgrund der hohen Kosten bleibt die Anwendbarkeit dieser Sensoren jedoch begrenzt. Die Bestimmung der Höhe mittels LIDAR kommt für die Waldbodenerfassung, Kronensegmentierung und Baumerkennung immer mehr zum Einsatz. Die damit zurzeit noch verbundenen Kosten aber auch immensen methodischen Probleme haben ihre Verwendung bei dieser Arbeit jedoch eingeschränkt.

Obwohl sich die Anwendung von Höheninformationen aus digitalen Kronenmodellen als sehr erfolgreich in der Kronenbaumextraktion der Ölplantage und teilweise auch in einem natürlichen Baumbestand erwies, wurde eine optimale Kombination dieser Daten mit den spektralen Merkmalen aus Orthophotomosaiken für die Abgrenzung der Baumkronen generell trotz mehrerer Versuche nicht gefunden. Für die Erkennung von Bäumen sind die Farb- und Texturdifferenzen allerdings für einen menschlichen Interpret von großer Bedeutung. Texturinformation aus großmaßstäblichen Luftbildern könnte insbesondere zur Detektion von bestimmten Baumarten dienen. Dass hier einfache gewonnene Merkmale wie die Standardabweichung positiven Einfluss auf der Klassifizierung von Baumarten hatten, unterstreicht die Notwendigkeit für eine Vertiefung in diese Richtung. Daher trägt die höhere räumliche Auflösung der aktuellen digitalen Kameras zur besseren Erkennbarkeit von kleinen Strukturen und schattenbedingten Grautönen bzw. Farbmustern bei, die die Textur bestimmen. Textur-Charakterisierung gilt noch als ein herausfordernder Untersuchungsbereich.

Anhang A

Liste von Baumarten

Baumart	Individuenzahl	Baumart	Individuenzahl
<i>Acacia mangium</i>	3	<i>Inga edulis</i>	7
<i>Acrocomia aculeata</i>	1	<i>Jacaranda mimosifolia</i>	21
<i>Anacardium excelsum</i>	8	<i>Leucaena leucocephala</i>	7
<i>Annona muricata</i>	3	<i>Mangifera indica</i>	58
<i>Araucaria excelsa</i>	3	<i>Melicocus bijugatus</i>	1
<i>Astronium graveolens</i>	1	<i>Ochroma pyramidale</i>	2
<i>Bactris gasipaes</i>	2	<i>Persea americana</i>	1
<i>Bauhinia variegata</i>	2	<i>Pithecellobium arboreum</i>	2
<i>Blighia sapida</i>	3	<i>Pithecellobium dulce</i>	22
<i>Buchenavia capitata</i>	3	<i>Pithecellobium longifolium</i>	9
<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	12	<i>Pithecellobium saman</i>	6
<i>Castilla elastica</i>	2	<i>Platypodium elegans</i>	1
<i>Cedrela angustifolia</i>	4	<i>Pseudobombax septenatum</i>	16
<i>Ceiba pentandra</i>	5	<i>Pseudosamanea guachapele</i>	4
<i>Centrolobium paraense</i>	2	<i>Psidium guajaba</i>	43
<i>Cespedezia macrophylla</i>	4	<i>Roystonea regia</i>	115
<i>Chrysolidocarpus lutescens</i>	2	<i>Salix humboldtiana</i>	6
<i>Chrysophyllum cainito</i>	2	<i>Schinus terebinthifolius</i>	9
<i>Cordia alliodora</i>	9	<i>Schizolobium parahybum</i>	6
<i>Cupania americana</i>	3	<i>Spathodea campanulata</i>	38
<i>Delonix regia</i>	6	<i>Spondias purpurea</i>	1
<i>Dilodendron costaricense</i>	5	<i>Sterculia apetala</i>	11
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	4	<i>Swietenia macrophylla</i>	4
<i>Erythrina fusca</i>	68	<i>Syagrus sp.</i>	4
<i>Eucalyptus sp.</i>	45	<i>Tabebuia chrysantha</i>	3
<i>Eugenia jambos</i>	3	<i>Tabebuia rosea</i>	20
<i>Eugenia malaccensis</i>	13	<i>Tabebuia serratifolia</i>	4
<i>Ficus benjamina</i>	50	<i>Tectona grandis</i>	1
<i>Ficus lyrata</i>	11	<i>Terminalia catapa</i>	3
<i>Fraxinus chinensis</i>	9	<i>Terminalia superba</i>	6
<i>Genipa americana</i>	5	<i>Triplaris americana</i>	4
<i>Guadua angustifolia</i>	5	NN	256
<i>Hymenaea courbaril</i>	2	Gesamt	991

Tabelle A.1: Identifizierte und kartierte Baumarten mit der Anzahl von angetroffenen Individuen für das Gebiet von Medellín, Kolumbien (NN:Nicht identifiziert).

Baumart	Vulgärname in Spanisch (in Deutsch)	Individuenzahl
<i>Acrocomia aculeata</i>	Corozo (Macaba-Palme)	15
<i>Anacardium excelsum</i>	Caracolí	1
<i>Annona muricata</i>	Guanábana	1
<i>Annona squamosa</i>	Anón	9
<i>Artocarpus altilis</i>	Arbol del pan	16
<i>Astronium graveolens</i>	Diomate, Tigrillo	3
<i>Blighia sapida</i>	Seso vegetal (Akee)	1
<i>Bursera tomentosa</i>	Carate blanco	2
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro (westindische Zedrele)	1
<i>Ceiba pentandra</i>	Ceiba (Kapokbaum)	8
<i>Chrysalidocarpus lutescens</i>	Palma areca (Goldfruchtpalme)	11
<i>Citrus sp.</i>	Naranja, Limón (Orange, Zitrone)	8
<i>Cocos nucifera</i>	Coco (Kokosnuss)	149
<i>Delonix regia</i>	Flamboyán (Flammenbaum)	15
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Piñón de oreja	18
<i>Erythrina fusca</i>	Búcaro	2
<i>Ficus benjamina</i>	Falso caucho (Birkenfeige)	6
<i>Ficus sp.</i>	Caucho	4
<i>Gliricidia sepium</i>	Matarratón	60
<i>Guadua angustifolia</i>	Guadua (Guadua-Bambus)	6
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Guácimo	32
<i>Hymenaea courbaril</i>	Algarrobo	10
<i>Inga sp.</i>	Guamo	6
<i>Leucaena leucophala</i>	Leucaena	1
<i>Mammea americana</i>	Mamey (Mammiapfel)	9
<i>Mangifera indica</i>	Mango (Mangobaum)	150
<i>Manilkara sapota</i>	Níspero (Breiapfel)	8
<i>Melicoccus bijugatus</i>	Mamoncillo	32
<i>Persea americana</i>	Aguate (Avocado)	13
<i>Pithecellobium dulce</i>	Chiminango	1
<i>Platymiscium pinnatum</i>	Trébol	8
<i>Pseudosamanea guachapele</i>	Cedro amarillo	52
<i>Psidium guajaba</i>	Guayaba (Guave)	3
<i>Quararibea cordata</i>	Zapote	83
<i>Roystonea regia</i>	Palma real (Königspalme)	58
<i>Spathodea campanulata</i>	Miona (afrikanische Tulpenbaum)	1
<i>Spondias mombin</i>	Hobo	4
<i>Spondias purpurea</i>	Hobo rojo	14
<i>Tamarindus indica</i>	Tamarindo (Tamarindenbaum)	36
<i>Tectona grandis</i>	Teca (Teakbaum)	8
<i>Terminalia catappa</i>	Almendro (Katappenbaum)	8
<i>Theobroma cacao</i>	Cacao (Kakaobaum)	2
<i>Trichilia sp.</i>	Lobo, Tautano	6
NN		779
Gesamt		1660

Tabelle A.2: Identifizierte und kartierte Baumarten mit der Anzahl von angetroffenen Individuen für das Gebiet von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien (NN:Nicht identifiziert).

Anhang B

Blockausgleichungen

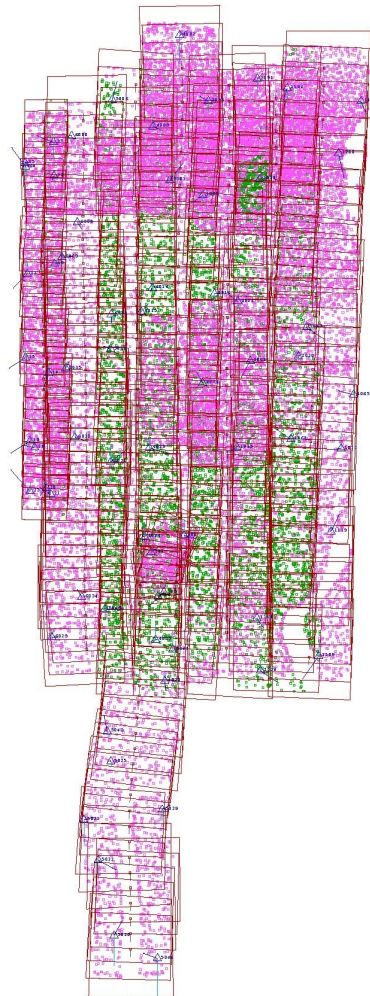


Abbildung B.1: Blockausgleichung mit BINGO des Bildverbandes von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.

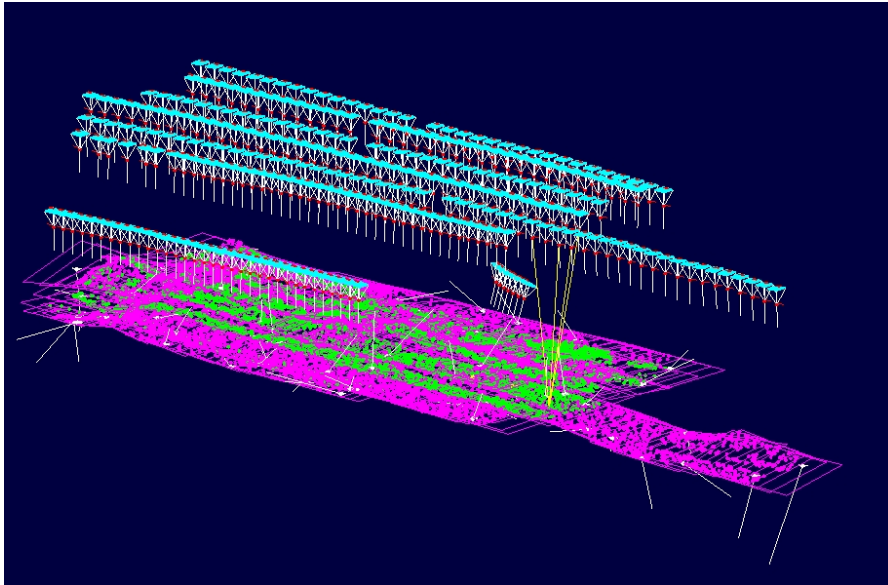


Abbildung B.2: 3D-Ansicht der Blockausgleichung mit BINGO des Bildverbandes von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien. In Grün sind die Verknüpfungs- und Passpunkte, die in mehreren Bildstreifen vorkommen. In Pink sind die anderen Punkte wiedergegeben. Außerdem zeigen die Passpunkte weiße Residuenvektore. Die Aufnahmeposition der Kamera wird als Objekte in Cyan abgebildet.

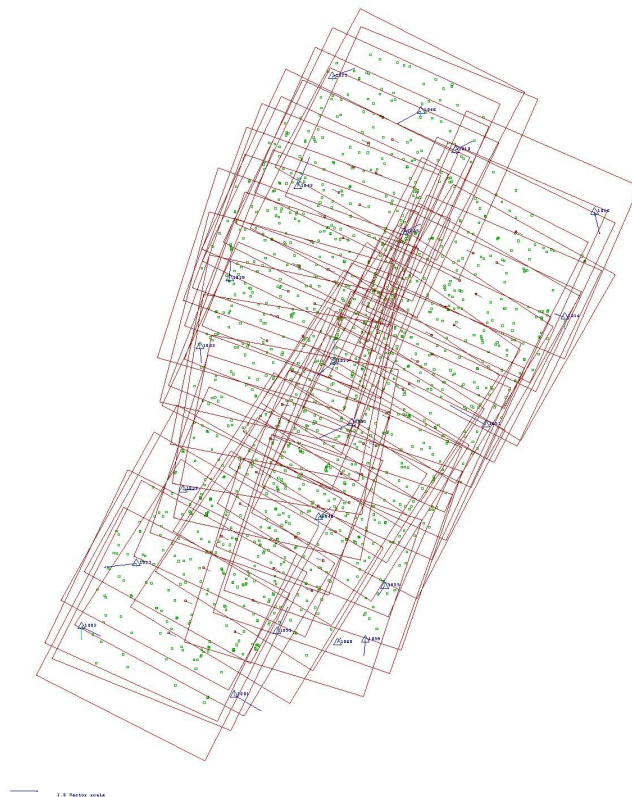


Abbildung B.3: Blockausgleichung mit BINGO des Bildblockes von Medellín, Kolumbien.

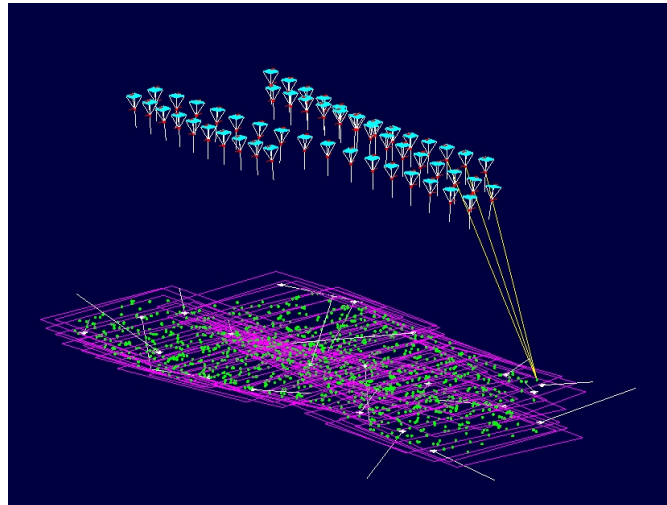


Abbildung B.4: 3D-Ansicht der Blockausgleichung mit BINGO des Bildblockes von Medellín, Kolumbien. In Grün sind die Verknüpfungs- und Passpunkte, die in mehreren Bildstreifen vorkommen. In Pink sind die anderen Punkte. Außerdem zeigen die Passpunkte weißen Residuenvektors. Die Aufnahmeposition der Kamera wird als blaue Objekte abgebildet.

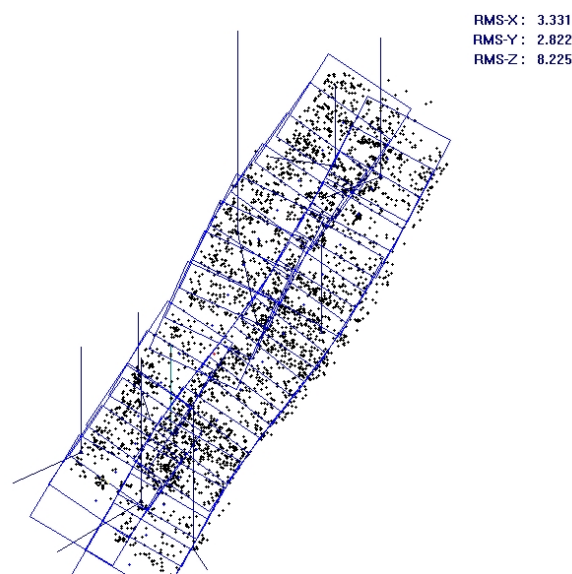


Abbildung B.5: Blockausgleichung mit ORIMA des Bildblockes von La Concordia, Ecuador.

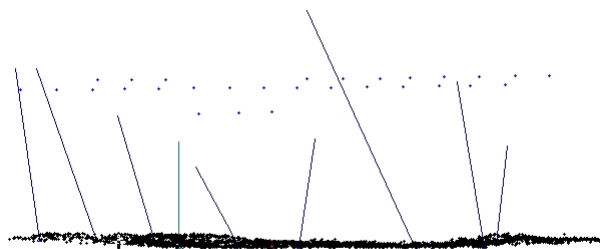


Abbildung B.6: Querschnittsansicht der Aerotriangulation mit ORIMA des Bildblockes von La Concordia, Ecuador. Die oberen Punkte sind die Aufnahmepositionen der Kamera. Die schwarzen Punkte unten sind die Verknüpfungs Punkte. Die Residuenvektore sind in Blau dargestellt.

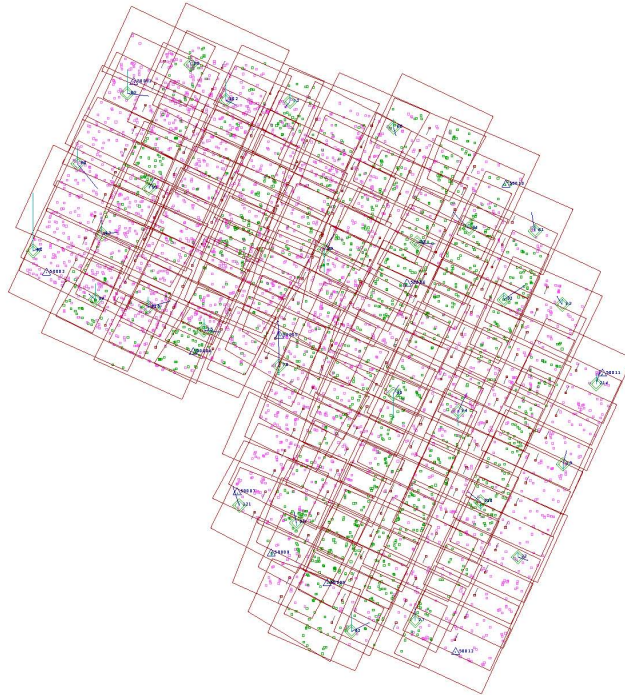


Abbildung B.7: Blockausgleichung mit ORIMA des Bildblockes Y2 von Yumbo, Kolumbien. Bei dieser Aerotriangulation wurden DGPS-Punkte sowie kinematische Betrachtungen verwendet werden.

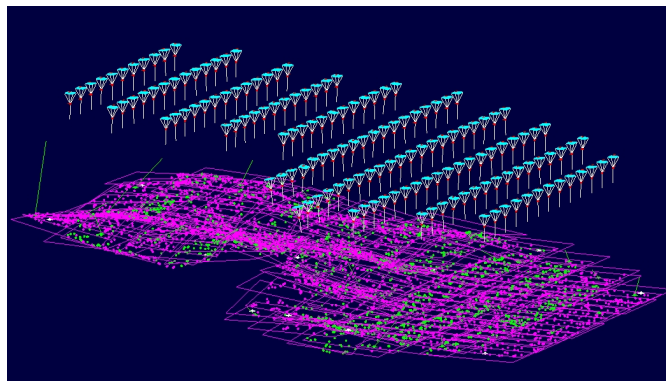


Abbildung B.8: 3D-Ansicht der Blockausgleichung (Y2) mit BINGO des Bildblockes von Yumbo, Kolumbien. Bei dieser Aerotriangulation wurden DGPS-Punkte und kinematische Projektionszentrenbestimmungen verwendet. In Grün sind die Verknüpfungs- und Passpunkte, die in mehreren Bildstreifen vorkommen. In Pink sind die anderen Punkte. Außerdem zeigen die Passpunkte weiße Residuenvektore. Die Aufnahmeposition der Kamera wird als blaue Objekte abgebildet.

Anhang C

Digitale Oberflächenmodelle

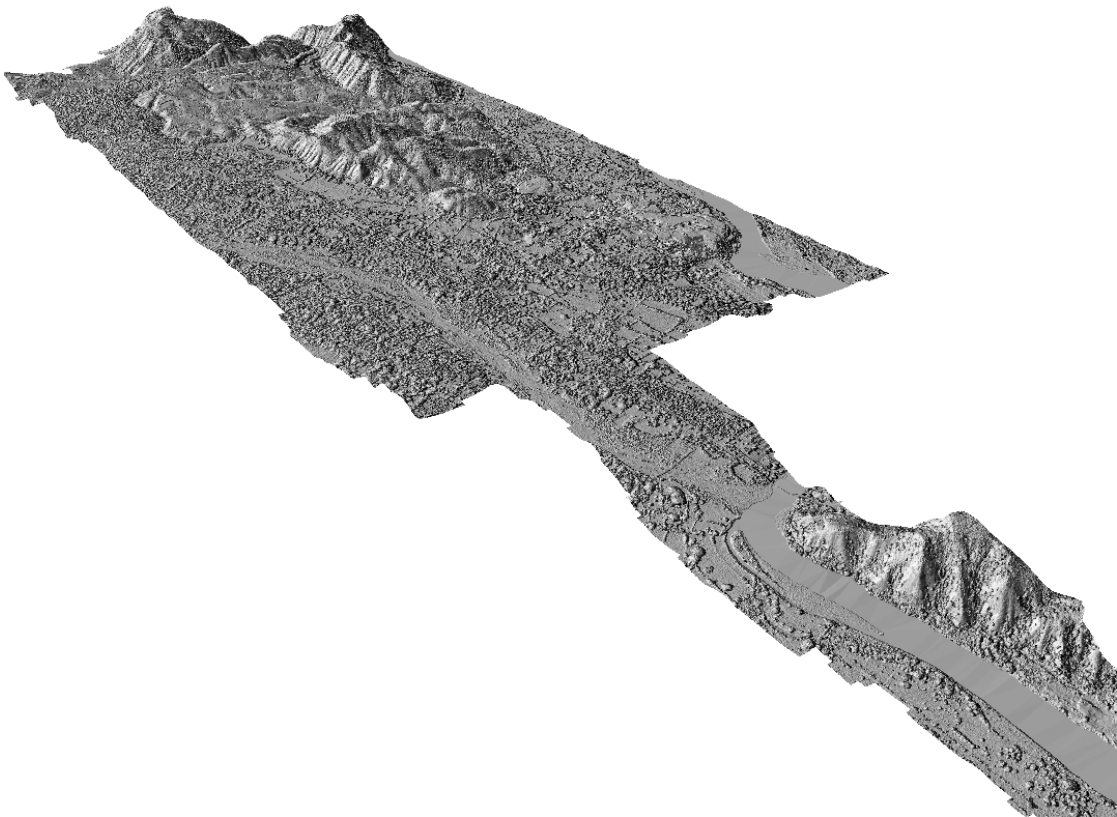


Abbildung C.1: 3D-Ansicht des digitalen Oberflächenmodells (DOM) für die gesamte Probefläche von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.

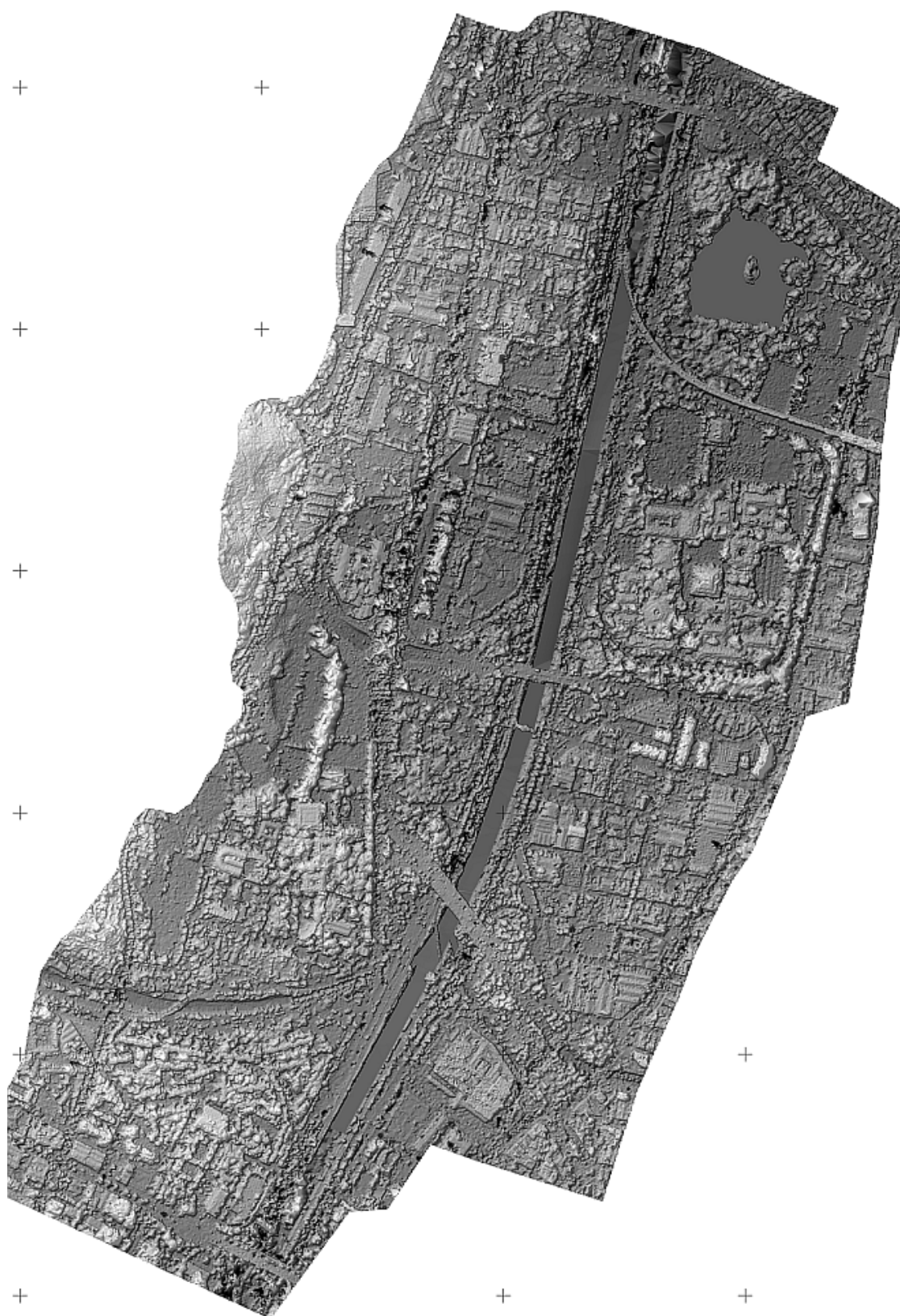


Abbildung C.2: Digitales Oberflächenmodell (DOM) für die gesamte Probestfläche von Medellín, Kolumbien.

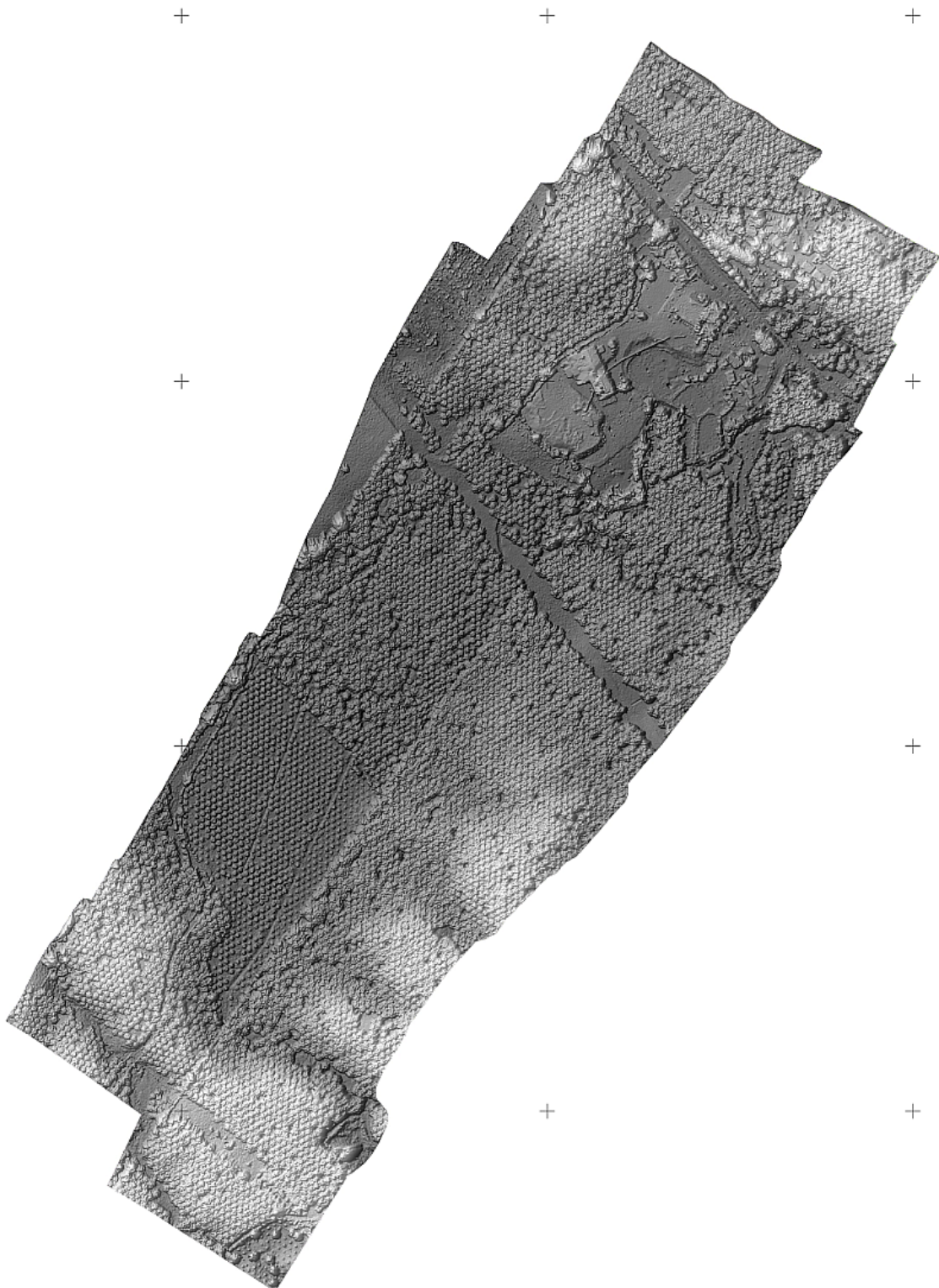


Abbildung C.3: Digitales Oberflächenmodell (DOM) für die gesamte Probestfläche von La Concordia, Ecuador.

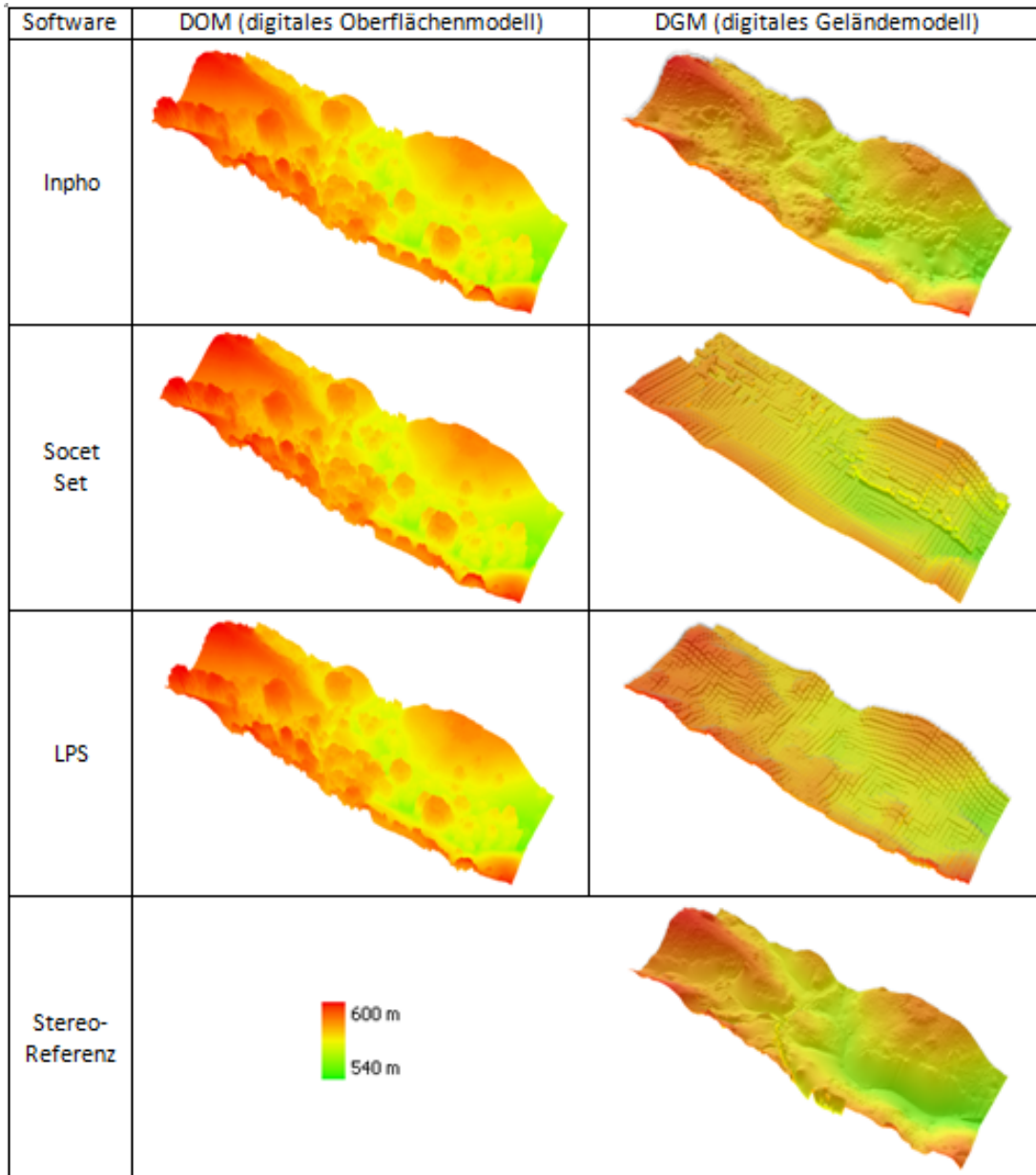


Abbildung C.4: Abgeleitete DOMs und DGMs für ein bewaldetes und hügeliges Gebiet in Santa Fé de Antioquia (Parzelle A1) anhand verschiedener photogrammetrischer Softwarepakete. Rechts unten ist das Referenz-DGM aus stereoskopischen Messungen.

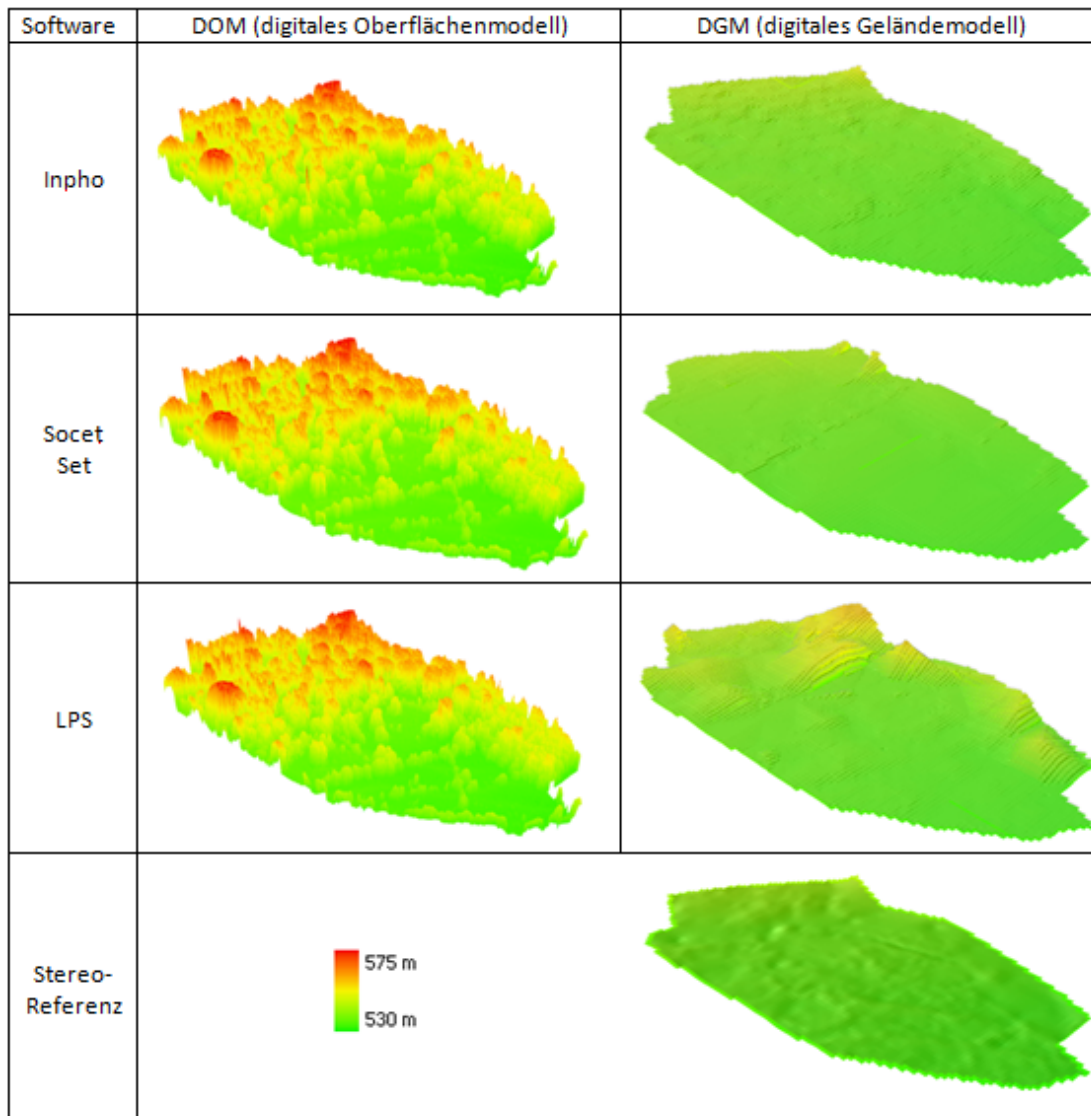


Abbildung C.5: Abgeleitete DOMs und DGMs für ein bewaldetes und flaches Gebiet in Santa Fé de Antioquia (Parzelle A2) anhand verschiedener photogrammetrischen Softwarepakete. Rechts unten ist das Referenz-DGM aus stereoskopischen Messungen.

Anhang D

Orthophotomosaik

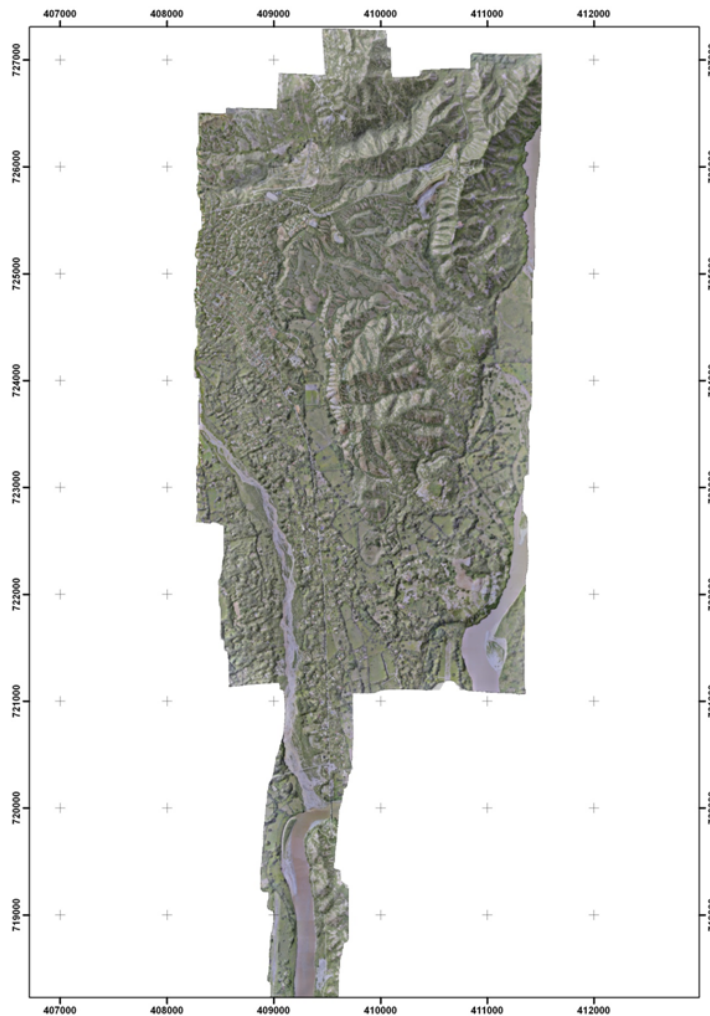


Abbildung D.1: Orthophotomosaik mit überlagerten Schattierung des DOMS für die gesamte Probefläche von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.

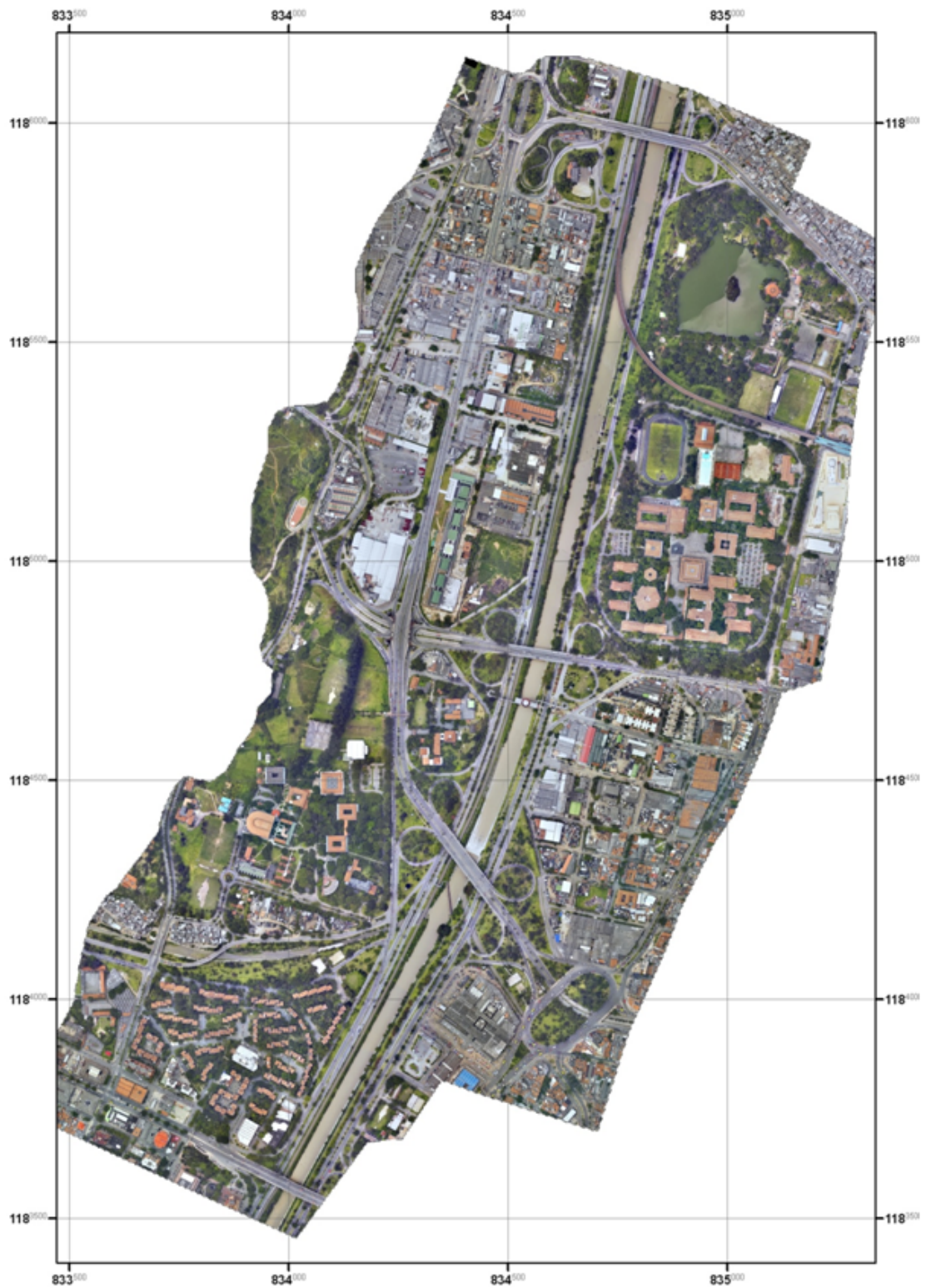


Abbildung D.2: Orthophotomosaik für die gesamte Probestfläche von Medellín, Kolumbien.

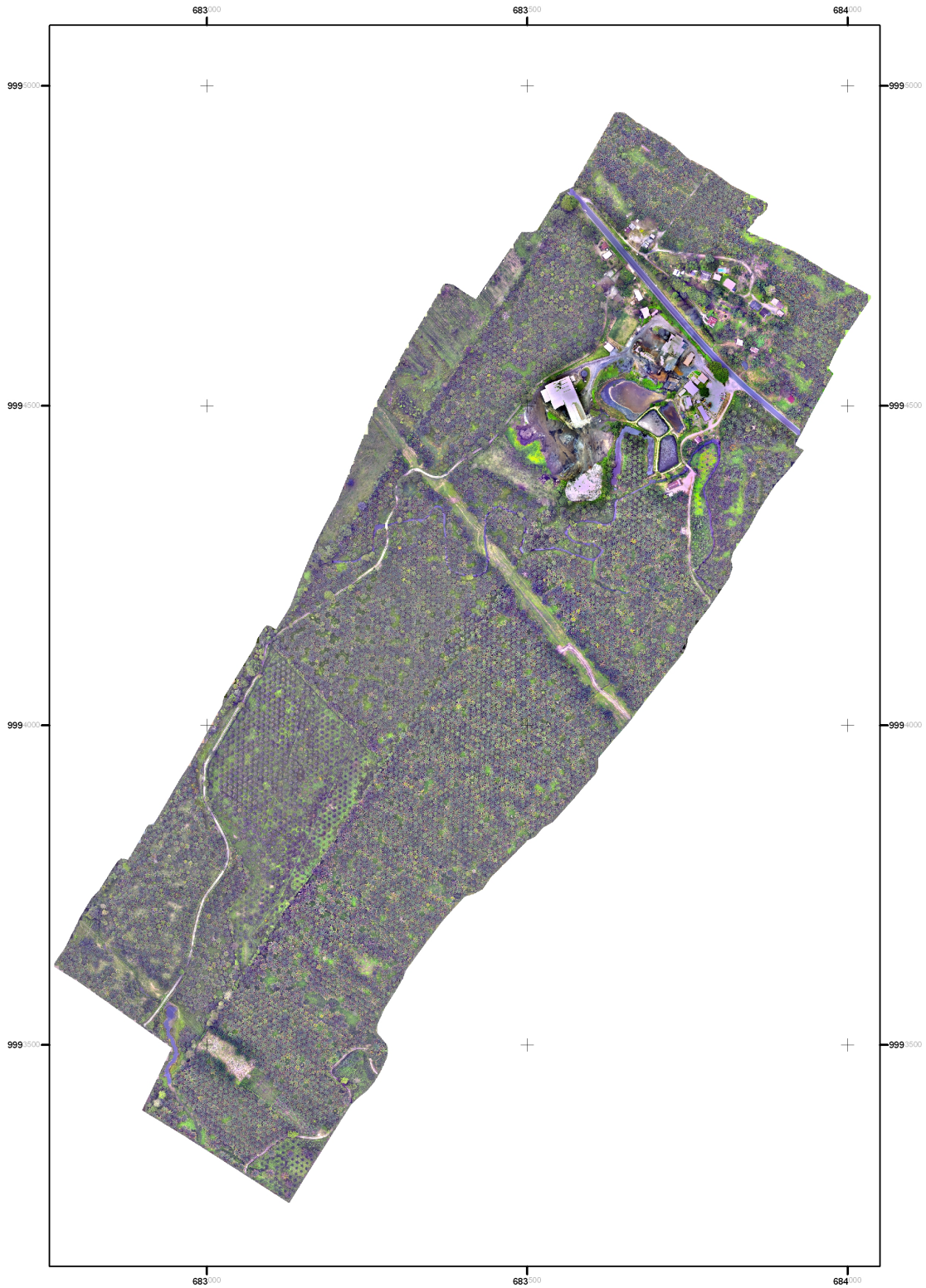


Abbildung D.3: Orthophotomosaik für die gesamte Probefläche von La Concordia, Ecuador.



(a) Parzelle A1



(b) Parzelle A2



(c) Parzelle A3

Abbildung D.4: Orthophotomosaik der Untersuchungsparzellen von Santa Fé de Antioquia, Kolumbien.

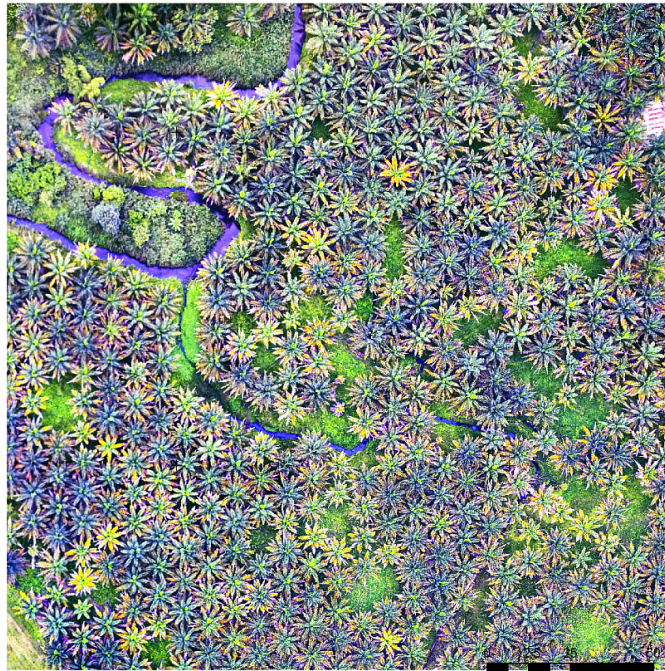


(a) Universidad Nacional



(b) Universidad Antioquia

Abbildung D.5: Orthophotomosaik der Untersuchungsparzellen von Medellín, Kolumbien.



(a) Parzelle SPA1

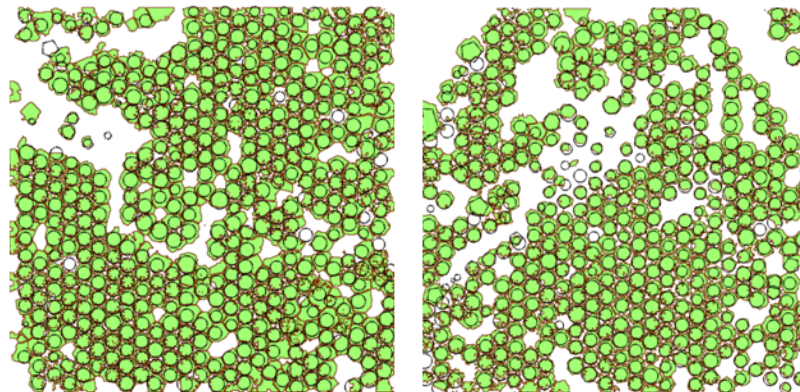


(b) Parzelle SPA2

Abbildung D.6: Orthophotomosaik der Subparzellen von La Concordia, Ecuador.

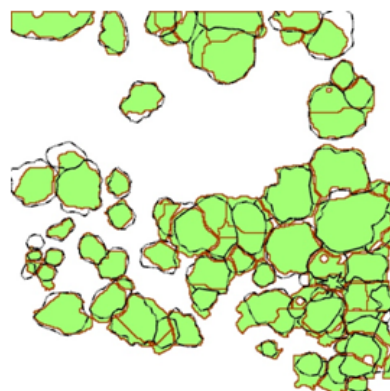
Anhang E

Baumkronenabgrenzung



(a) La Concordia 1 (SPA1)*

(b) La Concordia 2 (SPA2)



(c) Santa Fé de Antioquia (SSF1)

Abbildung E.1: Ergebnisse der Baumkronenabgrenzung in den Parzellen von La Concordia (oben) und Santa Fé de Antioquia (unten). In schwarzen Linien sind die gezeichneten Bäume und in grünen Polygonen die automatisch identifiziert.

Anhang F

Klassifizierung von Baumarten

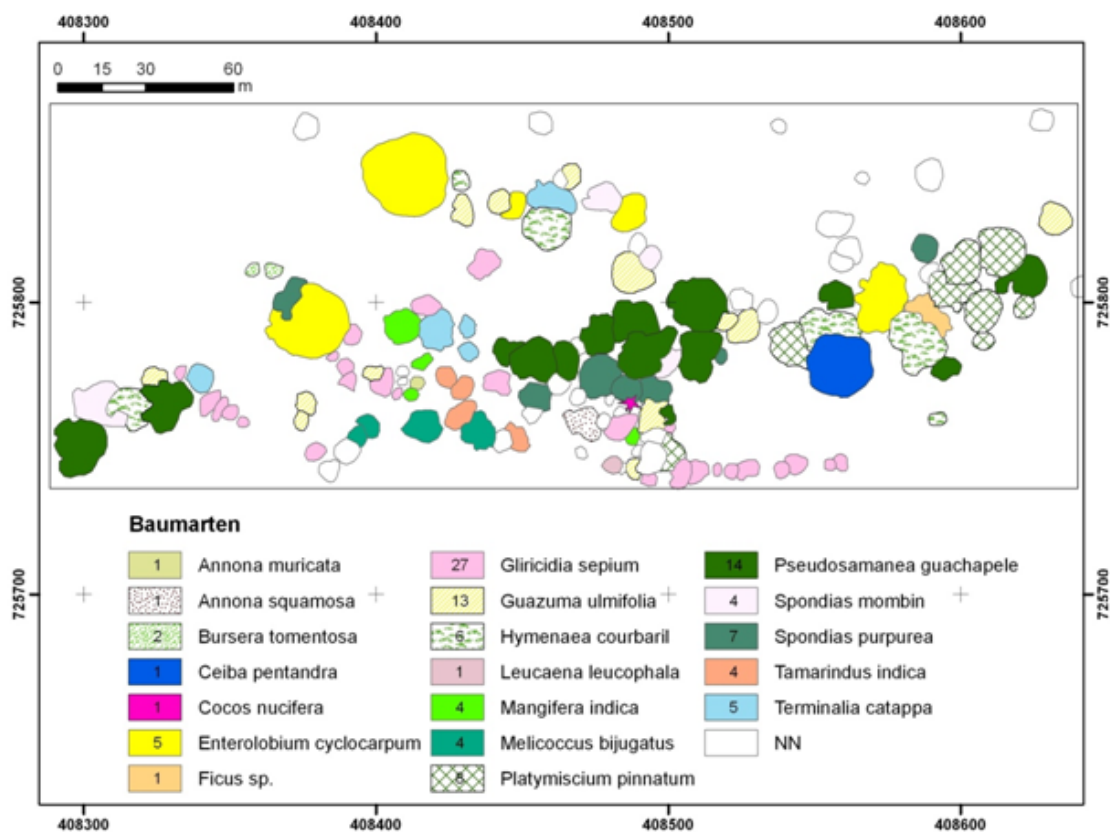


Abbildung F.1: Identifizierte Baumarten mit der Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle A1 des Untersuchungsgebietes von Santa Fé de Antioquia.

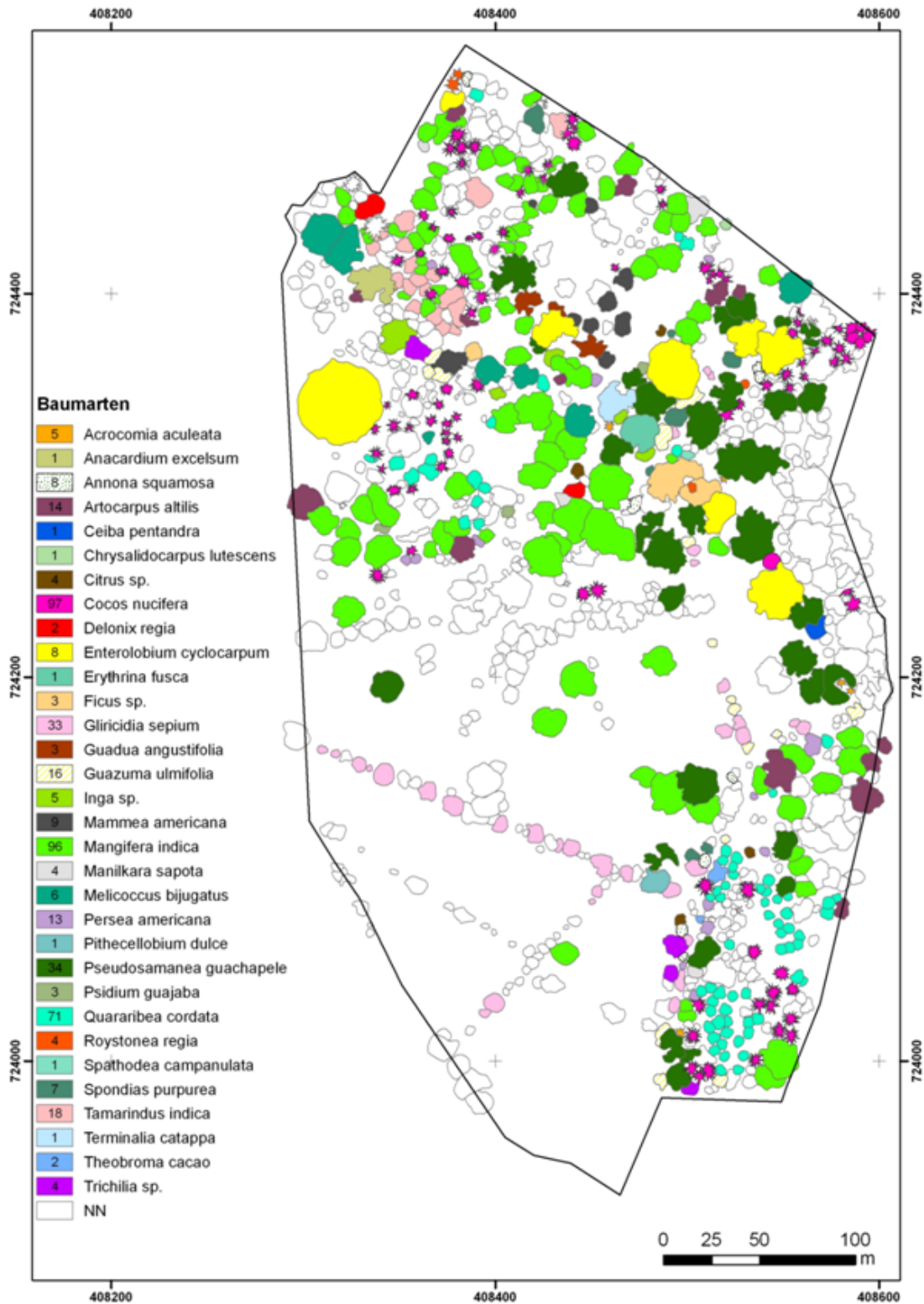


Abbildung F.2: Identifizierte Baumarten mit deren Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle A2 des Untersuchungsgebietes von Santa Fé de Antioquia.

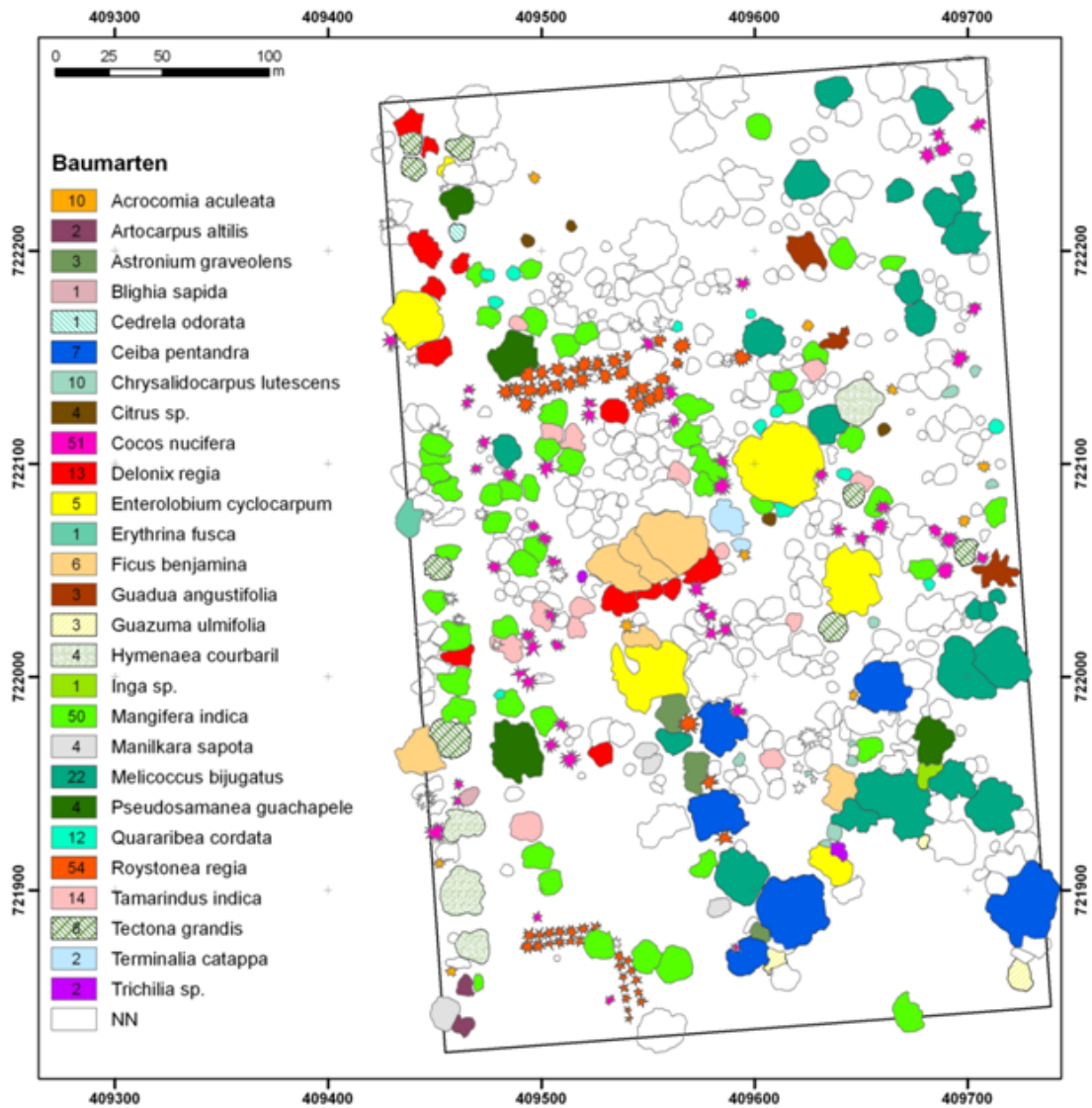


Abbildung F.3: Identifizierte Baumarten mit deren Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle A3 des Untersuchungsgebietes von Santa Fé de Antioquia.

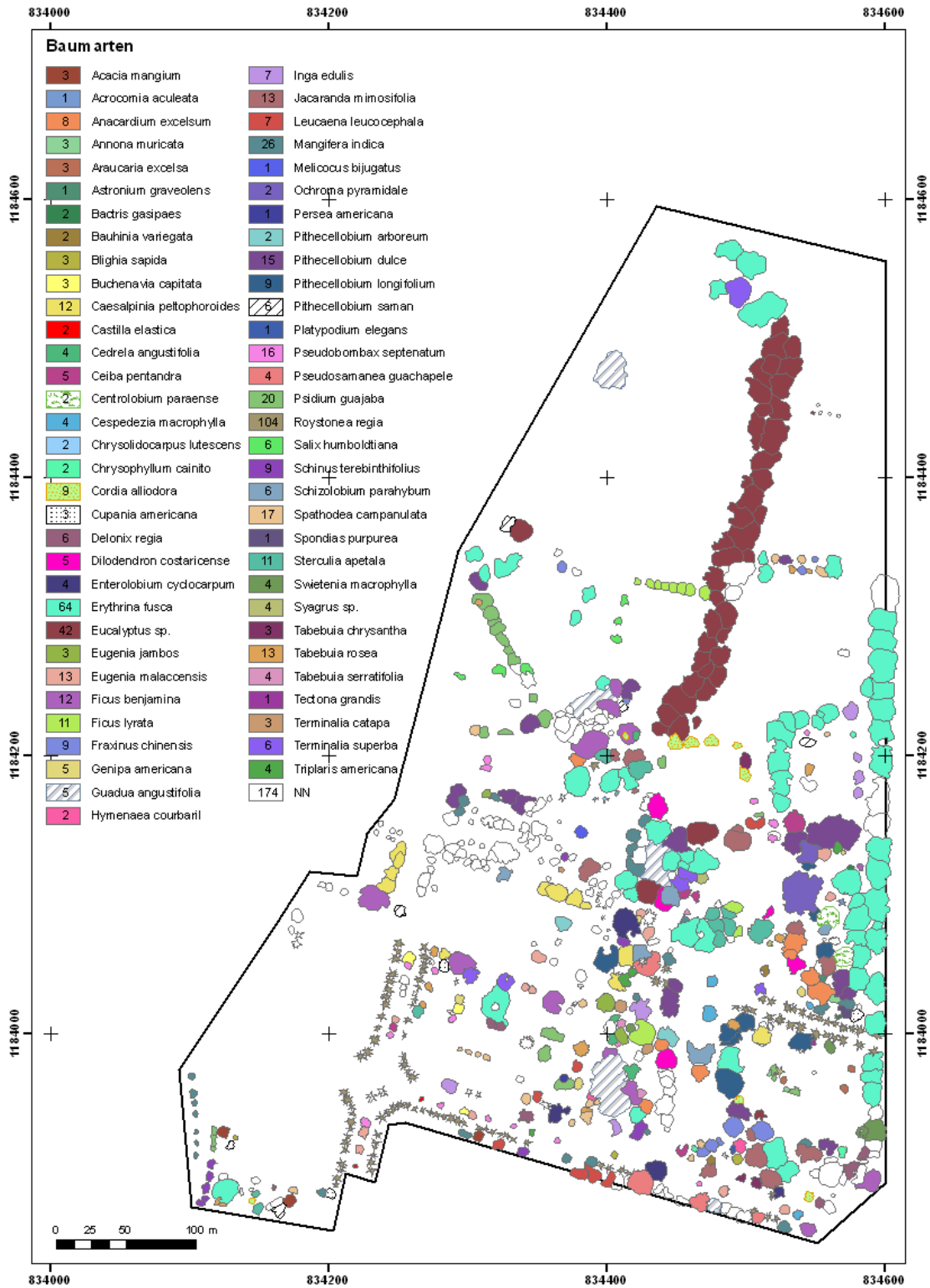


Abbildung F.4: Identifizierte Baumarten mit deren Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle M1 des Untersuchungsgebietes von Medellín.

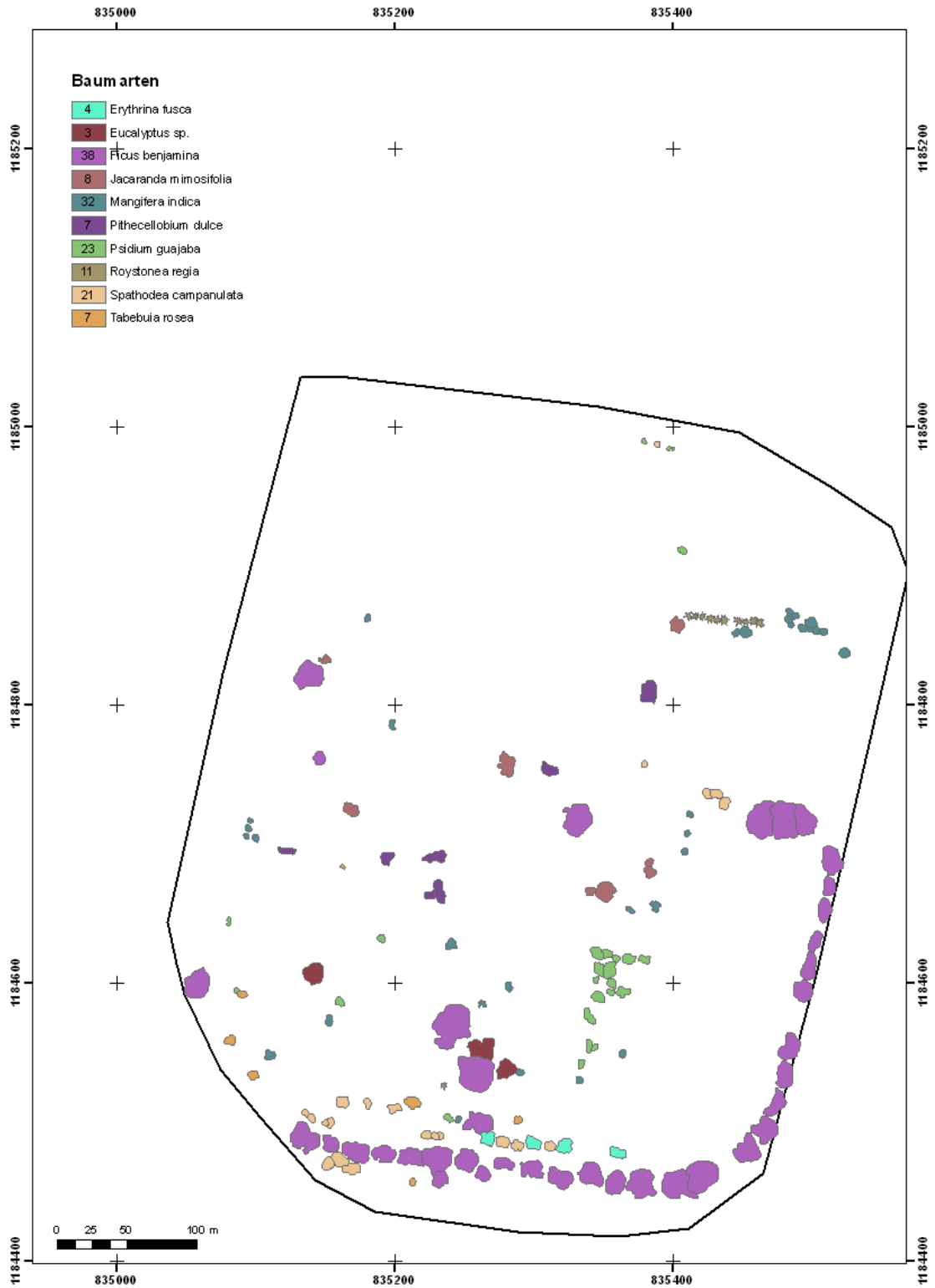


Abbildung F.5: Identifizierte Baumarten mit deren Anzahl an Individuen innerhalb der Parzelle M2 des Untersuchungsgebietes von Medellín.

Hauptquelle	Merkmalstyp	Symbol	Beschreibung
ORTHOPHOTOMOSAİK	FARBE	R_{Mean}^*	Mittlerer Wert des roten Kanals
		G_{Mean}	Mittlerer Wert des grünen Kanals
		B_{Mean}^*	Mittlerer Wert des blauen Kanals
		R_{Norm}	Normalisierter mittlerer Wert R_R
		G_{Norm}^*	Normalisierter mittlerer Wert R_G
		B_{Norm}^*	Normalisierter mittlerer Wert R_B
		PCA_{Mean}	Mittlerer Wert der ersten Hauptkomponente
		I_{Mean}^*	Mittlerer Wert des Helligkeit-Kanals (I)
		H_{Mean}^*	Mittlerer Wert des Farbton-Kanals (H)
		S_{Mean}	Mittlerer Wert des Sättigung-Kanals (S)
	TEXTUR	R_{SD}	Standardabweichung des roten Kanals
		G_{SD}^*	Standardabweichung des grünen Kanals
		B_{SD}^*	Standardabweichung des blauen Kanals
		R_{NormSD}	Std. des normalisierten roten Kanals
		G_{NormSD}^*	Std. des normalisierten grünen Kanals
		B_{NormSD}^*	Std. des normalisierten blauen Kanals
		PCA_{SD}	Std. der ersten Hauptkomponente
		I_{SD}^*	Standardabweichung des Helligkeit-Kanals
		H_{SD}^*	Standardabweichung des Farbton-Kanals
		S_{SD}	Standardabweichung des Sättigung-Kanals
BEGRENZUNG	FORM	F^*	Fläche des Baumpolygons
		U^*	Umfang des Baumpolygons
		K^*	Kompaktheit
		L	Länglichkeit nach Fuchs (2003)
		KB^*	Kronenbreite
DOM	3D-GESTALT	KL^*	Vertikale Kronenlänge (Kronenhöhe)
		KMF	Kronenmantelfläche
		HN^*	Mittlere Hangneigung des Kronenmantels
		KR	Mittlere Krümmung des Kronenmantels
		R^*	Rauigkeit Kronenmantels

* bedeutet dass diese Variable als signifikant gefunden wurde.

Tabelle F.1: Zusammenfassung der evaluierten Variablen bei der Klassifizierung von Baumarten anhand der Diskriminanzanalyse in zwei Gebieten Kolumbiens.

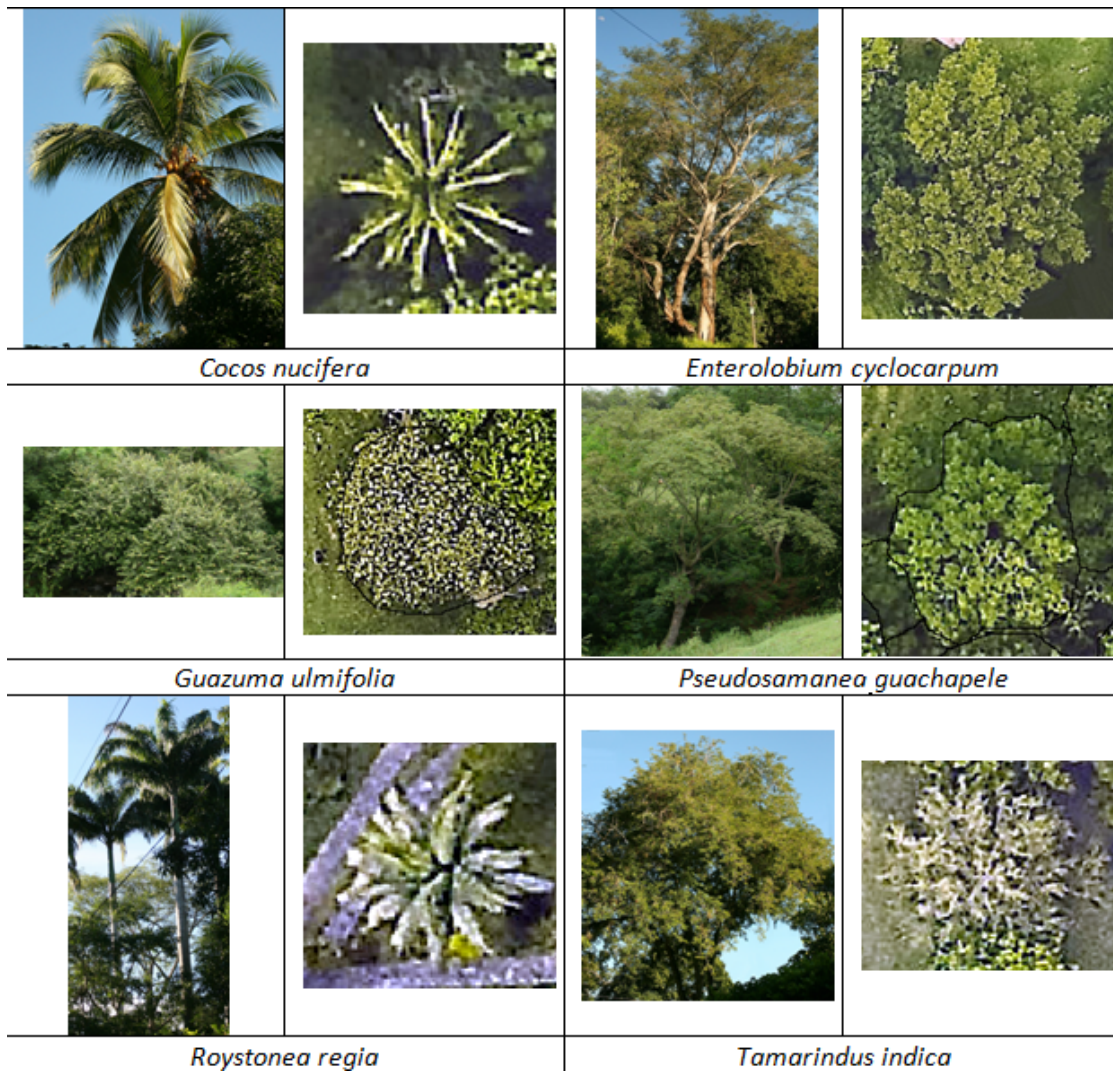


Abbildung F.6: Beispiele von klassifizierten Baumarten in Santa Fé de Antioquia. Rechts vom jeden terrestrischen Bild steht das entsprechende Luftaufnahme des Baumes (DSM 10-12 cm).

Literaturverzeichnis

- ABRAHAM, J. & ADOLT, R. (2006). Stand height estimations using aerial images and laser scanning data. In *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th-15th Feb. 2006, Vienna - Session 7*. 24–31.
- ALBERTZ, J. (2009). *Einführung in die Fernerkundung*. WBG, Darmstadt, 4th ed.
- ANDERSON, H., MCGAUGHEY, R., CARSON, W., REUTBUCH, S., MERCER, B. & ALLAN, J. (2004). A Comparison of Forest Canopy Models Derived from LIDAR and InSAR Data in a Pacific Northwest Conifer forest. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34 211–217.
- ASNER, G., KNAPP, D., BALAJI, A. & PÁEZ-ACOSTA, G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: Claslite. *Journal of Applied Remote Sensing* 3.
- AURICH, V. (2008). *Bildverarbeitung. VL-Skript SS 2008*. Heinrich Heine Universität.
- BACKHAUS, E. & PLINKE, W. (2008). *Multivariate Analysemethoden, eine anwendungsorientierte Einführung*, vol. 8. Springer, Berlin.
- BALTSAVIAS, E. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 83–94.
- BALTSAVIAS, E., GRUEN, A., EISENBEISS, H., ZHANG, L. & WASER, L. (2008). High-quality image matching and automated generation of 3D tree models. *International Journal of Remote Sensing* 29 1243–1259.
- BISCHOF, J. (2009). *Einzelbaumerfassung mittels objektbasierter Klassifizierung hochauflösender Luftbilder am Beispiel von Pekanbaru, Indonesien*. Master's thesis, Technische Fachhochschule Berlin.

- BOHLMAN, S. & LASHLEE, D. (2005). High spatial and spectral resolution remote sensing of panamá canal zone watershed forests: An applied example mapping tropical tree species. *Water Science and Technology Library* 52 245–258.
- BRAITMEIER, M. (2003). *Die Energiebilanz an der Oberfläche des Nevado Santa Isabel, Kolumbien*. Ph.D. thesis, Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf.
- BRANDTBERG, T. & WALTER, F. (1998). Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale analysis. *Machine Vision and Applications* 11 64–73.
- BRANDTBERG, T. & WARNER, T. (2006). High-spatial-resolution remote sensing. In G. Shao & K. Reynolds, eds., *Computer Applications in Sustainable Forest Management, Managing Forest Ecosystems*, vol. 11, chap. 2. Springer, Dordrecht, 19–41.
- BUNTING, P. & LUCAS, R. (2006). The delineation of tree crowns in Australian mixed species forests using hyperspectral Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) data. *Remote Sensing of Environment* 101 230–248.
- CHENG, H., JIANG, X., SUN, Y. & WANG, J. (2001). Color image segmentation: advances and prospects. *Pattern Recognition* 34 2259–2281.
- CLARK, M., CLARK, D. & ROBERTS, D. (2004). Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. *Remote Sensing of Environment* 91 68–89.
- CLARK, M., ROBERTS, D. & CLARK, D. (2005). Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales. *Remote Sensing of Environment* 96 375 – 398.
- CLÉMENT, J. & GUELLEC, J. (1974). Utilisation de photographies aériennes au 1/5000 en couleur pour la détection de l'okoume dans la forêt dense du gabon. *Bois et forêts des Tropiques* 153 3 – 22.
- COCHRANE, M. (2000). Using vegetation reflectance variability for species level classification of hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing* 21 2075 – 2087.
- CRAMER, M. (2001). *Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie*. Ph.D. thesis, Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart.

- CULVENOR, D. (2002). TIDA: An algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery. *Computers & Geosciences* 28 33–44.
- DE LOS RIOS, J. (2004). Caracterización y evaluación de agroecosistemas a escala predial un estudio de caso: Centro Agropecuario Cotove (Santa Fé de Antioquia, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Ciencias Agropecuarias, Medellín* 57 2287–2319.
- DEFINIENS (2007). *Definiens Developer 7. Reference Book*. Definiens AG., München.
- DEVENECIA, K., WALKER, S. & B, Z. (2007). New Approaches to Generating and Processing High Resolution Elevation Data with Imagery. *Photogrammetric Week 07* 297–308.
- DISPERATI, A. & OLIVEIRA, P. (2005). Delineamento de copas de arvores em fotografias aéreas de alta resolução, através de suas sombras periféricas: Estudo de caso na floresta ombrófila mista. *Revista Arvore* 29 195–202.
- ELLENBERG, H. (1975). Vegetationsstufen in perhumiden bis perariden Bereichen der tropischen Anden. *Phytocoenologia* 2 368–387.
- ELMQVIST, M. (2002). Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, vol. 34 of 3A. ISPRS Commission III Symposium, Graz, 114–118.
- ERDAS, I. (2010). *LPS Project Manager. User's Guide*. ERDAS, Inc.
- ERIKSON, M. (2004). *Segmentation and classification of individual tree crowns*. Ph.D. thesis, Centre for Image Analysis, SLU. Acta Universitatis agriculturae Sueciae. Silvestria.
- ERIKSON, M. & OLOFSSON, K. (2005). Comparison of three individual tree crown detection methods. *Machine Vision and Applications* 16 258–265.
- ERNST, H. (1991). *Einführung in die digitale Bildverarbeitung. Grundlagen und industrieller Einsatz mit zahlreichen Beispielen*. München, Franzis-Verlag.
- ESPINAL, L. (1985). Geografía ecológica del Departamento de Antioquia: zonas de vida, formaciones vegetales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, Universidad Nacional de Colombia* 38 1–104.

- EVANS, J. & HUDAK, A. (2007). A Multiscale Curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 1029–1038.
- FARKAS, E. (2007). *Empirische Genauigkeitsuntersuchung der DIGI-CAM H-22, Luftbildkamera*. Master's thesis, Ifp TU Stuttgart.
- FÖRSTNER, W. (2009). Mustererkennung in der Fernerkundung. In *DGPF Tagungsband*, vol. 18. 129–136.
- FUCHS, H. (2003). *Methodische Ansätze zur Erfassung von Waldbäumen mittels digitaler Luftbilddauswertung*. Ph.D. thesis, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität Göttingen.
- GE, S., CARRUTHERS, R., GONG, P. & HERRERA, A. (2006). Texture analysis for mapping tamarix parviflora using aerial photographs along the Cache Creek, California. *Environmental Monitoring and Assessment* 114 65–83.
- GONZÁLEZ-OROZCO, C., MULLIGAN, M., TRICHON, V. & JARVIS, A. (2010). Taxonomic identification of amazonian tree crowns from aerial photography. *Applied vegetation science* 13 510–519.
- GOROKHOVICH, Y. & VOUSTIANIOUK, A. (2006). Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment* 104 409–415.
- GOUGEON, F. (1995). A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. *Canadian Journal of Remote Sensing* 21 274–284.
- HAALA, B. & WOLFF, K. (2009). Digitale photogrammetrische Luftbildkamerasysteme - Evaluation der automatischen Generierung von Höhenmodellen. In *DGPF Tagungsband - Jahrestagung, Jena*, vol. 18. 1–10.
- HARALICK, R., SHANMUGAN, K. & DINSTEN, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* SMC-3 610–621.
- HECK, V. (2006). *Geoökologische Untersuchungen im PNN Puracé / Kolumbien. Ein Ansatz zur Optimierung der Erfassung von Geo- und Bio-Ressourcen in hochandinen Ökosystemen*. Ph.D. thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

- HEIPKE, C. (2003). Photogrammetrie und Fernerkundung - von Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung. *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* 3 165–180.
- HELD, A., TICEHURST, C., LYMBURNER, L. & WILLIAMS, N. (2003). High resolution mapping of tropical mangrove ecosystems using hyperspectral and radar remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 24 2739–2759.
- HEURICH, M. (2006). *Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren*. Ph.D. thesis, Technische Universität München.
- HILDEBRANDT, G. (1996). *Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie*. Wichmann Verlag (Karlsruhe).
- HINSKEN, L. (2009). *CAP-A, Combined Adjustment Program, Aerial Version. User's Manual*. Leica-Geosystems, Norcross.
- HIRSCHMUGL, M., OFNER, M., RAGGAM, J. & SCHARDT, M. (2007). Single tree detection in very high-resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 110 533–544.
- HODGSON, M., JENSEN, J., L, S., SCHILL, S. & DAVIS, B. (2003). An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. *Remote Sensing of Environment* 84 295–308.
- HOPKINSON, C., CHASMER, L., ZSIGOVICS, G., CREED, I., SITAR, M., TREITZ, P. & MAHER, R. (2004). Errors in lidar ground elevation and wetland vegetation height estimates. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35 108–113.
- HORVÁTH, P., JERMYN, I., KATO, Z. & ZERUBIA, J. (2009). A higher-order active contour model of a 'gas of circles' and its application to tree crown extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing* 42 699–709.
- HUTCHINSON, M. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* 106 211–232.
- HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., LECKIE, D., GOUGEON, F., YU, X. & MALTAMO, M. (2008). Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29 1339–1366.

- HYYPÄ, J., PYYSALO, U., HYYPÄ, H. & SAMBERG, A. (2000). Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. In *EARSeL-SIG-Workshop LIDAR*. 139–147.
- JACOBSEN, K. (2008). Geometrisches Potential und Informationsgehalt von großformatigen digitalen Luftbildkameras. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 5 325–336.
- JACOBSEN, K. (2009). DGPF-Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme - Auswerteteam Geometrie. *DGPF* 18 1–16.
- JACOBSEN, K., CRAMER, M., LADSTÄTTER, R., RESSL, C. & SPRECKLS, V. (2010). DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme - Themenschwerpunkt Geometrie. *DGPF* 19 1–11.
- JACOBSEN, K. & LOHMANN, P. (2003). Segmented filtering of laser scanner dsms. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34 3–W13.
- JANSEN, P., BOHLMAN, S., GARZÓN-LÓPEZ, C., OLFF, H., MULLER-LANDAU, H. & WRIGHT, J. (2008). Large-scale spatial variation in palm fruit abundance across a tropical moist forest estimated from high-resolution aerial photographs. *Ecography* 31 33–42.
- JÄHNE, B. (2002). *Digitale Bildverarbeitung. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage*. Berlin, Springer.
- KALACKSKA, M., BOHLMAN, S., SANCHEZ-AZOFEIFA, G., CASTRO-ESAU, K. & CAELLI, T. (2007). Hyperspectral discrimination of tropical dry forest lianas and trees: Comparative data reduction approaches at the leaf and canopy levels. *Remote Sensing of Environment* 109 406–415.
- KERSCHNER, M. (2001). Seamline detection in colour orthoimage mosaicking by use of twin snakes. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 56 53–64.
- KÜHN, K. & HÖRIG, B. (1995). *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten: Geofernerkundung*. Springer Verlag (Berlin/Heidelberg).
- KIRÁLY, G., BROLLY & G (2006). Estimating forest stand parameters applying airborne laser scanning and QUICKBIRD images. In *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th-15th Feb. 2006, Vienna - Session 7*. 79–90.

- KOBLER, A., PFEIFER, N., OGRINC, P., TODOROVSKI, L., OSTIR, K. & DZEROSKI, S. (2007). Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment* 108 9–23.
- KOCH, A., HEIPKE, C. & LOHMANN, P. (2002). Bewertung von SRTM Digitalen Geländemodellen - Methodik und Ergebnisse. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 6 389–398.
- KOCH, B., HEDER, U. & WEINACKER, H. (2006). Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72 357–363.
- KOCH, B., HEINZEL, J., GUPTA, S., WANG, Y. & WEINACKER, H. (2009). Extraction of forest parameter from laser data. *DGPF Tagungsband* 18 345–354.
- KONECNY, G. (2003). *Geoinformation. Remote Sensing, photogrammetry and geographic information Systems*. London: Taylor & Francis.
- KRAUS, K. (1994). *Photogrammetrie, Grundlagen und Standardverfahren*, vol. 6 of 1. Dümmler.
- KRAUS, K. (2004). *Photogrammetrie, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*, vol. 7 of 1. Berlin.
- KRAUS, K. & OTEPKA, J. (2005). DTM Modelling and Visualization - The SCOP Approach. In D. Fritsch, ed., *Photogrammetric Week*, 5. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 241–252.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53 193–203.
- KRUCK, E. (2009). *BINGO 5.6. User's Manual*. GIP Eng., Aalen.
- LECKIE, D., GOUGEON, F., TINIS, S., NELSON, T., BURNETT, C. & PARADINE, D. (2005). Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. *Remote Sensing of Environment* 94 311–326.
- LINDER, W. (2003). Beispiele für den Einsatz digitaler Photogrammetrie unter erschweren Bedingungen. In 12. *Internationale Geodätische Woche Obergurgl*. 90–98.
- LINDER, W. (2009). *Digital Photogrammetry. A Practical Course*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3rd ed.

- LUCAS, R., ANTHEA, M. & BUNTING, P. (2008a). Hyperspectral data for assessing carbon dynamics and biodiversity of forests. In K. M & A. Sanchez-Azofeifa, eds., *Hyperspectral remote sensing of tropical and subtropical forests*, chap. 3. CRC Press, 47–86.
- LUCAS, R., BUNTING, P., PATERSON, M. & CHISHOLM, L. (2008b). Classification of australian forest communities using aerial photography. *Remote Sensing of Environment* 112 2088–2103.
- MAAS, K., H & PFEIFER, N. (2005). Akquisition von 3D-GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning. *Kartographische Nachrichten* 55 3–11.
- MAYER, S. (2004). *Automatisierte Objekterkennung zur Interpretation hochauflösender Bilddaten in der Erdfernerkundung*. Ph.D. thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II Humboldt-Universität, Berlin.
- MORALES, L. (1996). Composición y distribución del palmetum y arboretum de la universidad nacional de colombia, sede medellín. *Crónica forestal y del medio ambiente* 11 105–119.
- MYERS, B. (1982). Guide to the identification of some tropical rainforest species from large-scale colour aerial photographs. *Australian Forest* 45 28–41.
- NAVULUR, K. (2007). *Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm*. Boca Ratón, CRC Press.
- OLAYA, V. (2009). *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*, vol. 33, chap. Basic Land-Surface Parameters. Elsevier, 141–169.
- OLOFSSON, K. & HAGNER, O. (2006). Single tree detection in high resolution satellite images and digital aerial images using artificial neural networks and a geometric-optical forest model. In *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th-15th Feb. 2006, Vienna, 7*. 194–198.
- PALACE, M., KELLER, M., ASNER, G., HAGEN, S. & BRASWELL, B. (2008). Amazon forest structure from ikonos satellite data and the automated characterization of forest canopy properties. *Biotropica* 40 141–150.
- PERSSON, A., HOLMGREN, J. & SÖDERMAN, U. (2002). Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 925–932.

- PERSSON, A., HOLMGREN, J. & SODERMAN, U. (2006). Identification of tree species of individual trees by combining very high resolution laser data with multi-spectral images. In *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th-15th Feb. 2006, Vienna*, 7. 91–96.
- PETRIE, G. & WALKER, A. (2007). Airborne digital imaging technology: a new overview. *The photogrammetric Record* 22 203–225.
- PHILLIPS, D. (2000). *Image Processing in C*. Digitalbuch, 2nd ed.
- POLLOCK, R. (1996). *The automatic recognition of individual trees in aerial images of forest based on a synthetic tree crown model*. Ph.D. thesis, Dept. of Computer Science. University of British Columbia.
- POULIOT, D., KING, D., BELL, F. & PITT, D. (2002). Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest generation. *Remote Sensing of Environment* 82 322–334.
- PRATT, W. (2001). *Digital image processing*. John Wiley & Sons, New York, 3rd ed.
- RAGUSE, K. (2009). *Automatische Generierung von Höhenmodellen und ihre Auswirkung auf Orthophotos*. Master's thesis, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover.
- REITBERGER, J., SCHNÖRR, C., KRZYSZEK, P. & STILLA, U. (2008). 3D Segmentation of full waveform LIDAR data for single tree detection using normalized cut. In *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information, Beijing*, vol. 37. 77–84.
- REUTEBUCH, S., MCGAUGHEY, R., ANDERSEN, H. & CARSON, W. (2003). Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Can. J. Remote Sensing* 29 527–535.
- ØRKA, H., NAESSET, E. & BOLLANDSAS, O. (2009). Classifying species of individual trees by intensity and structural features derived from airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 113 1163–1174.
- RUSS, J. (2007). *The image processing handbook*. Boca Ratón, CRC Press, 5th ed.
- SAUERBIER, M. (2004). Accuracy of automated aerotriangulation and dtm generation in low textured imagery. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35 521–526.

- SAYN-WITTGENSTEIN, L., DE MILDE, R. & INGLIS, C. (1978). Identification of tropical trees on aerial photographs. Tech. Rep. FMR-X-113, Forest Management Institute, Canada Inf.
- SCHLICHT, H. (1995). *Bildverarbeitung digital*. Addison-Wesley Publishing Company, 2nd ed.
- SCHNEIDER, S. (1974). *Luftbild und Luftbildinterpretation*. Walter de Gruyter, Berlin.
- SCHWIDEFSKY, K. & ACKERMANN, F. (1976). *Photogrammetrie*. Teubner Verlag (Stuttgart).
- SITHOLE, G. & VOSSELMAN, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 59 85–101.
- SOILLE, P. (2003). *Morphological image analysis: Principles and applications*. Springer, Berlin, 2nd ed.
- ST-ONGE, B., VEGA, C., FOURNIER, R. & HU, Y. (2008). Mapping canopy height using a combination of digital stereo-photogrammetry and lidar. *International Journal of Remote Sensing* 29 3343–3364.
- STILLA, U., JUTZI, B., REITBERGER, J., YAO, W. & KRZYSZEK, P. (2009). Full waveform laserscanning-auswertemethoden und anwendungen. *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009)* 60 49–67.
- STRAUB, B. (2003). *Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten*. Ph.D. thesis, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover.
- SU, W., LI, J., CHEN, Y., LIU, Z., ZHANG, J., LOW, T., SUPPIAH, I. & HASHIM, S. (2008). Textural and local spatial statistics for the object-oriented classification of urban areas using high resolution imagery. *International Journal of Remote Sensing* 29 3105–3117.
- TICKLE, P., LEE, A., LUCAS, R., AUSTIN, J. & WITTE, C. (2006). Quantifying Australian forest floristics and structure using small footprint LIDAR and large scale aerial photography. *Forest Ecology and Management* 223 379–394.
- TIEDE, D. & HOFFMAN, C. (2006). Process oriented object-based algorithms for single tree detection using laser scanning. In *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th-15th Feb. 2006, Vienna, 7*. 151–156.

- TIMM, N. (2002). *Applied multivariate analysis*. Springer, New York.
- TRIAS-SANZ, R., STAMON, G. & LOUCHET, J. (2008). Using colour, texture, and hierarchical segmentation for high-resolution remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 63 156–168.
- TRICHON, V. & JULIEN, M. (2006). Tree species identification on large-scale aerial photographs in a tropical rain forest, French Guiana - application for management and conservation. *Forest Ecology and Management* 225 51–61.
- TUINSTRAN, N. (2008). *Sustainability Analysis of African Palm Biodiesel in Ecuador: An Environmental, Socio-cultural, and Artistic Perspective*. Master's thesis, University of Oregon.
- VAN DER SANDEN, J. & HOEKMAN, D. (2005). Review of relationships between grey-tone co-occurrence, semivariance, and autocorrelation based image texture analysis approaches. *Canadian Journal of Remote Sensing* 31 207–213.
- WANG, L., SOUSA, W. & GONG, P. (2004). Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing* 25 5655–5668.
- WANG, Y., WEINACKER, H. & KOCH, B. (2008). A lidar point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3d single tree modelling in forest. *Sensors* 8 3938–3951.
- WARNER, T., MCGRAW, J. & LANDENBERGER, R. (2006). Segmentation and classification of high resolution imagery for mapping individual species in a closed canopy, deciduous forest. *Science in China: Series E. Technological Sciences* 49 128–139.
- WASER, L., ECKER, K., GINZLER, C., KÜCHLER, M., SCHWARZ, M. & THEE, P. (2006). Extraction of forest parameters in a mire environment using airborne spectral data and digital surface models. In *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th-15th Feb. 2006, Vienna*, 7. 15–23.
- WASER, L., GINZLER, C., KÜCHLER, M., BALTSAVIAS & HURNI, E. (2011). Semi-automatic classification of tree species in different forest ecosystems by spectral and geometric variables derived from Airborne Digital Sensor (ADS40) and RC30 data. *Remote Sensing of Environment* 115 76–85.
- WEBB, A. (2002). *Statistical pattern recognition*, vol. 2. John Wiley & Sons.

- WEINACKER, H., KOCH, B., HEYDER, U. & WEINACKER, R. (2004). Development of filtering, segmentation and modelling modules for lidar and multispectral data as a fundament of an automatic forest inventory system. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 50–55.
- WOLF, B. & HEIPKE, C. (2007). Automatic extraction and delineation of single trees from remote sensing data. *Machine Vision and Applications* 18 317–330.
- WOOD, J. (1996). *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models*. Ph.D. thesis, University of Leicester, UK.
- XU, F., WOODHOUSE, N., XU, Z., MARR, D., YANG, X. & WANG, Y. (2008). Blunder Elimination techniques in adaptive automatic terrain extraction. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37. 1139–1144.
- ZHANG, J., RIVARD, B., SANCHEZ-AZOFEIFA, A. & CASTRO-ESAU, K. (2006). Intra- and inter-class spectral variability of tropical tree species at La Selva, Costa Rica: Implications for species identification using HYDICE imagery. *Remote Sensing of Environment* 105 129–141.
- ZHANG, L. (2005). *Automatic digital surface model (DSM) generation from linear array images*. Ph.D. thesis, Doctor of Technical Sciences. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- ZHU, C. & YANG, X. (1998). Study of remote sensing image texture analysis and classification using wavelet. *International Journal of Remote Sensing* 19 3197–3203.

Die hier vorgelegte Dissertation habe ich eigenständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt. Die Dissertation wurde in der vorgelegten oder in ähnlicher Form noch bei keiner anderen Institution eingereicht. Ich habe bisher keine erfolglosen Promotionsversuche unternommen.

Düsseldorf, den 9. Oktober 2011

Javier Francisco Gonzalez Patiño