

Automatisierte Einzelbaumextraktion im Forst:
Analyse und Optimierung von Aufnahmeparametern und
Prozessierungsschritten von der Luftbildaufnahme bis zum
attributierten Einzelbaum

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften

am Fachbereich Geowissenschaften
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Steven Bayer

Berlin 2017

Erstgutachter: Prof. Dr. Bernd Meissner

Zweitgutachter: Prof. Dr. Björn Waske

Tag der Disputation: 10. November 2017

Danksagung

Ohne die Hilfe und Unterstützung von vielen Kolleginnen und Kollegen, Freunden und Familienmitgliedern wäre die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen. Allen gehört an dieser Stelle mein Dank.

An erster Stelle möchte ich meinen beiden Betreuern danken. Herrn Prof. Dr. Bernd Meissner gilt mein ganz besonderer Dank für die jahrelange hervorragende fachliche Unterstützung und Motivation, ohne welche die Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Bei fachlichen Problemen stand er mir stets mit großer Kompetenz zur Seite, wodurch sich manches große Problem schnell lösen ließ. Neben seiner fachlichen Kompetenz im Bereich der Fernerkundung und GIS war auch die menschliche Unterstützung durch Herrn Meissner und seine Frau eine wichtige Hilfe, die aufkommende Zweifel schnell beseitigt und maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr. Björn Waske für die kompetente Zweitbetreuung und Begutachtung der Arbeit meinen Dank aussprechen. Seine konstruktiven Hinweise und Vorschläge tragen einen entscheidenden Anteil an der Arbeit.

Außerdem gilt mein Dank dem Institut für Optische Sensorsysteme (OS) des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Ohne die Bereitstellung der umfangreichen Befliegungsdaten und SGM-Lizenzen sowie die Nutzung des Rechenclusters des Institutes für Optische Sensorsysteme wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Bei Herrn Prof. Dr. Heinz-Wilhelm Hübers, Herrn Frank Lehmann und Herrn Ralf Berger möchte ich mich für die jahrelange Unterstützung bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Sicherheitsforschung und Anwendung des DLRs. Ich möchte an dieser Stelle allen aktiven und ehemaligen Mitgliedern der Arbeitsgruppe für Photogrammetrie danken. Mit ihrer photogrammetrischen Fachkompetenz haben Herr Karsten Stebner, Herr Matthias Geßner, Frau Magdalena Linkiewicz, Herr Henry Meißner sowie Herr Alexander Wieden mir bei allen Fragen zur Prozessierung der Datengrundlagen stets zur Seite gestanden. Darüber hinaus gilt mein Dank den Arbeitsgruppen für Sensorik und Informatik. Insbesondere möchte ich Herrn Jörg Brauchle für die speziell für diese Arbeit durchgeführte Befliegung von Baruth danken. Herrn Dirk Frommholz möchte ich für seine hervorragende Unterstützung bei allen Fragen auf dem Gebiet der Informatik sowie für die Hilfe bei der Umsetzung des Region Growing und die Bereitstellung des Bilateral Filters danken. Herrn Daniel Hein danke ich für die Unterstützung bei der Erstellung der Footprints der Einzelbilder. Ein großer und spezieller Dank gilt auch Frau Anna Poznanska und Herrn Dennis Dahlke für die jahrelange fachliche und persönliche

Unterstützung. Herrn Tilman Bucher danke ich für die fachliche Durchsicht der Arbeit und seine guten Anmerkungen. Herrn Thorsten Pengel gilt mein Dank für die Durchführung der Genauigkeitsanalysen der Waldmasken sowie der kompetenten Hilfe bei der Erstellung von Abbildungen. Bei Herrn Thomas Kraft möchte ich mich besonders Bedanken, da der mir in vielfältigen fachlichen und persönlichen Gesprächen stets ermutigend zur Seite stand.

Für die schnelle, unkomplizierte und kostenfreie Bereitstellung der Luftbilder von Gleisdorf gilt mein Dank der Vexcel Imaging GmbH sowie Herrn Engelbert Breg.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Projektbeteiligten des Institutes für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) der RWTH Aachen und des RIF e.V. des Projektes „Der Virtuelle Wald“, in dessen Rahmen die Luftbilder der Untersuchungsgebietes Habichtswald aufgenommen und mir im Rahmen der Arbeit zur Verfügung gestellt wurden. Ein Dank geht auch an Geobasis NRW für die kostenfreie Bereitstellung des Digitalen Geländemodelles des Habichtswaldes.

Dem Ingenieurbüro GILAN und Herrn Dr. Mohsen Miri gilt mein Dank für die Durchführung des terrestrischen 3D Laserscan des Untersuchungsgebietes Habichtswald.

Frau Anja Gänsrich möchte ich die Hilfe beim Layout danken. Herrn Simon Roth gilt mein Dank für das genaue Lektorat der Arbeit.

Ein abschließender Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern Steffen und Angela möchte ich mich an dieser Stelle für den großen Beistand und die nie endende Motivation im Studium und während der Promotionsphase danken. Eure warmen und ermutigenden Worte waren mir stets eine große Hilfe in den schweren Phasen der Promotion.

Zum Schluss gilt der größte Dank meiner Frau Diana und meinen beiden Söhnen Phillip und Felix. Trotz der vielen Einschränkung vor allem in der finalen „Papa hat keine Zeit zum Spielen, Papa muss arbeiten“-Phase habt ihr immer Verständnis für mich gehabt und mich jederzeit mit einem Lächeln gestärkt und mir so die Kraft zur Beendigung der Promotion gegeben. Meiner Frau gilt darüber hinaus ein großer Dank für Toleranz der jahrelangen privaten Einschränkungen, die auch nicht vor den Urlaubsplänen haltgemacht haben. Ich liebe und danke euch.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Extraktion von Einzelbäumen aus hochauflösenden digitalen True Orthophoto Mosaiken (TOM) und photogrammetrisch abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodellen (DOM). Die Untersuchungen zur Ableitung von Einzelbäumen erfolgt dabei auf zwei Ebenen. In einer der eigentlichen Einzelbaumextraktion vorangestellten Analyse der verwendeten Datengrundlagen erfolgt eine systematische Auswertung des Einflusses der Eingangsdaten auf die Genauigkeit der Extraktionsergebnisse. Auf dieser Untersuchung aufbauend wird ein Verfahren vorgestellt, mit welchem Einzelbäume aus hochauflösenden Luftbildern und Digitalen Oberflächenmodellen abgeleitet werden können.

Der Einfluss der Qualität der Eingangsdaten für eine Einzelbaumextraktion wurde bisher noch nicht wissenschaftlich untersucht. Im Rahmen der Arbeit wird von der Hypothese ausgegangen, dass die eingesetzten Datengrundlagen das Extraktionsergebnis maßgeblich beeinflussen. Die Datenqualität von Luftbildern und photogrammetrisch abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodellen hängt maßgeblich von den Befliegungs- und Prozessierungsparametern ab. Zur Überprüfung der Forschungshypothese erfolgt daher eine systematische Auswertung aller relevanter Befliegungs- und Prozessierungsparameter. Zu den untersuchten Befliegungsparametern gehört die Bodenauflösung, die Brennweite, die Längs- und Querüberlappung sowie die Flugrichtung. Anhand dieser Parameter erfolgen eine statistische Auswertung zum Einfluss dieser auf die Qualität der Digitalen Oberflächenmodelle sowie darauf aufbauend Empfehlungen für die Planung von Luftbildbefliegungen für Waldgebiete.

Einen besonderen Stellenwert in der Ableitung der DOM hat der Einschneidewinkel. Dieser hängt direkt von der Brennweite und der Überlappung der Einzelbilder ab. Die Untersuchungen der verschiedenen Kamerasysteme haben gezeigt, dass der optimale Einschneidewinkel für Waldgebiete zwischen 5 und 10 Grad liegt. Darüber hinaus eignen sich Kamerasysteme mit einer längeren Brennweite aufgrund der geringeren perspektivischen Verkippung von erhöhten Objekten zu Rand hin besser für die Ableitung von DOM in Waldgebieten. Neben der Brennweite und Bildüberlappung bestimmt auch die gegebene Bodenauflösung das Ergebnis der DOM maßgeblich. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die optimale Bodenauflösung zwischen 15 cm und 20 cm liegt.

In einem zweiten Teil wird eine Methode zur Einzelbaumextraktion vorgestellt. Aufbauend auf einem Baummodell, welches alle für die Ableitung relevanten Information enthält, wird unter Verwendung der geometrischen Informationen aus dem Digitalen Oberflächenmodell und den spektralen Informationen aus dem Luftbild die Einzelbaumextraktion durchgeführt. Die Ableitung der Einzelbäume erfolgt wiederum zweigeteilt. Zunächst werden mit Hilfe einer

GIS-gestützten Focal Statistics Analyse die Baumspitzen extrahiert. Diese werden in einem daran anschließenden Region Growing Verfahren als Ausgangspunkte für die Ableitung der Baumumringe verwendet.

Dabei wird ein Schwerpunkt auf die Ableitung von Laub- und Nadelbäumen gesetzt. Aufgrund ihres Habitus lassen sich mit der vorgestellten Methode Nadelbäume mit sehr hohen Vollständigkeits- und Korrektheitsraten ableiten. Aufgrund ihrer geometrischen Form stellt die Extraktion von Laubbäumen bis heute eine große Herausforderung dar. Mit der vorgestellten Methode können auch Laubbäume mit hohen Genauigkeiten extrahiert werden, allerdings liegt die Genauigkeit der Laubbaumextraktion unter der der Nadelbaumextraktion.

Summary

The topic of this thesis is the extraction of single trees from high-resolution digital images using True Orthophoto Mosaics (TOM) and photogrammetric derived digital surface models (DOM). Within this study the single tree derivation research was developed on the basis of two sections. In the first section a systematic evaluation was preceded by an actual analysis of the basic data and was carried out in order to figure out if input data can influence the correctness of the extraction results. In the second section on the basis of this evaluation a new developed method for the detection of single trees from high resolution aerial images and digital surface models shall be presented within this thesis.

The influence of the input data's quality for the extraction of single trees has never been scientifically examined. The basis within this study is the assumption that the used input data is significantly influencing the results of single tree extraction. The data quality of aerial images and photogrammetric derived digital surface models are highly depended on image flight and processing parameters. In order to proof the research hypothesis a systematic evaluation of every relevant image flight and processing parameter is carried out within this study. Ground resolution, focal length, vertical and horizontally overlapping as well as direction of flight are part of the flight's parameter. Based on a statistical evaluation on the basis of these parameters concerning its influences on the quality of digital surface models recommendations for planning image flights of woodlands are made.

The angle of view which depends on focal length and the overlapping of single images is very important for the derivation of DOM. The evaluation of different camera systems showed that the optimum angle of view for woodlands lays between 5 to 10 degrees. In addition to that camera systems with a long focal length are more suitable for the derivation of DOM in woodlands because of its low perspective tipping of raised objects to its edge. Besides focal length and picture overlapping the given ground resolution is a very decisive fact for the result of DOM. Examinations show that the optimum ground resolution lays between 15 and 20 cm.

In the second part of this thesis a method for single tree extraction is presented. Based on a tree model - which includes all relevant information for the derivation of trees - the single tree derivation is carried out using geometric data of digital surface models and spectral data of aerial images. Thereby the single tree derivation is divided into two parts. First tree tops are extracted with the help of a GIS based Focal Statistics Analysis. Afterwards the extracted tree tops are used as initial points for the region growing approach in order to derivate tree rings.

Doing so special emphasis is put on the derivation of deciduous and conifer trees. Because of its habitus using the presented method conifer trees can be derivated with very high completeness and correctness. Due to its geometric form the extration of deciduous trees is still a big challenge until today. With the presented method deciduous trees can also be extracted with a high correctness, but the correctness of deciduous trees extraction is still lower than the extraction of conifer trees.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Forschungsgegenstand und Problemstellung	1
1.2	Motivation und Zielsetzung	2
1.3	Erkenntnisleitende Fragestellung und Forschungshypothesen	3
1.4	Wissenschaftliche und gesellschaftliche Relevanz der Arbeit	5
1.5	Verwendete Methoden	6
1.6	Aufbau der Arbeit	6
2	Stand der Forschung	7
2.1	Grundlagen der spektralen Fernerkundung	7
2.1.1	Elektromagnetische Strahlung als Grundlage der Fernerkundung	7
2.1.2	Reflexion, Absorption und Transmission der elektromagnetischen Strahlung an Oberflächen	9
2.1.3	Reflexions-, Absorptions- und Transmissionseigenschaften von Blattorganen	12
2.1.4	Reflexions-, Absorptions- und Transmissionseigenschaften von Pflanzenbeständen	16
2.1.5	Einfluss der Phänologie auf die Analyse von Baumbeständen und Einzelbäumen	16
2.1.6	Einfluss des Alters sowie der Artenzusammensetzung auf die Analyse von Baumbeständen und Einzelbäumen	17
2.1.7	Bedeutung der spektralen Reflexion für die Ableitung von Einzelbäumen	18
2.2	Grundlagen der digitalen Luftbildaufnahme	20
2.2.1	Aufnahmesysteme der Fernerkundung	20
2.2.2	Aufnahme von digitalen Luftbildern	21
2.2.3	Einfluss der Aufnahmerichtung von digitalen Luftbildern und Positionsbestimmung	21
2.2.4	Einfluss der Brennweite und des Öffnungswinkels bei digitalen Luftbildaufnahmen	23
2.2.5	Einfluss der spektralen, geometrischen und radiometrischen Auflösung auf die Komplexität digitaler Luftbildaufnahmen	24
2.2.6	Einfluss der Flugplanung und Anordnung der aufgenommenen digitalen Luftbilder	27

2.2.7	Bedeutung der Luftbildaufnahme für die Ableitung von Einzelbäumen	28
2.3	Grundlagen der digitalen Bildauswertung	30
2.3.1	Geometrisch-radiometrische Bildauswertung	30
2.3.1.1	Ableitung Digitaler Oberflächenmodelle (DOM) und Digitaler Geländemodelle (DGM) auf Basis hochauflösender digitaler Luftbilder	31
2.3.1.2	Ableitung hochauflösender True Orthophoto Mosaik	33
2.3.2	Interpretation und Analyse hochauflösender digitaler Luftbilder	33
2.3.2.1	Modellbasierte Bildanalyse	34
2.3.2.2	Objektbasierte Bildanalyse	37
2.4	Verfahren zur Einzelbaumextraktion aus Satellitenbildern und digitalen Luftbildern	40
2.4.1	Template-Matching Verfahren	41
2.4.2	Region Growing	43
2.4.3	Blob Detection – Extraktion spektraler lokaler Maxima	44
2.4.4	Valley Following Approach – Extraktion spektraler lokaler Minima	46
2.4.5	Morphologischer Ansatz	47
2.4.6	Hill Climbing Approach – Extraktion lokaler Maxima im Oberflächenmodell	48
2.4.7	Kantendetektion	50
2.4.8	Wasserscheidenverfahren und Senkenanalyse	52
2.4.9	Volumetrische Baumerkennung	53
2.4.10	NATSCAN Verfahren	55
2.4.11	Marble-Rolling Verfahren	55
2.4.12	Weiterführende und vergleichende Ansätze zur Einzelbaumextraktion	56
3	Methodische Vorüberlegungen und Untersuchungsgebiete	58
3.1	Datenvorverarbeitung	58
3.2	Qualitätsanalyse der Digitalen Oberflächenmodelle	61
3.2.1	Auswertung der Matchings pro Pixel	61
3.2.2	Berechnung des Einschneidewinkels	64
3.3	Verfahrensschritte der Einzelbaumextraktion	66
3.3.1	Ableitung der Baummasken	68
3.3.2	Ableitung von Baumspitzen mit Hilfe der Focal Statistics Analyse	68
3.3.3	Ableitung von Baumkronen mit Hilfe eines Region Growing Algorithmus'	71
3.4	Genauigkeitsanalyse der Einzelbaumextraktion	72
3.4.1	Bestimmung der Kontrollbäume	72
3.4.2	Absolute und relative Genauigkeiten	76
3.5	Vorstellung der Untersuchungsgebiete und verwendeten Luftbildaufnahmen	82
3.5.1	Gleisdorf	82

3.5.2	München	83
3.5.3	Murnau	84
3.5.4	Baruth/Mark	85
3.5.5	Habichtswald	86
4	Darstellung der empirischen Ergebnisse	87
4.1	Einfluss der Flugparameter auf die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen	87
4.1.1	Einfluss des Einschneidewinkels	87
4.1.2	Einfluss der Bodenauflösung	88
4.1.3	Einfluss der Längs- und Querüberlappung	95
4.1.4	Einfluss der Brennweite	104
4.1.5	Einfluss der Flugrichtung	114
4.2	Einfluss der Prozessierungsparameter auf die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen	120
4.2.1	Einfluss des Downscapes	120
4.2.2	Einfluss des Quermatchings	121
4.2.3	Einfluss der Anzahl der gematchten Bilder	122
4.2.4	Zusammenfassung des Einflusses der Prozessierungsparameter für die Einzelbaumableitung	122
4.3	Einfluss des Bilateral-Filters auf die Ableitung von Einzelbäumen	123
4.4	Genauigkeitsanalyse der Baummasken	128
4.4.1	Baummaske Habichtswald	128
4.4.2	Baummaske Baruth	128
4.4.3	Baummaske München	129
4.4.4	Baummaske Gleisdorf	129
4.4.5	Baummaske Murnau	130
4.4.6	Zusammenfassung der Genauigkeit der Baummasken	130
4.5	Ergebnisse Einzelbaumextraktion	131
4.5.1	Ergebnisse der Focal Statistics Analyse	131
4.5.2	Ergebnisse des Region Growing	140
4.5.3	Übertragung der Einzelbaummethode auf weitere Kamerasysteme und Regionen	145
5	Schlussfolgerung / Konklusion	149
5.1	Beantwortung der Forschungsfragen	149
5.2	Überprüfung der Forschungshypothese	156
5.3	Bewertung der Forschungsergebnisse und Anwendbarkeit für die Forstfernerkundung	157
5.4	Ansätze für weitere Verbesserungen und zukünftige Entwicklungen	158

Abbildungsverzeichnis

2.1	Elektromagnetisches Spektrum	9
2.2	Einfluss der Oberfläche auf die elektromagnetische Strahlung	10
2.3	Spektrale Reflexionskurven unterschiedlicher Oberflächen	10
2.4	Einfluss von Sonnen- und Schattenseite und Bestimmung des Mitlicht- und Gegenlichtbereiches	11
2.5	Mischung aus spiegelnder und diffuser Reflexion an Baumoberflächen	12
2.6	Reflexionsverhalten von grüner und trockener Vegetation	13
2.7	Abhängigkeit des spektralen Reflexionsgrades vom Aufnahmezeitpunkt am Beispiel von Eichenblättern	13
2.8	Verschiebung der spektralen Reflexionskurve von Fichten unter Stresseinwirkung	14
2.9	Schematische Darstellung des Reflexions- und Absorptionsverhaltens von grünen Blättern	15
2.10	Spektrale Varianzen identischer Objekte am Beispiel von Laub- und Nadelbäumen	19
2.11	Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Fernerkundungssystemen	20
2.12	Nadir-, Senkrecht- und Schrägaufnahmen von Luftbildern	22
2.13	Verkipfung von Bäumen in Senkrechtaufnahmen am Beispiel von Waldbe- ständen und Einzelbäumen	23
2.14	Einfluss von Brennweite und Öffnungswinkel auf die Aufnahmefläche bei gleicher Flughöhe	24
2.15	Verhältnis von Bodenauflösung, Brennweite, Flughöhe und Pixelgröße	26
2.16	Komplexität von Luftbildern	27
2.17	Längs- und Querüberlappung alternierender Flugstreifen	28
2.18	DOM und TOM einer Laubwaldszene (Habichtswald)	33
2.19	Teilmodelle der Bildanalyse	35
2.20	Ebenenmodell der Bildanalyse	37
2.21	Einteilung der Ansätze der Bildauswertung hinsichtlich Komplexität der Daten und Modelle	37
2.22	Modellgetriebener Ansatz der Einzelbaumextraktion	40
2.23	Datengetriebener Ansatz der Einzelbaumextraktion	41
2.24	Baummodell nach Pollock	42
2.25	Lokale Helligkeitsmaxima, Bestimmung der Baumkronen	46
2.26	Ergebnisse der Baumkronenabgrenzung	47

2.27	Morphologische Öffnungsoperation	48
2.28	Top-Hat Transformation	48
2.29	Erstellung und Bereinigung eines Kronenmodelles	49
2.30	Baumkronenkanten mit berechneter Krümmung (Graustufen)	51
2.31	Identifizierung von Wasserscheiden und Errichtung von Dämmen (Reitberger 2010: 30)	52
2.32	Senken und Senkensohlenanalyse für Nadelwälder	53
2.33	Ablauf der Volumetrischen Baumerkennung	54
2.34	Konzept der rollenden Kugel für die Ableitung von Einzelbäumen	56
3.1	Funktionsweise des Bilateral-Filters	60
3.2	Count- und RGB-Layer München	62
3.3	Einschneidewinkel am Bildmittelpunkt	65
3.4	Objektmodell eines Baumes	67
3.5	Prinzip der Funktionsweise der Focal Statistics Analyse (verändert nach ESRI 2016)	69
3.6	Terrestrische Messung der Kontrollbäume mit dem Riegl Laser Scanner LMS Z620	73
3.7	360°C Panorama Aufnahme eines Altbestandes	73
3.8	360°C Panorama Aufnahme eines Jungbestandes	73
3.9	Bestimmung der Kontrollbäume aus Punktwolke und Fotoaufnahme	74
3.10	Berechnung des Baumstandortes an der Baumspitze	75
3.11	Einfluss der Kontrollpunkte bei schräg wachsenden Bäumen	75
3.12	Kontrollbäume im Untersuchungsgebiet München	76
3.13	Fehlermatrix	77
3.14	Mögliche topologische Beziehungen zwischen zwei Segmenten	80
3.15	Bestimmung der richtig und falsch sowie nicht extrahierten Baumsegmente für die Berechnung von Vollständigkeit und Korrektheit	81
3.16	Untersuchungsgebiete	82
3.17	Höhenprofil und Trajektorie der Befliegung in Baruth/Mark	85
4.1	Einfluss des Einschneidewinkels	88
4.2	Einfluss des Einschneidewinkels (α) auf die Sichtbeziehungen von Bäumen	88
4.3	Einschneidewinkel für die MACS MAR mit 51 mm Brennweite	89
4.4	Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings für das Untersu- chungsgebiet Baruth	91
4.5	Countlayer Baruth mit einer GSD von 20 cm und 80 Prozent Längsüberlappung	92
4.6	Countlayer Baruth mit einer GSD von 9 cm und 80 Prozent Längsüberlappung	92
4.7	NIR-TOM Baruth mit einer GSD von 9 cm	93
4.8	Sichtbeziehungen auf einen Baum aus verschiedenen Bildern	94

4.9	Einschneidewinkel für die DMC II mit 92mm Brennweite	96
4.10	Verlauf des Anteils der Countwerte mit Null in Abhängigkeit von der Längs- überlappung	97
4.11	Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings für das Untersu- chungsgebiet und die Baummaske München (Einzelstreifen)	98
4.12	RGB und Countlayer für die Baummaske von München	101
4.13	Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings für die Baummaske von München (Bildverband)	102
4.14	Flugstreifen München mit einer Querüberlappung von 40 Prozent	104
4.15	Einschneidewinkel für die UltraCam Eagle mit 80 mm und 210 mm Brennweite	105
4.16	Anteil der tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings für das Unter- suchungsgebiet Gleisdorf	108
4.17	Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings innerhalb der Baummaske des Untersuchungsgebietes Gleisdorf	108
4.18	Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings für den Bildrand und das Bildzentrum	109
4.19	Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings für den Bildverband des Untersuchungsgebietes Gleisdorf ohne Quermatching	112
4.20	Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings für den Bildverband der Baummaske des Untersuchungsgebietes Gleisdorf ohne Quermatching . .	112
4.21	Einfluss der Brennweite auf die Flughöhe und das Matching am Bildrand bei gleicher Bodenauflösung (5 cm)	114
4.22	Einschneidewinkel für die MACS Hale mit 51 mm Brennweite	115
4.23	RGB und Countlayer für die Nord-Süd-Befliegung und die Ost-West-Befliegung	116
4.24	Verlauf des Anteils der Countwerte mit Null in Abhängigkeit von der Längs- überlappung und Flugrichtung	118
4.25	Höhenprofil eines Baumes mit und ohne Bilateralfilter	124
4.26	Einfluss von Sigma und Filtergröße auf die Glättung des DOM	125
4.27	Einfluss von Sigma und Filtergröße auf die Berechnung der Neigung	126
4.28	Einfluss von Sigma und Filtergröße auf die Berechnung der Ausrichtung	127
4.29	Ergebnisse der automatischen Einzelbaumextraktion im Nadelwald	132
4.30	Ergebnisse der automatischen Einzelbaumextraktion im Laubwald (Altbestand)	132
4.31	Ergebnisse der automatischen Einzelbaumextraktion im Laubwald (Jungbestand)	133
4.32	Habitus von Laub- und Nadelbäumen	134
4.33	Vollständigkeit der Baumspitzenextraktion im Untersuchungsgebiet Baruth . .	136
4.34	Korrektheit der Baumspitzenextraktion im Untersuchungsgebiet Baruth	136
4.35	Vollständigkeiten und Korrektheiten der Einzelbaumextraktion für München .	138
4.36	Vollständigkeiten und Korrektheiten der Einzelbaumextraktion für Gleisdorf .	139
4.37	Ergebnisse des Region Growing für den Laubwald Altbestand unter Berück- sichtigung von spektralen Informationen	142

4.38	Ergebnisse des Region Growing für den Laubwald Altbestand unter Berücksichtigung von geometrischen Informationen	142
4.39	Ergebnisse des Region Growing für den Nadelwald unter Berücksichtigung von spektralen Informationen	143
4.40	Region Growing für Nadelbäume auf Basis von spektralen Informationen und Neigung	144
4.41	Region Growing für Nadelbäume auf Basis von spektralen Informationen und Ausrichtung	144
4.42	Genauigkeiten der Einzelbaumextraktion für ältere Straßenbäume	146
4.43	Genauigkeiten der Einzelbaumextraktion für jüngere Straßenbäume	146
4.44	Baumspitzen und Baumumringe von Nadelbäumen	147
4.45	Baumspitzen und Baumumringe von unbelaubten Laubbäumen	148

Tabellenverzeichnis

2.1	Wellenlängenbereiche der UltraCamX Kamera, der DMC II Kamera sowie der DLR MACS Hale Kamera	8
2.2	Parameterwert für den geometrischen Teil des Baummodelles nach Pollock (1996)	42
3.1	Bewertungstabelle der Kappa Werte	79
3.2	Flugparameter der Befliegungen in Gleisdorf	83
3.3	Flugparameter der Befliegungen in München	84
3.4	Flugparameter der Befliegungen in Murnau	85
3.5	Flugparameter der Befliegungen in Baruth/Mark	86
3.6	Flugparameter der Befliegungen in Habichtswald	86
4.1	Nicht gematchte Bereiche (Count Null) für die Befliegung Baruth	90
4.2	Countanteile für Einzelstreifen mit 80 und 60 Prozent Längsüberlappung (München)	97
4.3	Anteile für den Countwert Null für das Untersuchungsgebiet und die Baummaske von München bei einer 80 prozentigen Längsüberlappung	99
4.4	Anteile für den Countwert Null für das Untersuchungsgebiet und die Baummaske von München bei einer 60 prozentigen Längsüberlappung	100
4.5	Anzahl der Counts innerhalb des Untersuchungsgebietes Gleisdorf für einen Einzelstreifen	106
4.6	Anzahl der Counts innerhalb der Baummaske des Untersuchungsgebietes Gleisdorf für einen Einzelstreifen	107
4.7	Anzahl der Counts im Bildzentrum sowie am Bildrand	109
4.8	Anteil der Countwerte mit einem Count von Null	111
4.9	Countanteil für die Nord-Süd- und Ost-West-Befliegung für das Untersuchungsgebiet Murnau	117
4.10	Countanteil für die Nord-Süd- und Ost-West-Befliegung für die Baummaske des Untersuchungsgebietes Murnau	117
4.11	Anteil mit Count Null für Downscale 1, 2 und 3	121
4.12	Anteil mit Count Null für Inflight 1 und Inflight 2	122
4.13	Fehlermatrix Baummaske Habichtswald	128
4.14	Fehlermatrix Baummaske Baruth	129

4.15 Fehlermatrix Baummaske München	129
4.16 Fehlermatrix Baummaske Gleisdorf	130
4.17 Fehlermatrix Baummaske Murnau	130
4.18 Vollständigkeiten und Korrektheiten der Einzelbaumextraktion für den Ha- bichtswald	131
4.19 Vollständigkeiten und Korrektheiten der Einzelbaumextraktion für Baruth . .	135
4.20 Vollständigkeiten und Korrektheiten der Einzelbaumextraktion für Murnau . .	140

1 Einleitung

1.1 Forschungsgegenstand und Problemstellung

In den letzten Jahrzehnten wurden mit der Verbesserung der Auflösung von Fernerkundungsdaten und der zunehmenden Verbreitung dieser Daten in Wissenschaft und Praxis zahlreiche Ansätze und Methoden in der Forstfernerkundung entwickelt. Ein bedeutender Zweig forstfernerkundlicher Analysen ist die Extraktion von Einzelbäumen. Für Laserdaten und Luftbilder wurden unterschiedlichste Verfahren entwickelt, um Einzelbäume anhand ihrer Spitzen und/oder Baumkronen eindeutig und automatisch identifizieren zu können. Ein Großteil der bisher durchgeführten Forschungen war dabei auf die Nutzung von Laserdaten sowie die Ableitung von Nadelbäumen beschränkt. Auch sind die veröffentlichten Forschungen stark auf die Algorithmenentwicklung ausgerichtet. Hochauflösende Luftbilder sowie photogrammetrisch abgeleitete Digitale Oberflächenmodelle werden dagegen in geringerem Umfang für die Einzelbaumextraktion genutzt. Auch stellt die Ableitung von Laubbäumen mit hoher Genauigkeit bis heute eine große Herausforderung dar.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher vorrangig mit der automatischen Extraktion von Laub- und Nadelbäumen auf der Basis hochauflösender True Orthophoto Mosaik (TOM) und photogrammetrisch abgeleiteter Digitaler Oberflächenmodelle (DOM). Dabei werden zwei Hauptforschungsschwerpunkte im Rahmen der Arbeit untersucht. Zum einen erfolgt eine intensive Auseinandersetzung mit dem Einfluss der Qualität der Eingangsdaten auf die Genauigkeit der Extraktionsergebnisse und zum anderen wird eine Methode vorgestellt, mit der Laub- und Nadelbäume mit hohen Genauigkeiten abgeleitet werden können.

Die Arbeit untersucht daher vor der eigentlichen Ableitung der Einzelbäume zunächst die Qualität der Eingangsdaten, da von dieser die erreichten Vollständigkeits- und Genauigkeiten entscheidend abhängen. Digitale Luftbilder sowie aus ihnen abgeleitete Digitale Oberflächenmodelle haben gegenüber Laserdaten eine Reihe von Vorteilen bei der Einzelbaumextraktion und sind deutschlandweit mit einer hohen Aktualität verfügbar. Im Rahmen der Arbeit werden ausschließlich hochauflösende True Orthophoto Mosaik und photogrammetrisch abgeleitete Digitale Oberflächenmodelle verwendet. Diese zeichnen sich durch eine sehr hohe absolute und relative Lage- und Höhengenaueigkeit, die gleichzeitige Verfügbarkeit von geometrischen und radiometrischen Informationen sowie eine im Vergleich zu einer Laserbefliegung kostengünstige Datenerhebung aus.

Die Qualität der verwendeten TOM und DOM ist von verschiedenen sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren abhängig. Dazu gehört neben den Parametern für die Luftbildaufnahme auch die sich anschließende Prozessierung der digitalen Luftbilder. Zu den Parametern, welche im Rahmen der Luftbildaufnahme die Qualität entscheidend beeinflussen, gehören:

- die Längs- und Querüberlappung der Einzelbilder,
- der Öffnungswinkel und die Brennweite der Luftbildkamera in Flugrichtung sowie quer zur Flugrichtung,
- die erreichte Bodenauflösung (GSD),
- die radiometrische Auflösung,
- die Flugrichtung und Flughöhe,
- die Beleuchtungsverhältnisse und atmosphärischen Einflüsse.

Daneben gibt es eine Vielzahl von Parametern, welche direkt und indirekt von der Luftbildaufnahme abhängen, die während der Prozessierung der Luftbilder und Oberflächenmodelle die Datenqualität beeinflussen:

- Einschneidewinkel,
- pyramidales Matching vs. Matching in Originalauflösung,
- Berücksichtigung oder Ausschluss des Quermatchings,
- Anzahl der verwendeten Bildpaare für das Matching.

Neben der Untersuchung der Eingangsdaten liegt ein zweiter Forschungsschwerpunkt auf der automatischen Extraktion von Einzelbäumen aus den TOM und DOM. Ein Hauptaugenmerk wird dabei auf die Entwicklung einer Methode für die Ableitung von Laubbäumen mit einer hohen Genauigkeit gelegt, da hier derzeit ein großer Forschungsbedarf besteht.

In der realen Welt sind Bäume durch eine Vielzahl von komplexen Merkmalen gekennzeichnet. Trotz der Komplexität der Merkmale eines Baumes sowie der Unterschiede zwischen verschiedenen Baumarten ist der Mensch in der Lage, Bäume in Luftbildern mit einer sehr hohen Genauigkeit zu erkennen und zu unterscheiden. Die Nachahmung dieser Perzeption ist die Grundlage aller Ansätze zur Einzelbaumextraktion und auch der vorliegenden Arbeit.

Eine Vielzahl der Eigenschaften eines Baumes lässt sich in Luftbildern direkt messen und in einem Modell zusammenfassen. Die Arbeit beschäftigt sich daher mit der Entwicklung eines einfachen und leicht übertragbaren Objekt-, Bild- und Extraktionsmodelles, mit welchem Laub- und Nadelbäume auf Basis von TOM und DOM automatisch abgeleitet werden können.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Trotz der zahlreichen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Einzelbaumextraktion stellt die automatische Ableitung von Bäumen aus Fernerkundungsdaten aufgrund der sich teilweise stark unterscheidenden Eigenschaften der Bäume bis heute eine große Herausforderung

für Wissenschaft und Praxis dar. Aufgrund der einfacheren Morphologie von Nadelbäumen wurde in der Vergangenheit der Großteil der Methoden für Nadelbäume entwickelt. Diese lassen sich mit den verschiedenen Ansätzen mit teilweise hoher Genauigkeit automatisch ableiten. Die Extraktion von Laubbäumen stellt dabei bis heute ein großes Problem dar, welches in Wissenschaft und Praxis bisher nicht befriedigend gelöst werden konnte. Für die Forstwissenschaft und Forstwirtschaft ist die genaue Lagebestimmung und Attributierung von Laubbäumen in den europäischen Mischwaldgebieten jedoch von großer Bedeutung.

Die Untersuchungen auf dem Gebiet der Einzelbaumextraktion beschränkten sich bisher überwiegend auf die Methoden- und Algorithmenentwicklung. Systemtische Analysen der Eingangsdaten sowie des Einflusses dieser auf das Extraktionsergebnis wurden bisher nicht bzw. nur sehr vereinzelt und oberflächlich durchgeführt.

Das **Hauptziel** der Arbeit ist daher die Entwicklung einer Methode, mit welcher Laub- und Nadelbäume in geschlossenen Beständen auf Basis von geeigneten TOM und DOM automatisch und mit hoher Genauigkeit extrahiert werden können.

Da die Genauigkeit der Ergebnisse der Einzelbaumextraktion entscheidend von den Eingangsdaten abhängt, ist es unerlässlich, geeignete Flug- und Prozessierungsparameter für die Ableitung von Einzelbäumen zu bestimmen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden verschiedene Kombinationen von Flugparametern systematisch ausgewertet und miteinander verglichen.

Ziel der Arbeit ist darüber hinaus, die Überführung der Ergebnisse in einen Leitfaden der Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL), um zukünftige Luftbildaufnahmen im Hinblick auf die Ableitung Digitaler Oberflächenmodelle sowie von Einzelbäumen zielgerichteter ausschreiben und durchführen zu können.

Nach der Bestimmung von geeigneten Parametern ist es ein Anliegen dieser Arbeit, eine leicht übertragbare Methode für unterschiedliche Regionen und Datengrundlagen zu entwickeln, mit der sowohl Laub- als auch Nadelbäume mit hohen Vollständigkeits- und Korrektheitsgraden automatisch bestimmt werden können. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der automatischen Ableitung von Laubbäumen in geschlossenen Beständen, da diese die größte Herausforderung darstellen. Ziel ist die Entwicklung eines geschlossenen Workflows, mit welchem potentielle Anwender ohne großes Vorwissen unter Verwendung geeigneter Eingangsdaten automatisch Einzelbäume ableiten können.

1.3 Erkenntnisleitende Fragestellung und Forschungshypothesen

Die vorliegende Arbeit ist gekennzeichnet durch eine Kombination von explorativem und hypothesengeleitetem Vorgehen. Aufgrund des Vorwissens zum Einfluss der Qualität der verwendeten Datengrundlagen wird folgende Haupthypothese aufgestellt, welche mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen falsifiziert oder verifiziert wird:

Die Genauigkeit der Ergebnisse einer automatischen Einzelbaumextraktion auf Basis hochaufgelöster TOM und DOM wird entscheidend von zwei Faktoren bestimmt. Diese Faktoren sind einerseits die Qualität der Eingangsdaten sowie andererseits die Funktionsfähigkeit des Extraktionsalgorithmus selbst. Fehlerhafte Datengrundlagen können durch den Extraktionsalgorithmus nur bedingt korrigiert werden.

Zur Überprüfung der vorangestellten Hypothese werden eine Reihe von erkenntnisleitenden Forschungsfragen gestellt:

1. Sind hochauflösende TOM und photogrammetrisch abgeleitete DOM für die automatische Extraktion von Einzelbäumen geeignet?
2. Welche Flug- und Kameraparameter haben in welchem Umfang Einfluss auf die Qualität der prozessierten TOM und DOM?
3. Welche Mindestanforderungen hinsichtlich der Flug- und Kameraparameter müssen bei einer Luftbildbefliegung erfüllt sein, damit die prozessierten TOM und DOM für die Einzelbaumextraktion verwendet werden können?
4. Was ist die beste Kombination von Flugparametern für eine automatische Extraktion von Laub- und Nadelbäumen mit einer großen Vollständigkeit und Korrektheit der Extraktionsergebnisse?
5. In welchem Umfang beeinflusst die verwendete Prozessierungsmethode die Qualität der DOM?
6. Was sind die geeignetsten Prozessierungsparameter hinsichtlich einer großen Extraktionsgenauigkeit von Einzelbäumen?
7. Welche Eingangsdaten sind für eine lagegenaue Einzelbaumextraktion mindestens notwendig?
8. Mit welchen Eingangsdaten kann die Extraktionsgenauigkeit verbessert werden?
9. Ist die Aufstellung eines Baummodelles erforderlich?
10. Welches ist das geeignetste Baummodell, d.h., welche Baumeigenschaften müssen während des Extraktionsprozesses untersucht und für die Ableitung verwendet werden?
11. Welches ist die geeignetste Extraktionsstrategie für Laub- und Nadelbäume?
12. Gibt es bei der Ableitung von Einzelbäumen Unterschiede in den Modellannahmen und der Extraktionsstrategie zwischen Nadel- und Laubbäumen?
13. Können Nadel- und Laubbäume mit den gleichen Genauigkeiten abgeleitet werden?
14. Lassen sich das erstellte Baummodell und die vorgestellte Methode der Einzelbaumextraktion auf unterschiedliche Kamerasysteme übertragen?

1.4 Wissenschaftliche und gesellschaftliche Relevanz der Arbeit

Die lange Tradition auf dem Gebiet der Ableitung von Einzelbäumen aus Fernerkundungsdaten verdeutlicht die große Bedeutung für Wissenschaft und Praxis. Aus wissenschaftlicher Sicht leistet die vorliegende Arbeit in zwei Bereichen einen Beitrag zur Erweiterung des Wissens:

1. Eine systematische Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Flug- und Prozessierungsparameter für die Einzelbaumextraktion ist bisher in keiner der Forschungsarbeiten, welche Luftbilder und photogrammetrisch abgeleitete Oberflächenmodelle verwenden, durchgeführt worden. Die unterschiedlichen Datengrundlagen erschweren dabei auch den Vergleich der Ergebnisse. Die vorliegende Arbeit leistet daher einen entscheidenden Beitrag zur Grundlagenforschung, da hier eine solche Analyse erfolgt.
2. Aufgrund der einfacheren Morphologie und der damit einhergehenden höheren Genauigkeit der Ergebnisse wurde ein Großteil der bisherigen Forschungen für Nadelbäume durchgeführt. Auf dem Gebiet der Extraktion von Laubbäumen besteht dagegen noch ein entscheidender Forschungsbedarf. Bereits veröffentlichte Ansätze liefern hinsichtlich Vollständigkeit und Korrektheit nicht die für eine praktische Nutzung geforderte Genauigkeit. Die Arbeit setzt daher einen Schwerpunkt auf die Entwicklung einer Methode, mit welcher auch Laubbäume auf Basis von TOM und DOM mit hohen Genauigkeiten abgeleitet werden können. Diese wird im Sinne einer allumfassenden Methodenentwicklung auch für Nadelbäume getestet und optimiert.

Neben der hohen wissenschaftlichen Relevanz hat die Arbeit auch eine große Bedeutung für die Forstwirtschaft und damit eine hohe gesellschaftliche Relevanz. In Deutschland ist mit 11,4 Millionen Hektar rund ein Drittel der Landesfläche mit Wäldern bedeckt (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014: 3). Neben der ökologischen Funktion des Waldes ist die Forstwirtschaft durch die Bereitstellung des Rohstoffes Holz auch ein bedeutender Wirtschaftszweig. 2013 wurden in Deutschland 84 Millionen Kubikmeter bzw. 40,2 Millionen Tonnen Holz eingeschlagen, wobei rund ein Viertel des eingeschlagenen Holzes auf Laubhölzer entfiel. 1,1 Millionen Personen waren 2013 im Wirtschaftszweig Forst und Holz beschäftigt (vgl. Statistisches Bundesamt 2014). Es ist zu erwarten, dass der Aufbau einer Datenbank für einzelne Waldgebiete, welche die Baumstandorte sowie sinnvolle Baumattribute enthält, zu einer Effizienzsteigerung der Forstwirtschaft führt und damit zu einer ökonomisch und ökologisch verbesserten Waldnutzung.

Mit Hilfe des geplanten Praxisleitfadens wird dabei den verschiedensten Anwendern aus dem Forst-, Umwelt- und Planungsbereich eine Entscheidungshilfe zur Seite gestellt, mit welcher zukünftige Luftbilddaufnahmen effizienter und zielgerichteter ausgeschrieben werden können. Die Erkenntnisse der Arbeit sind dabei nicht nur für die Forstwirtschaft von großem Nutzen. Auf Grundlage der Ergebnisse können auch im städtischen Bereich Baumkataster automatisch und mit hohen Genauigkeiten erstellt und für die verschiedensten Planungsaufgaben verwendet werden.

1.5 Verwendete Methoden

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein umfassender Methodenmix zur Erreichung der eingangs gesetzten Ziele und zur Beantwortung der erkenntnisleitenden Fragestellungen durchgeführt. Entsprechend der Zweiteilung der Arbeit ist auch die methodische Arbeit zweigeteilt. Zur Beantwortung der Frage der geeignetsten Flug- und Prozessierungsparameter werden Luftbildbefliegungen aus verschiedenen Regionen Deutschlands und Österreichs sowie von unterschiedlichen Luftbildkamerasystemen systematisch mit statistischen Methoden untersucht und ausgewertet.

Im Anschluss an die statistische Auswertung der untersuchten Befliegungen wird mit den Methoden der objektbasierten Bildanalyse sowie mit GIS-Methoden eine Extraktionsstrategie für die Ableitung von Laub- und Nadelbäumen entwickelt.

1.6 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in fünf Hauptteile. In Kapitel eins erfolgt eine kurze Einführung in das Thema der Arbeit sowie deren Zielsetzung. Dieser Einleitung schließt sich im Kapitel zwei eine umfassende theoretische Auseinandersetzung mit der Themenstellung an. Nach der theoretischen Betrachtung erfolgt in Kapitel drei die Vorstellung der eingesetzten Methoden und der verwendeten Befliegungen. In Kapitel vier schließt sich als Hauptteil der Arbeit eine zweigeteilte empirische Auseinandersetzung an. Im ersten Teil wird der Einfluss der Flug- und Prozessierungsparameter auf die Datenqualität untersucht. Im zweiten Teil der empirischen Untersuchung wird eine Methode für die Extraktion von Einzelbäumen auf Basis hochaufgelöster TOM und DOM vorgestellt. In Kapitel fünf erfolgt die Schlussfolgerung. In der Konklusion werden die Ergebnisse der empirischen und theoretischen Auseinandersetzung zur Überprüfung der eingangs aufgestellten Hypothese und zur Beantwortung der erkenntnisleitenden Fragestellungen genutzt.

2 Stand der Forschung

2.1 Grundlagen der spektralen Fernerkundung

Zielsetzung des Kapitels „Grundlagen der spektralen Fernerkundung“ ist eine themenbezogene Einführung in die Thematik der fernerkundlichen Einzelbaumextraktion. Für eine detailliertere Darstellung der allgemeinen Grundlagen der Fernerkundung sei auf die sehr umfangreiche Grundlagenliteratur verwiesen (vgl. Albertz 2009, vgl. Jensen 2014, vgl. Lillesand et al. 2015, vgl. Sabins 2007, vgl. Tempfli et al. 2009).

Da im Rahmen der Arbeit ausschließlich die Extraktion von Bäumen auf Basis hochauflösender digitaler Luftbilder im Vordergrund steht, wird im Folgenden verstärkt auf den Einsatz passiver optischer Fernerkundungssysteme sowie die Eigenschaften von Vegetationsoberflächen eingegangen.

Bei der Analyse von Vegetationsoberflächen mit Hilfe von digitalen Luftbildern nutzt man den allgemeingültigen Effekt, dass sich die Oberflächen von Objekten hinsichtlich ihrer Reflexionseigenschaften unterscheiden (Buhk 2000: 5). Die spektrale Reflexion der Objekte wird nach Gerstl (1990: 1109f) durch fünf charakteristische Merkmale bestimmt:

- die spektrale Signatur der Objekte selbst, d.h. die Reflexion, Absorption und Transmission der Strahlung (siehe Kap. 2.1.1),
- die räumliche Signatur, wie beispielsweise die Verteilung von unterschiedlichen Oberflächencharakteristiken (Form und Textur) (siehe Kap. 2.1.2),
- die winkelabhängige Signatur, wie beispielsweise die Betrachtung von Objekten aus unterschiedlichen Richtungen oder die Änderung des Einfallswinkels der Sonnenstrahlung (siehe Kap. 2.1.1),
- die zeitliche Signatur, wie beispielsweise bei der Betrachtung von Objekten zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten (siehe Kap. 2.1.3),
- die polarisierte Signatur, wie beispielsweise bei der Betrachtung von Größen und Volumenänderung (siehe Kap. 2.1.4).

2.1.1 Elektromagnetische Strahlung als Grundlage der Fernerkundung

Bei digitalen Luftbildaufnahmen werden die Informationen über das gemessene Objekt durch elektromagnetische Strahlung übertragen, d.h. durch die reflektierte elektromagnetische Globalstrahlung der Sonne. Die Globalstrahlung wird von der Oberfläche der Erde sowie von

den auf ihr befindlichen Objekten absorbiert, reflektiert und transmittiert (Hildebrandt 1996: 19). Die absorbierte, reflektierte und transmittierte Strahlung ergibt zusammengenommen die Gesamteinstrahlung für eine Oberfläche und kann nach Koch (1987: 5) wie folgt ausgedrückt werden:

$$\text{Gesamteinstrahlung} = \text{reflektierte Energie} + \text{absorbierte Energie} + \text{transmittierte Energie}$$

Das Abbildungsergebnis in digitalen Luftbildern wird einerseits durch die Eigenschaften des Aufnahmesensors und andererseits durch die gemessene reflektierte Strahlung bestimmt. Die in digitalen Luftbildern gemessene reflektierte Strahlung hängt dabei neben der Intensität der auf das Gelände bzw. die Objekte treffenden Sonnenstrahlung, vor allem von den Reflexionseigenschaften der Gelände- und Objektoberfläche ab. Die Reflektanz und Zusammensetzung der reflektierten Strahlung von allen Oberflächen wird in der Fernerkundung mit Hilfe des Reflektionsgrades in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ gemessen (Jensen 2014: 40).

Mit digitalen Luftbildern kann nur ein Teil des elektromagnetischen Spektrums gemessen werden (siehe Abb. 2.1), da die Durchlässigkeit der Atmosphäre für die elektromagnetische Strahlung eingeschränkt ist. Bedingt durch die atmosphärische Absorption wird ein signifikanter Teil der Strahlungsenergie des Wellenlängenspektrums an atmosphärische Bestandteile, wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Spurengase, abgegeben. Da diese bestimmte Wellenlängenbereiche absorbieren, haben diese Bestandteile einen großen Einfluss auf fernerkundliche Analysen (Brunn 2006: 23f). Die optischen Fernerkundungssensoren werden dementsprechend nur in den Wellenlängenintervallen mit einer hohen atmosphärischen Durchlässigkeit (atmosphärische Fenster) eingesetzt (Heinzel 2008: 13). Dabei handelt es sich überwiegend um den sichtbaren Teil des Lichtes (RGB), welcher von 400 nm bis 700 nm geht sowie um den Bereich des Nahen Infrarots (NIR), welcher von 700 nm bis 1000 nm geht. Die in Luftbildern gemessenen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums werden überwiegend nicht scharf abgegrenzt, sondern gehen ineinander über und überlappen sich teilweise. Die aufgenommenen Spektralbereiche werden bei Luftbildaufnahmen in eigenen Kanälen bzw. Bändern aufgenommen und abgespeichert. Die Bereiche der Wellenlänge der einzelnen Kanäle variieren dabei zwischen den Aufnahmesensoren leicht (siehe Tab. 2.1) (Albertz 2009: 9ff).

Tab. 2.1: Wellenlängenbereiche der UltraCamX Kamera (USGS 2010), der DMC II Kamera (Neumann 2011) sowie der DLR MACS Hale Kamera (Truesense Imaging Inc. 2012) (Tabelle verändert nach Gänsrich 2015: 42)

Sensor	UCX	DMC II	MACS Hale
Blau	410 - 540	380 - 520	400 - 550
Grün	480 - 630	480 - 610	420 - 650
Rot	580 - 700	580 - 710	560 - 690
NIR	690 - 1000	680 - 940	695 - 1000

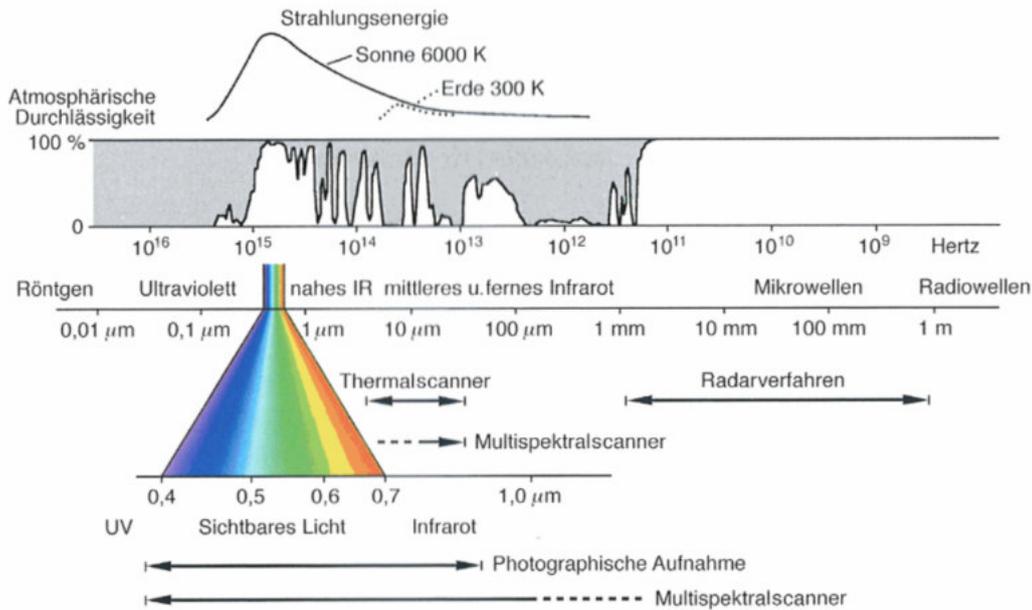


Abb. 2.1: Elektromagnetisches Spektrum (Albertz 2009: 11)

2.1.2 Reflexion, Absorption und Transmission der elektromagnetischen Strahlung an Oberflächen

Wie Abbildung 2.2 sehr gut verdeutlicht, spielen neben der Durchlässigkeit der Atmosphäre für bestimmte Wellenlängenbereiche auch die unterschiedlichen Reflexions- und Absorptions- sowie Transmissionseigenschaften der Erdoberfläche und der sich auf ihr befindlichen Objekte eine entscheidende Rolle für die Auswertung von Fernerkundungsdaten (Lillesand et al. 2015: 12). Die Anteile der reflektierten, absorbierten und transmittierten Energie variiert mit der Wellenlänge und der Oberfläche (Tempfli et al. 2009: 78). Die Gelände- oder Objektoberfläche beeinflusst mit ihrer chemischen Zusammensetzung (Materialeigenschaften) und ihrem physikalischen Zustand (z.B. Oberflächenrauigkeit und Feuchtigkeit) sowie den geometrischen Standortverhältnissen (z.B. Zenit- und Azimutwinkel der Sonne) die reflektierte Energie entscheidend (Brunn 2006: 30). Die Variation der unterschiedlichen Einflüsse ermöglicht eine Auswertung der Fernerkundungsdaten (Albertz 2009: 17).

Entsprechend dieser Annahme kann nach Lillesand et al. (2015: 13) für jede Oberfläche eine charakteristisch spektrale Reflexion (p_λ) abgeleitet werden. Diese spektrale Reflexion lässt sich mathematisch ableiten als:

$$p_\lambda = \frac{(\text{vom Objekt reflektierte Energie der Wellenlänge})}{(\text{auf das Objekt treffende Energie der Wellenlänge})} * 100$$

Diese Funktion kann für den gesamten Wellenlängenbereich als spektrale Reflexionskurve graphisch dargestellt werden und beschreibt für jede Oberfläche den Verlauf des Anteils der reflektierten einfallenden elektromagnetischen Strahlung je Wellenlänge (Heinzel 2008: 13). Die spektralen Reflexionskurven enthalten keine Informationen über den Anteil der absorbierten und weitergeleiteten Energie. Da digitale Luftbildkamerasysteme jedoch nur die reflektierte

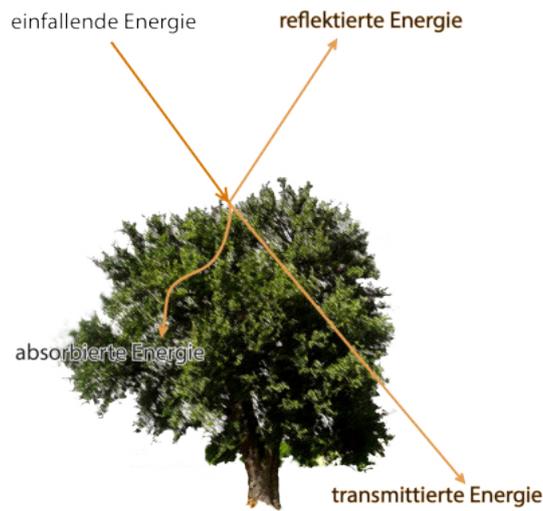


Abb. 2.2: Einfluss der Oberfläche auf die elektromagnetische Strahlung

elektromagnetische Strahlung messen, bilden die charakteristischen Reflexionskurven vieler Oberflächen (siehe Abb. 2.3) eine informative Grundlage für fernerkundliche Analysen (Jensen 2014: 57).

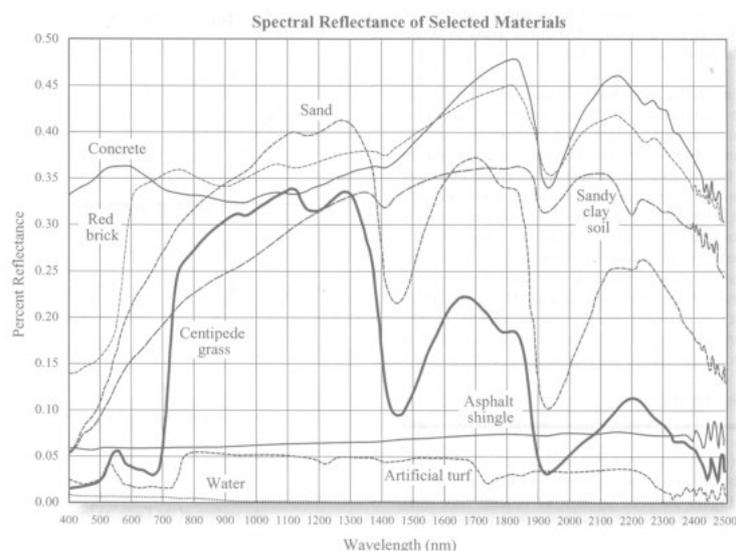


Abb. 2.3: Spektrale Reflexionskurven unterschiedlicher Oberflächen (Jensen 2014: 57)

Neben der Oberflächenstruktur von Objekten beeinflussen auch die Beleuchtungsverhältnisse den Anteil der spektralen Reflexion maßgeblich. Nach Heinzel (2008: 21) sind die Beleuchtungsverhältnisse in einem Luftbild abhängig von der Tageszeit (Erdrotation), der Jahreszeit (Erddrevolution) und dem Breitengrad und damit vom Ort und Zeitpunkt der Aufnahme. Durch diese Einflüsse müssen die Pixelwerte eines digitalen Luftbildes nicht die Intensität der tatsächlich reflektierten Energie eines Objektes wiedergeben (Holopainen & Wang 1998a: 677). Daher müssen bei einer fernerkundlichen Analyse auch die Richtung der einfallenden Sonnenstrahlen sowie die Beobachtungsrichtung berücksichtigt werden (Albertz 2009: 22). Die Richtung der einfallenden und reflektierten Strahlung (Beobachtungsrichtung) wird durch den Zenitwinkel

und den Azimutwinkel bestimmt. Vereinfacht lässt sich die Beobachtungsrichtung auch als Mitlicht-, Gegenlicht- und Querlichtbereich (siehe Abb. 2.4b) beschreiben, welche besonders bei der Betrachtung von erhöhten Objekten, wie beispielsweise Bäumen, eine entscheidende Rolle bei der Auswertung spielt (Koch 1987: 11). In Abhängigkeit zur Position des Sensors (Aufnahmewinkel) wird bei erhöhten Objekten die Sonnen- oder Schattenseite der Objekte gemessen (siehe Abb. 2.4a). Dabei wird die Sonnenseite eines Baumes in einem Luftbild wesentlich heller wiedergegeben als die Schattenseite. Dementsprechend ist auch der Anteil der gemessenen reflektierten Energie bei sonnenbeschienenen Objekten höher als bei Objekten, bei denen die Schattenseite gemessen wird (Holopainen & Wang 1998b: 500, Hildebrandt 1996: 41). Dieser Effekt kann durch die Ausrichtung und Neigung der Geländeoberfläche zusätzlich beeinflusst werden (Gemmell 1998: 157).

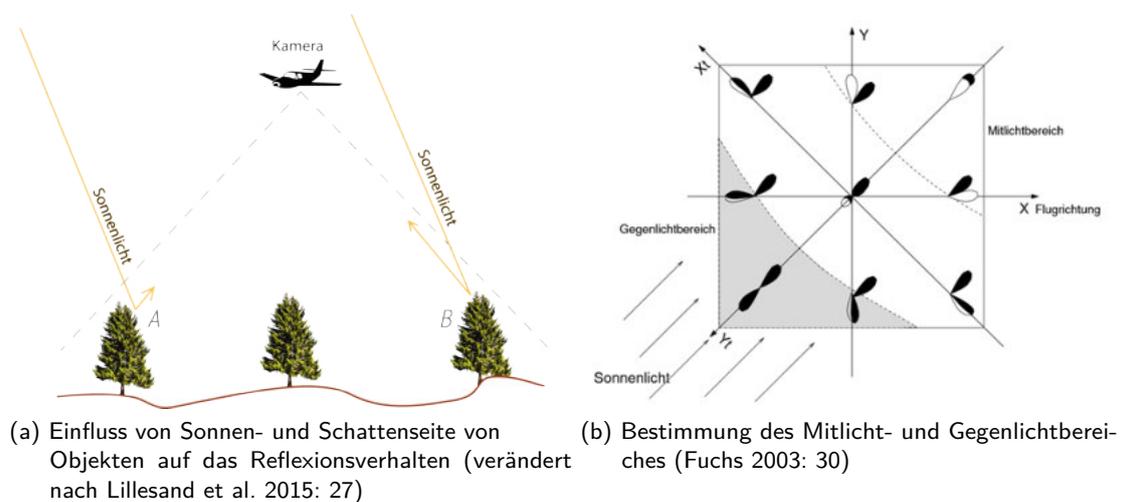


Abb. 2.4

Neben dem Sonnenstand und dem Aufnahmewinkel wird die von Objekten reflektierte Energie darüber hinaus durch die Oberflächenrauigkeit der Objekte selbst bestimmt. Dabei kann zwischen der gerichteten und gestreuten Reflexion unterschieden werden (Koch 1987: 4). Die gerichtete oder auch spiegelnde Reflexion wird durch das Reflexionsgesetz charakterisiert, wonach der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist und keine Streuung der Strahlung stattfindet. Dies ist vor allem bei Oberflächen mit einer im Vergleich zur Wellenlänge kleinen Rauigkeit der Fall. Die gestreute oder auch diffuse Reflexion erfolgt dagegen an Objekten, deren Oberflächenrauigkeit im Bereich der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung liegt. Die auf das Objekt fallende Strahlung wird in diesem Fall in alle Richtungen gleich stark reflektiert. Bei Bäumen erfolgt eine Mischung aus spiegelnder und diffuser Reflexion (siehe Abb. 2.5). Das bedeutet, dass die einfallende Strahlung zwar in alle Richtungen reflektiert wird, jedoch in unterschiedlicher Intensität (Jensen 2014: 55). Durch die diffuse Reflexion wird die Gesamteinstrahlung in ihrer Intensität geschwächt, jedoch findet keine Änderung des Wellenlängenbereiches oder Energieumwandlung statt (Koch 1987: 6).

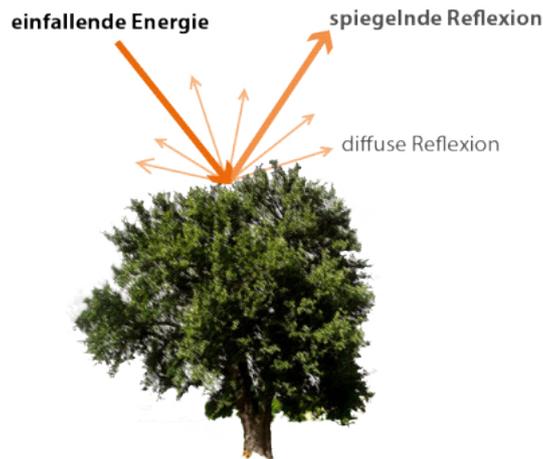


Abb. 2.5: Mischung aus spiegelnder und diffuser Reflexion an Baumoberflächen (verändert nach Jensen 2014: 55)

2.1.3 Reflexions-, Absorptions- und Transmissions-eigenschaften von Blattorganen

Die auf ein Blatt treffende elektromagnetische Sonnenstrahlung wird an diesem entweder reflektiert, von diesem absorbiert oder durch dieses transmittiert (Bach 1995: 117). Nach Fuchs (2003: 24) und Gates et al. (1965: 11ff) bestimmen die chemischen, physikalischen und anatomischen Eigenschaften der Blätter das Reflexions-, Absorptions-, und Transmissionsverhalten von Blattoberflächen. Bedingt durch die überwiegende Nadir-Perspektive von Luftbildaufnahmen sowie die anatomische Gesetzmäßigkeit, dass Blätter den größten Oberflächenanteil von Bäumen haben, ist das Reflexions-, Absorptions-, und Transmissionsverhalten der Blätter daher von zentraler Bedeutung für fernerkundliche Analysen. Die trockenen Bestandteile des Baumes, wie der Stamm oder die Äste und Zweige, spielen bei spektralen Untersuchungen eine untergeordnete Rolle.

Der Anteil der reflektierten Energie je Wellenlänge von Vegetationsoberflächen wird dabei entscheidend von den Blatteigenschaften beeinflusst (Anhuf 1997: 74). Neben der Beschaffenheit der Blattoberfläche, der Blattdicke und der Blattpigmentierung bestimmen auch die Zellstruktur sowie der Anteil an Wasser in den Blättern den Anteil der reflektierten Strahlung maßgeblich (siehe Abb. 2.6) (Tempfli et al. 2009: 81, Koch 1987: 17). Da sich im Laufe einer Vegetationsperiode vor allem die Blattpigmentierung sowie die Zellstruktur wesentlich verändern, verändert sich auch das Reflexionsverhalten der Blätter im Laufe einer Vegetationsperiode sehr stark, was sich in unterschiedlichen spektralen Reflexionskurven für ein Baumindividuum widerspiegelt (siehe Abb. 2.7 a & b) (Albertz 2009: 20).

Ein charakteristisches Phänomen bei der Ableitung von unterschiedlichen Vegetationstypen und Baumarten ist das ähnliche Reflexionsverhalten von Vegetation im sichtbaren Bereich des Lichtes (RGB). Im sichtbaren Wellenlängenbereich von ca. 400 bis 700 nm überlappen sich die Reflexionskurven der verschiedenen Vegetationstypen oder liegen sehr nah

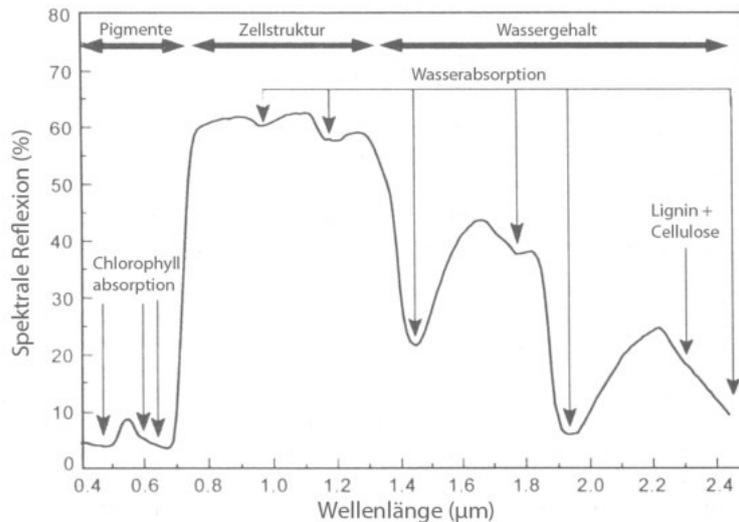
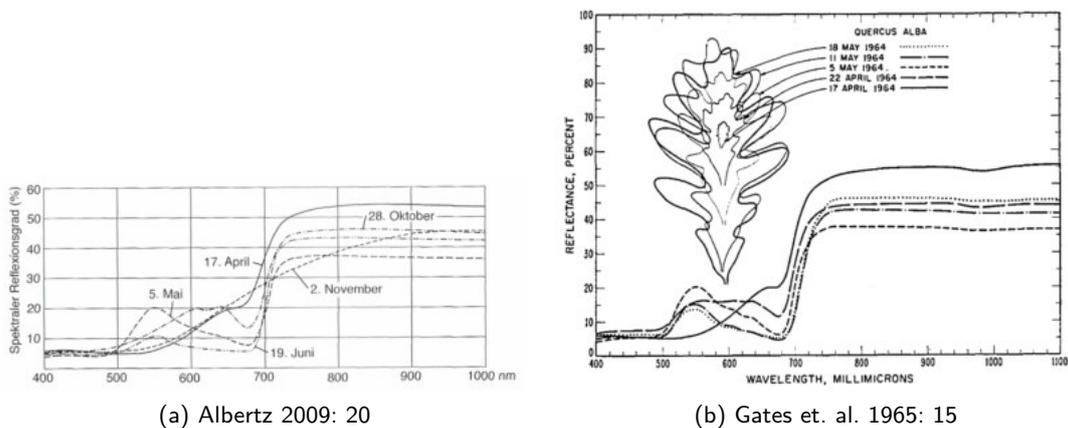


Abb. 2.6: Reflexionsverhalten von grüner und trockener Vegetation (verändert nach Bach 1995: 118)



(a) Albertz 2009: 20

(b) Gates et. al. 1965: 15

Abb. 2.7: Abhängigkeit des spektralen Reflexionsgrades vom Aufnahmezeitpunkt am Beispiel von Eichenblättern

beieinander (Lillesand et al. 2015: 14), weshalb eine spektrale Unterscheidung im sichtbaren Wellenlängenbereich nur eingeschränkt möglich ist.

Der Anteil der reflektierten Energie liegt im sichtbaren Bereich bis 700 nm weitestgehend im niedrigen Prozentbereich mit einem charakteristischen Ausschlag im grünen Wellenlängenbereich bei 550 nm (Jensen 2014: 57). Vor allem im blauen (450 nm) und roten (670 nm) Wellenlängenbereich wird mit 70 bis 90 Prozent ein Großteil der auf das Blatt treffenden Energie vom in den Blättern enthaltenen Chlorophyll absorbiert (siehe Abb. 2.10) und für die Photosynthese verwendet, weshalb diese Wellenlängenbereiche auch als Chlorophyllabsorptionsbanden bezeichnet werden (Lillesand et al. 2015: 16). Die auf das Blatt treffende Strahlung durchdringt dabei die obere Epidermis fast ohne Reflexion und trifft im Inneren des Blattes auf das Mesophyll, welches im Palisadenparenchym den Großteil der Chloroplasten sowie im Schwammparenchym große luftgefüllte Zellen enthält (Brunn 2006: 32).

Aufgrund der hohen Absorption des blauen und roten Wellenlängenbereiches sowie der im Vergleich relativ hohen Reflexion im grünen Wellenlängenbereich nimmt das menschliche Auge gesunde Blätter als grün wahr (Koch 1987: 18, Brunn 2006: 33). Durch Stresseinwirkungen auf die Pflanze oder den Blattfall im Herbst nimmt der Chlorophyllgehalt in den Blättern ab. Dadurch verschiebt sich das Reflexionsmaximum des sichtbaren Wellenlängenbereiches in Richtung des roten Spektralbereiches aufgrund der geringeren Absorption und höheren Reflexion (vgl. Buschmann & Nagel 1992, Koch 1987: 104).

Im Wellenlängenbereich von 680 bis 750 nm (red edge) ist für eine gesunde Vegetation ein starker Anstieg des Anteils der reflektierten Energie zu verzeichnen. Bei einem abnehmenden Chlorophyllgehalt, zum Beispiel durch Pflanzenstress, verschiebt sich dieser Anstieg in den Bereich des roten Wellenlängenbereiches (blue shift) (Reid 1987: 429). Diese Verschiebung aufgrund des abnehmenden Chlorophyllgehaltes ist ein für alle Pflanzen allgemeingültiger Prozess, an welchem unter anderem Stresseinwirkungen abgelesen werden können (Rock et al. 1988: 113; Westman & Price 1988: 14ff). Der Prozess der Verschiebung der Reflexionskurven lässt sich auch für Bäume nachweisen (siehe Abb. 2.8) (Essery & Morse 1992: 3048).

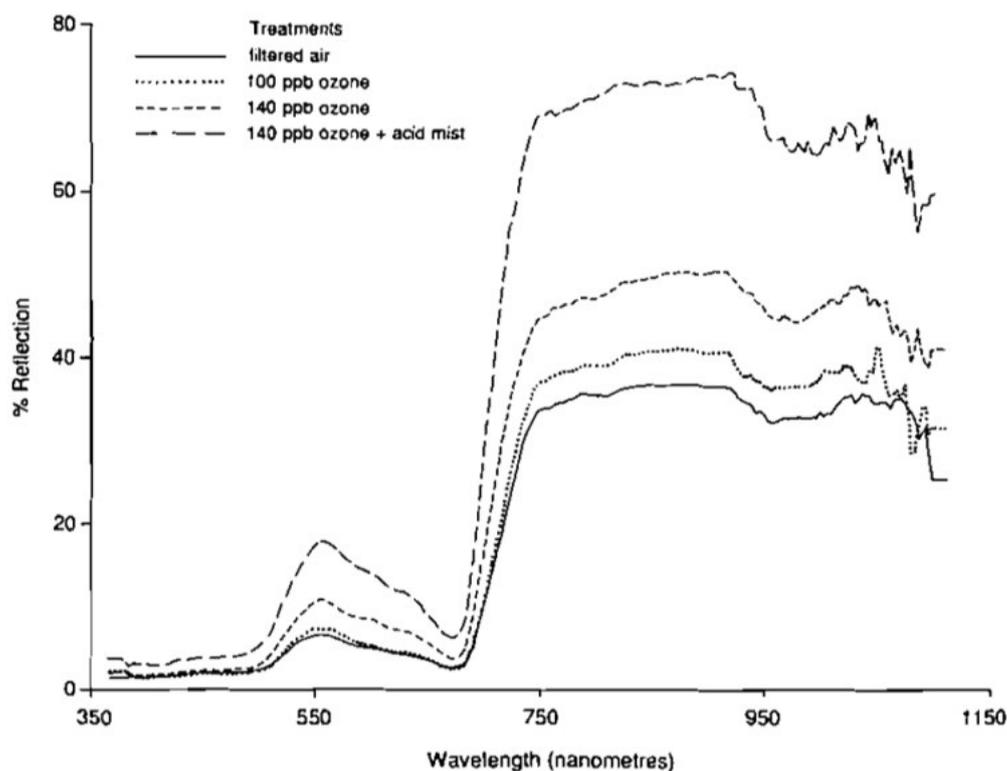


Abb. 2.8: Verschiebung der spektralen Reflexionskurve von Fichten unter Stresseinwirkung (Essery & Morse 1992: 3048)

Charakteristisch für das spektrale Verhalten von Vegetationsoberflächen ist der Bereich des nahen Infrarots (NIR). Dabei ist der Anteil der reflektierten Energie im nahen Infrarot entscheidend von der Zellstruktur und Blattentwicklung abhängig (Lillesand et al. 2015: 16). Die Reflexion des nahen Infrarots an Blättern wird durch die Organellen und die Zellwände

ausgelöst (siehe Abb. 2.9). Diese haben eine glatte Oberfläche und ihre Dicke entspricht ungefähr der Wellenlänge des nahen Infrarots (1000 nm), weshalb zwischen 700 nm und 1300 nm mit 40 bis 50 Prozent der höchste Anteil der elektromagnetischen Strahlung reflektiert wird (Brunn 2006: 33). Da die innere Blattstruktur von Art zu Art sehr verschieden ist, ist mit Hilfe des Wellenlängenbereiches zwischen 700 nm und 1300 nm die Unterscheidung verschiedener Arten möglich (Immitzer et al. 2012: 2667ff, Koch et al. 2002: 133ff). Von besonderer Bedeutung bei der Klassifikation von Vegetationstypen sind dabei der jeweilige Anstieg der Reflexion sowie der typische Reflexionsverlauf der Art je Wellenlänge (Tempfli et al. 2009: 81).

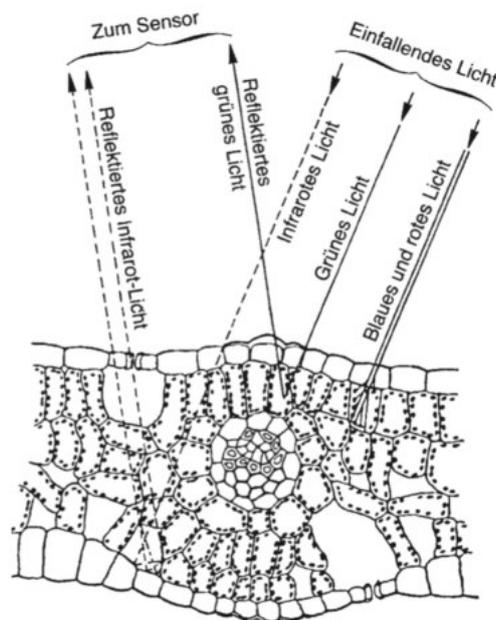


Abb. 2.9: Schematische Darstellung des Reflexions- und Absorptionsverhaltens von grünen Blättern (Albertz 2009: 19)

Im kurzwelligen Infrarot (SWIR) wird der Anteil der reflektierten Energie vor allem durch den Anteil an Wasser im Blattgewebe bestimmt. Je höher der Anteil an Wasser im Blattgewebe ist, desto geringer ist die Reflexion an Energie. Die Wellenlängenbereiche bei 1450 nm, 1950 nm und 2700 nm werden daher auch als Wasserabsorptionsbanden bezeichnet und eignen sich gut für die Bestimmung der Vitalität von Pflanzen (Tempfli et al. 2009: 81).

Neben der inneren Blattstruktur haben auch die Konsistenz und Gestalt der Blattoberflächen einen Einfluss auf das Reflexionsverhalten (Gates et al. 1965: 19). So steigt mit zunehmender Wachsaufgabe die Reflexion im sichtbaren Bereich und nahen Infrarot. Mit zunehmender Behaarung auf der Blattoberfläche nimmt die Reflexion im nahen Infrarot dagegen ab (Koch 1987: 20).

2.1.4 Reflexions-, Absorptions- und Transmissionseigenschaften von Pflanzenbeständen

Bedingt durch die Größe der Blätter sowie das räumliche Auflösungsvermögen des Sensors (siehe Kap. 2.2.5) kommt es bei der Betrachtung von Pflanzenbeständen zur Reflexion verschiedener und unterschiedlich beleuchteter Pflanzen und anderer Oberflächen. Dadurch wird bei fernerkundlichen Analysen immer ein Mischwert über die gemessene Fläche betrachtet. Daher müssen nach Hildebrandt (1996: 39) bei der Analyse von Pflanzenbeständen zusätzlich zum Reflexionsverhalten der einzelnen Blätter auch morphologische, phänologische und pflanzensoziologische Faktoren mit einbezogen werden. Zu diesen gehören (Hildebrandt 1996: 39):

- „die Stellung und Größe der Blattorgane,
- der Aufbau des Sprosses, bei Bäumen der Krone,
- die Dichte der Belaubung und damit das Verhältnis zwischen Reflexionsanteilen beleuchteter wie beschatteter Blätter/Nadeln, anderer Pflanzenteile und durchscheinenden Bodens und Unterwuchses,
- die phänologische Situation mit ihrem Einfluß auf die Reflexion durch den jeweiligen Belaubungszustand, aber auch durch das Blühen und Fruchttrogen,

und bei Pflanzenbeständen strukturelle Elemente der Gruppe wie

- die Zusammensetzung nach Art und die Form der Vergesellschaftung,
- die Dichte der Bestockung und damit auch der eventuellen Anteile der Reflexion vom Boden, von Bodenvegetation oder unterständigen Pflanzen,
- bei Wäldern und anderen Dauerkulturen das Alter bzw. die Alterszusammensetzung des Bestandes,
- die vertikale Gliederung, d.h. die Rauigkeit der Oberfläche z.B. von Waldbeständen, Buschvegetationen, Plantagen usw.“

2.1.5 Einfluss der Phänologie auf die Analyse von Baumbeständen und Einzelbäumen

Bedingt durch phänologische Ereignisse verändern alle Bäume ihre spektrale Reflexion. In Mitteleuropa betrifft dies in extremer Form die Laubbäume, welche am Ende der Vegetationsperiode ihre Blätter verfärben und anschließend abwerfen. Dies hat einen großen Einfluss auf die Reflexion, da während der Vegetationsperiode die Belaubung und außerhalb der Vegetationsperiode das Holz von Stamm und Ästen die spektrale Reflexion bestimmen. Das Holz von Bäumen reflektiert im Vergleich zu den Blattorganen etwas stärker im roten Bereich sowie deutlich schwächer im nahen Infrarot. Zudem hat auch der Boden außerhalb der Vegetationsperiode einen größeren Einfluss auf die spektrale Signatur in Luftbildern. Die phänologisch bedingte Veränderung der spektralen Reflexion der Blattorgane wurde bereits im

Kapitel 2.1.3 ausführlich erörtert. Darüber hinaus führt bei vielen Baumarten auch die Blüte- und Fruchtzeit zu einer kurzzeitigen Veränderung der Reflexion. Die meisten Nadelbäume sind dagegen das gesamte Jahr über durch eine relativ gleichbleibende spektrale Reflexion charakterisiert (Hildebrandt 1996: 46ff).

Abweichend von der jahreszeitlichen Veränderung der Reflexion führen auch sekundäre Einflüsse zu einer Veränderung der Reflexion. Dazu gehören beispielsweise Baumschäden und Pflanzenkrankheiten sowie Schneeauflagen, Feuer und Stürme. Kommt es zu einem Absterben der Blattorgane, rückt die spektrale Signatur der bodennahen Vegetation sowie die Reflexion des Bodens in den Vordergrund. Jedoch führen auch Krankheiten, welche nicht flächendeckend auftreten und nicht zu einem kompletten Absterben der Blattorgane führen, zu einer Veränderung des Reflexionsverhaltens von Bäumen. Dabei ist die spektrale Reflexion von den Veränderungen der Blattorgane abhängig. Bei Pflanzenkrankheiten ist dabei allgemein erkennbar, dass es bedingt durch die Abnahme von Chlorophyll im sichtbaren Wellenlängenbereich zu einer Erhöhung der Reflexion kommt, während im nahen Infrarot durch die Abnahme der stark reflektierenden Blattanteile die Reflexion insgesamt abnimmt. Im mittleren Infrarot zeigen sich eine Veränderung der Reflexion, wenn die Schädigung des Baumes mit einer Austrocknung der Blattorgane verbunden ist. Die spektrale Reflexion liegt bei Austrocknungseffekten über der von gesunden Beständen (Koch 1987: 104ff).

2.1.6 Einfluss des Alters sowie der Artenzusammensetzung auf die Analyse von Baumbeständen und Einzelbäumen

Wie in Kapitel 2.1.3 bereits angesprochen, hat auch das Baumalter einen Einfluss auf das Reflexionsverhalten. Nach Hildebrandt (1996: 48) zeigen Nadel- und Laubbaum-Bestände ein unterschiedliches Reflexionsverhalten. Ältere Nadelbaumbestände und Einzelbäume reflektieren in allen spektralen Wellenlängenbereichen schwächer als junge Nadelbäume. Laubbäume zeigen dementsprechend im sichtbaren Wellenlängenbereich sowie im mittleren Infrarot nur sehr geringfügige spektrale Unterschiede. Lediglich im nahen Infrarot reflektieren auch die jüngeren Bestände und Einzelbäume stärker als Althölzer.

Ausgehend von der unterschiedlichen spektralen Reflexion einzelner Arten ist in Luftbildern in Mischbeständen mit unterschiedlichen Baumarten ein Farb- bzw. Grautonmuster erkennbar und auswertbar. Dies erlaubt in Abhängigkeit vom räumlichen Auflösungsvermögen des Sensors eine Analyse des Vorkommens von Baumarten sowie der Verteilung der Baumarten innerhalb des Bestandes. Dabei ist jedoch der in Kapitel 2.1.5 beschriebene phänologische Einfluss sowie die Alterszusammensetzung zu beachten (Hildebrandt 1996: 49).

2.1.7 Bedeutung der spektralen Reflexion für die Ableitung von Einzelbäumen

Ein Großteil der in der Literatur beschriebenen Reflexionseigenschaften von Blattorganen und Bäumen wurde jedoch unter Laborbedingungen mit einem Spektrometer im Nahbereich gemessen (Fuchs 2003: 25). Bei aus Luftbildern gemessenen Spektralwerten bestehen jedoch völlig unterschiedliche Aufnahmebedingungen von Luftbild zu Luftbild. Dies kann sensorseitig sowie räumlich oder zeitlich begründet sein. Für die Messung von Spektralwerten von Vegetationsoberflächen bedeutet dies, dass die Spektralwerte von gleichen Arten oder identischen Individuen, die zu unterschiedlichen Zeiten und von verschiedenen Standorten aufgenommen wurden, nur bedingt identisch und vergleichbar sind (Lillesand et al. 2015: 13).

Für die Extraktion und Klassifizierung von Einzelbäumen ist dieses Phänomen der abweichenden Reflexionskurven von großer Bedeutung. So lassen sich von jeder Baumart abhängig vom Alter des Baumes, dem Standort und den Bodenbedingungen, den klimatischen Bedingungen, der Wasserversorgung sowie dem Aufnahmezeitpunkt voneinander abweichende Spektralwerte bzw. Reflexionskurven messen (siehe Abb. 2.10). Darüber hinaus ist eine Vielzahl von Baumarten durch ein sehr ähnliches Reflexionsverhalten charakterisiert. Daher kann mit Hilfe von Luftbildaufnahmen im sichtbaren Bereich sowie im nahen Infrarot keine genaue Unterscheidung der Arten auf Basis von spektralen Signaturen vorgenommen werden (Hildebrandt 1996: 44). Aus diesem Grund eignen sich die mit Hilfe von Luftbildern gemessenen Spektralwerte nicht für die Unterscheidung von Einzelindividuen. Lediglich die der erhöhten Form geschuldeten Helligkeitsunterschiede können für die Bestimmung der Baumspitze sowie der Baumränder genutzt werden (siehe Kap. 2.4).

Ungeachtet der standort- und aufnahmezeitbedingten Abweichungen lassen sich für bestimmte Baumarten charakteristische Reflexionseigenschaften ableiten, die eine Unterscheidung von Baumkategorien mit Hilfe von digitalen Luftbildern in einem Gebiet sowie zu einer bestimmten Zeit ermöglichen. So können beispielsweise mit digitalen Luftbildern Nadel- und Laubbäume mit einer hohen Genauigkeit unterschieden werden. Diese Unterscheidungsmöglichkeit ist für die Einzelbaumextraktion von Bedeutung, da sich die geometrischen Eigenschaften von Laub- und Nadelbäumen stark voneinander unterscheiden. Eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Eigenschaften in getrennten Baummodellen und Extraktionsstrategien (siehe Kap. 2.3.2.1) erhöht die Genauigkeit des Extraktionsergebnisses.

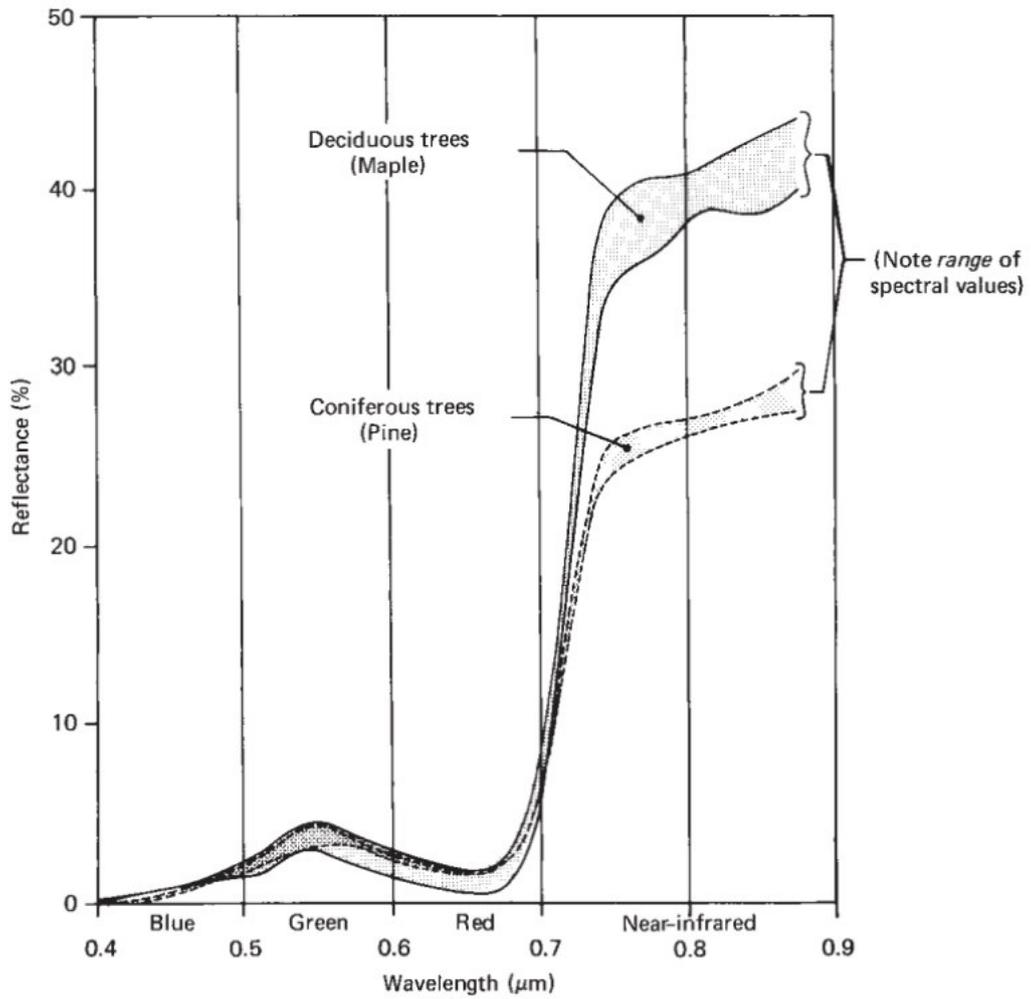


Abb. 2.10: Spektrale Varianzen identischer Objekte am Beispiel von Laub- und Nadelbäumen (Lillesand et al. 2015: 14)

2.2 Grundlagen der digitalen Luftbildaufnahme

2.2.1 Aufnahmesysteme der Fernerkundung

Nach Albertz (2009: 9) ist jedes aufgenommene Fernerkundungsbild das Resultat eines Abbildungsprozesses eines Ausschnittes der Realität, welches Informationen über die Intensität und Zusammensetzung sowie die Richtung der gemessenen Strahlung enthält. Bei Fernerkundungsaufnahmen besteht kein direkter Kontakt zwischen dem Sensor und dem aufgenommenen Objekt (Hildebrandt 1996: 2). Dabei kann hinsichtlich der Quelle der gemessenen Strahlung zwischen aktiven und passiven Fernerkundungssystemen unterschieden werden (siehe Abb. 2.11). Beiden Systemen ist dabei gleich, dass sie in der Lage sein müssen, sowohl die Richtung als auch die Intensität der gemessenen Strahlung sehr genau zu bestimmen. Aktive Systeme, wie beispielsweise Radar- oder LIDAR-Systeme, senden eine eigene, künstlich erzeugte Strahlung aus und messen die von der Erdoberfläche reflektierten Anteile der ausgesendeten Strahlung. Passive Systeme, wie beispielsweise optische Fernerkundungssensoren, messen die natürlich vorhandene elektromagnetische Strahlung. Dabei handelt es sich überwiegend um die elektromagnetische Strahlung der Sonne, welche an der Erdoberfläche reflektiert wird. Passive Fernerkundungssysteme können aber auch die von einem Objekt ausgesandte Eigenstrahlung (z.B. Thermalstrahlung) messen, da alle Objekte mit einer Temperatur größer Null Kelvin elektromagnetische Strahlung emittieren (Tempfli et al. 2009: 62).

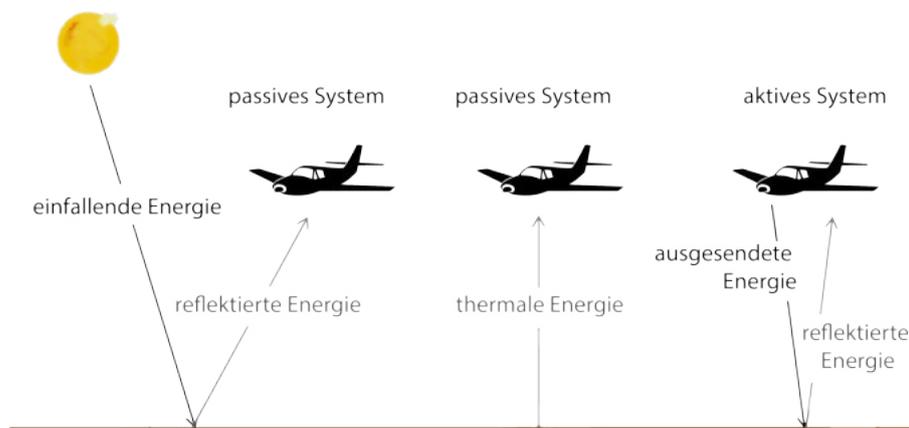


Abb. 2.11: Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Fernerkundungssystemen (verändert nach Tempfli et al. 2009)

Im Hinblick auf die Extraktion von Bäumen mit Hilfe von digitalen Luftbildern ist zu beachten, dass die elektromagnetische Sonnenstrahlung nur an den obersten Blattoorganen der Bäume reflektiert wird (siehe Kap. 2.1.3). Dies hat zur Folge, dass Luftbilder keine Informationen über den Unterbau, die Bodenvegetation oder den Boden selbst enthalten. Daher muss von der Baumkrone ausgehend auf den Standort sowie weitere Baummerkmale geschlussfolgert werden. Lediglich bei Einzelbäumen in Schrägaufnahmen können auch Informationen über den genauen Standort sowie alle Objekte unterhalb der Baumkrone direkt abgeleitet werden.

2.2.2 Aufnahme von digitalen Luftbildern

Unter dem Begriff Luftbild wird im Rahmen der Arbeit das Produkt bzw. Ergebnis (digitales Rasterbild) einer Luftbildaufnahme verstanden. Die Luftbildaufnahme ist dabei als Vorgang der Erstellung von Luftbildern definiert. Dementsprechend ist ein digitales Luftbild eine mit Hilfe eines bemannten oder unbemannten Flugkörpers innerhalb der Erdatmosphäre aufgenommene Fotografie.

Die Beschränkung der Arbeit auf die Verwendung digitaler Luftbilder ist auf die weite Verbreitung des Einsatzes digitaler Luftbildaufnahmen sowie auf ihre Vorteile zurückzuführen. Digitale Luftbildaufnahmen gehören mittlerweile zum Standard der photogrammetrischen Datenaufnahme aus Flugzeugen und haben die analoge Aufnahme fast vollständig verdrängt. Nach Heipke (2003: 56) haben digitale Luftbilder eine Reihe von Vorteilen gegenüber analogen Luftbildern. Dazu gehören:

- die quantitative Datenerfassung und damit die Möglichkeit der quantitativen Auswertung der aufgenommenen reflektierten Energie,
- die Aufnahme eines wesentlich größeren Spektrums des Lichtes,
- eine deutlich höhere spektrale, geometrische sowie radiometrische Auflösung,
- die Möglichkeit der simultanen Datenerfassung,
- die verlustfreie Speicherung und Übertragung der Daten, da diese schon digital vorliegen
- sowie die Möglichkeit der Echtzeiterfassung und -auswertung.

Die Nachteile digitaler Luftbilder liegen vor allem in den großen und schwer zu verarbeitenden Datenmengen sowie in den Problemen der sicheren Langzeitdatenspeicherung.

2.2.3 Einfluss der Aufnahmerichtung von digitalen Luftbildern und Positionsbestimmung

Bei der digitalen Luftbildaufnahme erfolgt die für die photogrammetrische Weiterverarbeitung notwendige Positionsbestimmung mit Hilfe von High-End GPS Receivern und Inertial Measuring Units (IMU). Mit Hilfe des GPS Receivers lässt sich mit einer hohen Lagegenauigkeit die Position der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme des Luftbildes bestimmen. Mit Hilfe der IMU lassen sich sehr genau der Rollwinkel (roll angle), der Anstiegswinkel (pitch angle) sowie der Kurswinkel (yaw angle) bestimmen (Tempfli et al. 2009: 123).

Hinsichtlich der Aufnahmerichtung lassen sich nach Hildebrandt (1996: 74) Luftbilder in vier Kategorien einteilen:

- Nadiraufnahmen,
- Senkrechtaufnahmen,
- Schräg- oder Obliqueaufnahmen, sowie
- Horizontaufnahmen (siehe Abb. 2.12).

Nadiraufnahmen sind eine Sonderform der Senkrechtaufnahmen. Sie sind definiert über einen Winkel von exakt 0° zwischen der vom Projektionszentrum ausgehenden senkrechten Achse und der Aufnahmeachse. Bei Senkrechtaufnahmen kann der Winkel bis zu 3° betragen. Beträgt der Winkel zwischen der vom Projektionszentrum ausgehenden senkrechten Achse und der Aufnahmeachse mehr als 3° spricht man von sogenannten Schräg- oder Obliqueaufnahmen. Beträgt der Winkel ungefähr 90° wird eine Horizontaufnahme durchgeführt (Jensen 2014: 65ff).

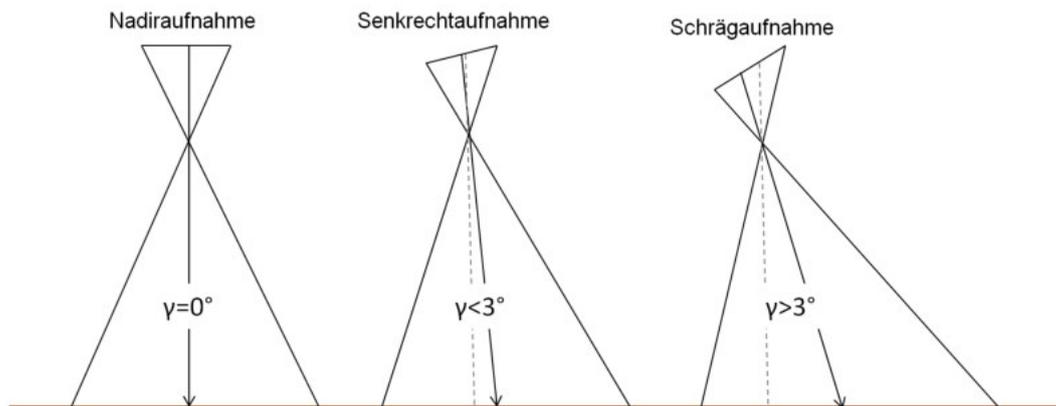


Abb. 2.12: Nadir-, Senkrecht- und Schrägaufnahmen von Luftbildern (verändert nach Hildebrandt 1996: 74)

Für die Forstfernerkundung sowie die Extraktion von Einzelbäumen werden überwiegend Nadir- und Senkrechtaufnahmen eingesetzt, da diese für photogrammetrische Messungen und Kartierungen sowie großflächige Aufnahmen und Auswertungen sehr gut geeignet sind. Dennoch gilt es bei Nadir- und Senkrechtaufnahmen hinsichtlich der Auswertung einige Sachverhalte zu beachten. Nadir- und Senkrechtaufnahmen sind nur bei absolut ebenem Relief kartengleich. Bei bewegtem Relief sind Luftbilder nur noch kartenähnlich. Durch die Projektion des Geländes auf eine gerade Bildebene in einem Luftbild kommt es zu entscheidenden Verzerrungen der Abbildungsfläche innerhalb des Luftbildes. Dazu gehört, dass Über- und Unterhöhungen in Luftbildern ungleichlang abgebildet werden. Auch wird das unebene Gelände in Bezug auf die Horizontalentfernung nicht maßstabgleich abgebildet, d.h. höher liegende Orte werden in einem größeren Maßstab abgebildet als tieferliegende Orte. Darüber hinaus kommt es bei erhöhten Objekten, wie beispielsweise Bäumen, zu radialen Punktversetzungen. Diese äußern sich in einer zum Rand des Luftbildes hin zunehmenden Verkippung der erhöhten Objekte sowie in der Zunahme der sichttoten Räume hinter den erhöhten Objekten (siehe Abb. 2.13). Dieser Effekt des Umkippens der erhöhten Objekte ist umso stärker, je kürzer die Brennweite der Kamera ist (Hildebrandt 1996: 152).

Bei der Extraktion und Attributierung von Einzelbäumen haben diese Effekte jedoch einen großen Einfluss auf das Extraktionsergebnis. Wie Abbildung 2.13 sehr gut verdeutlicht, spielt vor allem die radiale Punktversetzung mit einer einhergehenden Verkippung der Bäume sowie die Entstehung sichttoter Räume hinter den verkipperten Bäumen eine zentrale Rolle bei der Analyse von Nadir- und Senkrechtaufnahmen (Adler 2001: 3). In Gebieten mit

bewegtem Gelände, welche häufig durch den Bestand mit Bäumen charakterisiert sind, hat auch die nichtmaßstäbliche Abbildung einen Einfluss auf die Extraktionsergebnisse. Dies betrifft in hohem Maße steile Täler, in deren Bereichen es zu großen Unterschieden hinsichtlich der erreichten Bodenauflösung kommt und damit auch zu einer veränderten spektralen Mischreflexion kommen kann.



Abb. 2.13: Verkippung von Bäumen in Senkrechtaufnahmen am Beispiel von Waldbeständen (links) und Einzelbäumen (rechts)

2.2.4 Einfluss der Brennweite und des Öffnungswinkels bei digitalen Luftbildaufnahmen

Digitale Luftbildkameras haben alle eine unterschiedliche Brennweite des Objektivs sowie davon abhängig einen unterschiedlichen Blick- bzw. Öffnungswinkel. Allgemein gilt: je größer der Öffnungswinkel und je höher die Flughöhe, desto größer ist die Aufnahme­fläche der Kamera (siehe Abb. 2.14). Die Wahl des Öffnungswinkels wird dabei neben wirtschaftlichen Fragestellungen für die Befliegungskosten wesentlich von den Eigenschaften der zu analysierenden Objekte bestimmt. Ein großer Öffnungswinkel hat den Vorteil, dass mit einer Aufnahme größere Flächen aufgenommen werden können (Jensen 2014: 73). Beim Einsatz in geringen Flughöhen führt der große Öffnungswinkel jedoch aber auch vermehrt zu sichttoten Räumen hinter erhöhten Objekten (Tempfli 2009: 332f).

Der Öffnungswinkel einer Kamera lässt sich wie folgt berechnen (Lillesand et al. 2015: 121):

$$\theta_d = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\text{Bildformat}^2 + \text{Bildformat}^2}}{2(\text{Brennweite})} \right)$$

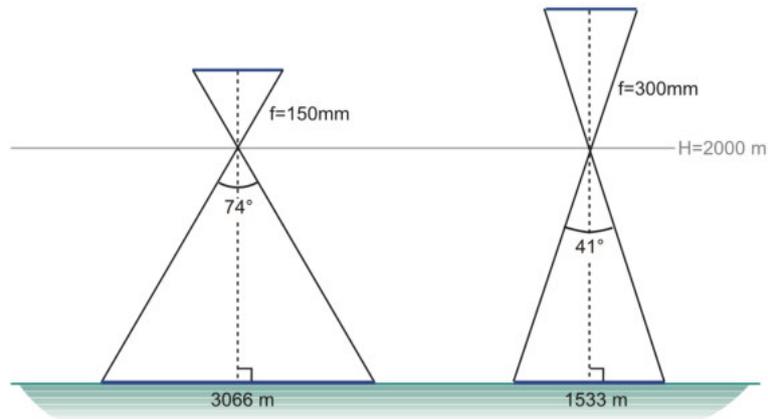


Abb. 2.14: Einfluss von Brennweite und Öffnungswinkel auf die Aufnahmefläche bei gleicher Flughöhe (Tempfli 2009: 333)

2.2.5 Einfluss der spektralen, geometrischen und radiometrischen Auflösung auf die Komplexität digitaler Luftbildaufnahmen

Für die Bildanalyse (siehe Kap. 2.3) sind die Aufnahme- und Speicherungsprozesse während der Bilderzeugung von entscheidender Bedeutung. Neben dem Informationsträger der elektromagnetischen Strahlung ist auch der Sensor von entscheidender Bedeutung. Dieser bestimmt die spektrale, geometrische und radiometrische Auflösung der Luftbilder, da er bestimmt, wie die Informationen der elektromagnetischen Strahlung abgebildet und gespeichert werden. Während des Abbildungs- und Speicherungsprozesses finden für die Objektextraktion entscheidende Umwandlungsprozesse statt, welche die ursprünglichen Objektinformationen grundlegend verändern. Dazu gehören beispielsweise die geometrische Umwandlung von 3D-Informationen zu 2D-Informationen sowie die Quantifizierung der elektromagnetischen Strahlung in natürliche Zahlen (Shufelt 1996: 14). Die in Luftbildern gespeicherten Intensitätswerte sind dabei proportional zu den Strahlungseigenschaften der Objekte. Allerdings sind die abgebildeten und gespeicherten Intensitätswerte von der gegebenen geometrischen, spektralen und radiometrischen Auflösung abhängig (Hinz 2004: 12f).

Die spektrale Auflösung bestimmt die Empfindlichkeit des Sensors für verschiedene Bereiche des Spektrums des Lichtes, d.h. die Wellenlängenbereiche (siehe Kap. 2.1.1) der reflektierten elektromagnetischen Strahlung, die mit dem jeweiligen Sensor gemessen werden können. Im Bereich der digitalen Luftbildaufnahme sind gegenwärtig drei Sensortypen Stand der Technik:

- Sensoren, die den Bereich des sichtbaren Lichtes (RGB) sowie den Bereich des nahen Infrarot (NIR) messen können,
- Hyperspektralsensoren, die den Wellenlängenbereich bis zum kurzwelligen Infrarot (SWIR) abdecken, sowie
- Thermalsensoren.

Für die Objektklassifikation spielt die spektrale Auflösung des eingesetzten Sensors eine entscheidende Rolle. Je mehr spektrale Kanäle für die Auswertung zur Verfügung stehen, desto größer sind die Informationen über die spektralen Eigenschaften der Objekte und dementsprechend größer sind die zu erwartenden Genauigkeiten bei der Klassifikation. Dabei ist auch die Breite der Kanäle von Bedeutung, da bei vielen schmalen Kanälen weniger Energie ankommt und gemessen werden kann. Dies verursacht eine geringere räumliche Auflösung und ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis.

Die radiometrische Auflösung eines digitalen Luftbildes gibt an, wie differenziert die aufgenommene elektromagnetische Strahlung abgespeichert werden kann (Hinze 2004: 15). Sie wird durch die Anzahl der Grauwertabstufungen bestimmt, die jeder einzelne Kanal erfassen kann. Die radiometrische Auflösung eines Luftbildes wird in bit angegeben und wie folgt berechnet:

$$x \text{ bit} = 2^x$$

Je höher die radiometrische Auflösung eines Luftbildes ist, desto detaillierter können die gemessenen reflektierten Strahlungswerte im Luftbild abgespeichert und für die Auswertung genutzt werden.

Die geometrische Auflösung digitaler Luftbilder gibt die erreichte Bodenauflösung (GSD) an, d.h. welcher Größe jeder Pixel des Rasterbildes am Boden entspricht. Sie wird durch die Brennweite, die Pixelgröße des Sensors und die Flughöhe bestimmt (siehe Abb. 2.15):

$$GSD = \frac{H' p_d}{f}$$

GSD = Bodenauflösung, H' = Flughöhe, p_d = Pixelgröße des Sensors, f = Brennweite

Je kleiner die GSD ist, umso kleinere Objekte sowie genauere Objektdetails können in einem Luftbild beobachtet werden. Die geometrische Auflösung richtet sich dabei immer nach der Größe des kleinsten zu erfassenden Objektes und sollte maximal $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ der Größe des Objektes entsprechen, damit jedes Objekt von einem eindeutigen Pixel erfasst ist.

Die spektrale, geometrische und radiometrische Auflösung bestimmen gemeinsam die Möglichkeiten und Grenzen der Objektextraktion und damit die beobachtbare Komplexität in Luftbildern. Nach Mayer (1998: 15) wird die Komplexität eines Luftbildes durch den Inhalt des Luftbildes sowie die vom eingesetzten Sensor gegebene Beobachtbarkeit bestimmt. Demnach wird die Komplexität einer Szene pro Flächeneinheit bestimmt:

- durch die gegebene Auflösung,
- durch die Anzahl der beobachtbaren Objekte sowie der Objektklassen,
- durch die Variabilität innerhalb einer Objektklasse,
- durch Relationen zwischen den Objekten (siehe Abb. 2.16).

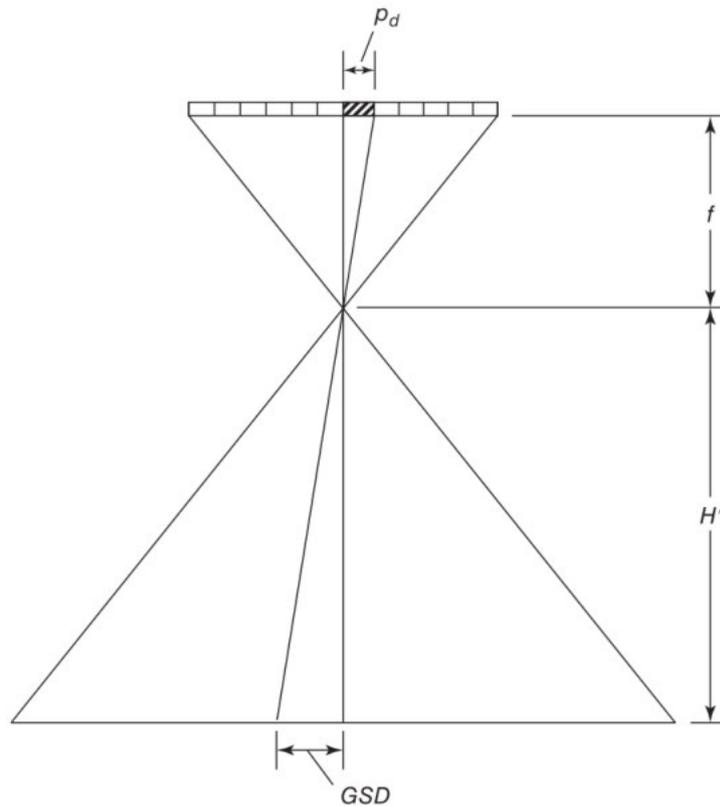


Abb. 2.15: Verhältnis von Bodenauflösung (GSD), Brennweite (f), Flughöhe (H') und Pixelgröße (p_d) (Lillesand et al. 2015: 133)

Je mehr Objekte pro Objektklasse und je mehr verschiedene Objektklassen in einem Luftbild beobachtet werden können, desto komplexer ist das Luftbild. Darüber hinaus nimmt die Komplexität eines Luftbildes auch mit der Zunahme der Variabilität je Objektklasse zu. Das heißt je unterschiedlicher die Objekte in einer Objektklasse sind, desto größer ist die Komplexität. Darauf aufbauend kann allgemein davon ausgegangen werden, dass das Luftbild desto komplexer ist, je verschiedenartiger die Beziehungen zwischen den Objekten sind (Hinz 2004: 14).

Die höhere Komplexität eines Luftbildes erschwert einerseits die klassische pixelbasierte Bildanalyse, da eine zunehmende Komplexität zu Fehlassifizierungen und geringeren Genauigkeiten führt. Andererseits ermöglicht sie durch eine zielgerichtete Modellbildung sowie eine entsprechende Extraktionsstrategie (siehe Kap. 2.3.2.1) erst die Extraktion und Klassifikation von bestimmten Objekten.



Abb. 2.16: Komplexität von Luftbildern (Auflösungen: obere Abbildung 50 cm, mittlere Abbildung 2,5 m, untere Abbildung 5 m) (verändert nach Hinz 2004: 14)

2.2.6 Einfluss der Flugplanung und Anordnung der aufgenommenen digitalen Luftbilder

Da die zu kartierende Fläche häufig nicht mit einem einzelnen Luftbild erfasst werden kann, erfolgt in der Praxis immer eine kontinuierliche Datenaufnahme der Luftbilder in Form von Reihenaufnahmen. Dabei werden die Bilder immer mit einer Überlappung zum vorangegangenen Bild aufgenommen (siehe Abb. 2.17) (Lillesand et al. 2015: 156f). Für eine stereoskopische Auswertung sowie die Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen (siehe Kap. 2.3.1.1) ist dabei eine Längsüberlappung der Bilder innerhalb eines Flugstreifens von mindestens 60 Prozent sowie eine Querüberlappung zu den benachbarten Flugstreifen von mindestens 20 bis 30 Prozent notwendig (Tempfli et al. 2009: 336). Je größer die Längs- und Querüberlappung einer Luftbildbefliegung ist, desto genauer sind die stereoskopische Auswertung sowie die erstellten Digitalen Oberflächenmodelle, da mit zunehmender Überlappung die sichttoten

Räume minimiert werden und einzelne Objekte in mehreren Bildern häufiger angemessen werden können. Hirschmüller und Bucher (2010: 2) empfehlen für eine genaue Prozessierung der Oberflächenmodelle eine Überlappung längs zur Flugrichtung von 80 Prozent sowie eine Überlappung quer zur Flugrichtung von 70 Prozent.

Die Längs- und Querüberlappung und die daraus folgende Qualität des erzeugten Digitalen Oberflächenmodells und True Orthophoto Mosaikes bestimmt wesentlich die Extraktionsgenauigkeit aller zu extrahierenden Objekte, da diese entscheidend von der Datengrundlage beeinflusst wird.

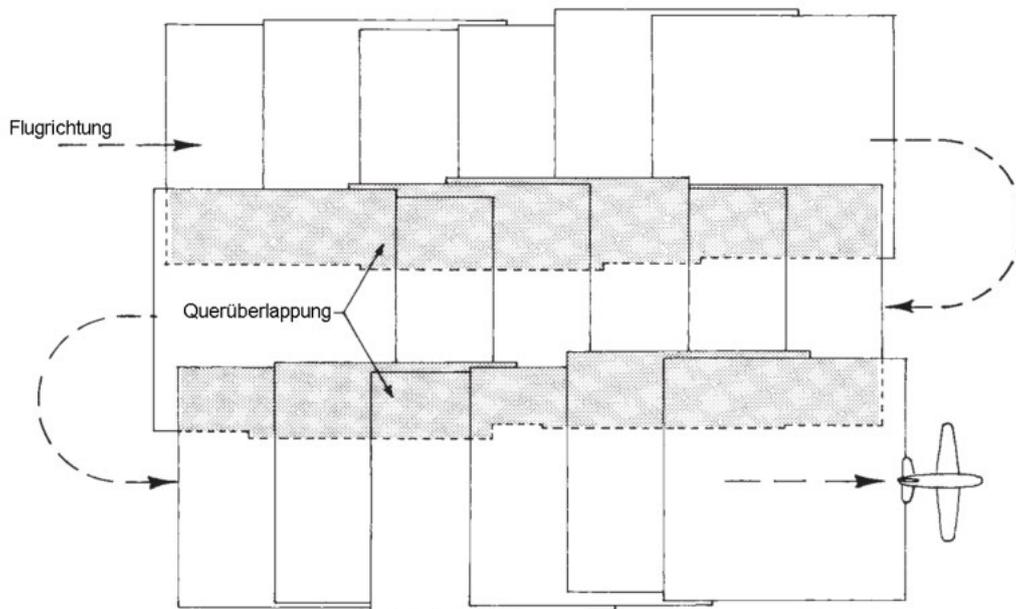


Abb. 2.17: Längs- und Querüberlappung alternierender Flugstreifen (verändert nach Lillesand et al. 2015: 157)

2.2.7 Bedeutung der Luftbildaufnahme für die Ableitung von Einzelbäumen

Wie Kapitel 2.2 verdeutlicht, hat die Luftbildaufnahme einen großen Einfluss auf die Ableitung von Einzelbäumen. Aus der Wahl des Fernerkundungssystems ergeben sich eine Reihe von Einschränkungen für die Objektextraktion. So können mit optischen Fernerkundungssystemen nur die Oberflächen von Objekten gemessen werden. Unterhalb der Oberfläche befindliche Objekte können mit Luftbildern nicht erhoben werden. Für die Extraktion von Bäumen bedeutet dies, dass nur Bäume abgeleitet werden können, welche die Oberfläche erreicht haben. Kleinere Bäume im Unterwuchs von geschlossenen Baumbeständen können nicht extrahiert werden.

Auch hat die geometrische, spektrale und radiometrische Auflösung des verwendeten Fernerkundungssystems einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Einzelbaumextraktion, da von ihr einerseits die Genauigkeit der erstellten True

Orthophoto Mosaiken und Digitalen Oberflächenmodelle abhängig ist und andererseits auch das Extraktionsergebnis von den jeweiligen Auflösungen beeinflusst wird. So ist mit zunehmender radiometrischer Auflösung eine differenziertere Ableitung der DOM möglich, was wiederum die Qualität dieser erhöht. Die geometrische Auflösung bestimmt darüber hinaus ganz entscheidend das Extraktionsergebnis. Im Rahmen der Arbeit wird daher im Rahmen der empirischen Analysen auch die optimale GSD für die Ableitung von Einzelbäumen aus Luftbildern bestimmt (siehe Kap. 4.1.2).

Für die Ableitung von Einzelbäumen sollten darüber hinaus ausschließlich Nadir- und Senkrechtsaufnahmen verwendet werden. Da aufgrund der Einschränkungen der optischen Bilddaten die Positionsbestimmung nur an der Oberfläche erfolgen kann, ist ein Verkippen der Bäume unbedingt zu vermeiden. Aus diesem Grund ist auch die Verwendung von True Orthophoto Mosaiken (siehe Kap. 2.3.1.2) unabdingbar.

Einen entscheidenden Faktor haben auch die Brennweite sowie die Längs- und Querüberlappung, da von ihnen der Einschneidewinkel (siehe Kap. 4.1.1) abhängig ist. Diese beeinflusst in erheblichem Maße die Qualität der Digitalen Oberflächenmodelle. Für die Ableitung von Einzelbäumen muss die Brennweite und die Längsüberlappung so gewählt werden, dass ein optimaler Einschneidewinkel für die Prozessierung von DOM in Waldgebieten erreicht wird. Die Bestimmung des optimalen Einschneidewinkels für Waldgebiete ist Bestandteil der empirischen Untersuchungen.

2.3 Grundlagen der digitalen Bildauswertung

Nach Heipke (2003: 59) lässt sich die Bildauswertung digitaler Luftbilder in zwei Bereiche gliedern, die sich jedoch gegenseitig stark beeinflussen. Der erste Bereich ist die Bildinterpretation bzw. -analyse, welche in Kapitel 2.3.2.2 ausführlich beschrieben wird, der zweite ist die geometrisch-radiometrische Bildauswertung. Die Bildinterpretation digitaler Luftbilder umfasst die Analyse der Bilddaten, d.h. die Klassifikation und Extraktion von Objekten. Die geometrisch/radiometrische Bildauswertung beinhaltet demgegenüber die Erstellung der Bildorientierung der Luftbilder, die Ableitung digitaler Oberflächen- und Geländemodelle sowie die Bilddatenvisualisierung.

2.3.1 Geometrisch-radiometrische Bildauswertung

Ausgangspunkt der geometrisch-radiometrischen Bildauswertung digitaler Luftbilder ist die Bildorientierung, die sich in den Bereich Sensormodell und den Bereich der Bestimmung homologer Bildpunkte unterteilt. Sensormodelle werden im Bereich der digitalen Luftbilddaufnahmen für Zeilenkameras und die flächenhafte Zentralprojektion eingesetzt (Heipke 2003: 60). Da sich in der Praxis Matrixkameras weitestgehend durchgesetzt haben und im Rahmen der Arbeit ausschließlich digitale Luftbilder von Matrixkameras verwendet werden, wird auf den Bereich der Sensormodelle von Zeilenkameras nicht weiter eingegangen.

Bei einem digitalen Luftbildflug mit einer kontinuierlichen Datenaufnahme ändert sich von Bild zu Bild die äußere Orientierung (Albertz 2009: 48, Linder 2009: 37). Für die Bildorientierung der sich überlappenden Rohdaten zueinander, müssen alle Parameter (äußere und innere Orientierung) bekannt sein, um den Bezug zwischen aufgenommenem Luftbild und Aufnahmegebiet herstellen zu können. Die Bestimmung der homologen Bildpunkte in digitalen Luftbildern ist mittels einer digitalen Bildzuordnung möglich. Diese Zuordnung erfolgt dabei über die sogenannte Aerotriangulation (AT). Mit Hilfe der Aerotriangulation werden auf Basis der bekannten Orientierungsparameter die sich überlappenden Einzelbilder zueinander in Beziehung gesetzt und in ein Koordinatensystem überführt. Die Aerotriangulation gestattet eine Überbrückung weiträumiger Gebiete ohne terrestrisch eingemessene Passpunkte und ermöglicht dabei eine sehr hohe Lagegenauigkeit (vgl. Kraus 2004).

In der Luftbildauswertung ist die Bildzuordnung auf Basis hoch lagegenauer GPS- und IMU-Daten auch durch eine direkte oder integrierte Sensororientierung möglich (vgl. Schwarz et al. 1993, vgl. Cramer 2001, vgl. Colomina 2002). Bei beiden Verfahren werden die GPS- und IMU-Daten für die Bestimmung der äußeren Orientierung verwendet, weshalb bei der direkten Sensororientierung keine Aerotriangulation mehr notwendig ist. Bei der integrierten Sensororientierung werden alle Informationen zur Bestimmung der Bildzuordnung verwendet. Voraussetzung für den Einsatz der direkten und integrierten Sensororientierung ist jedoch eine geometrische Kalibrierung der Kamera, da dadurch mit der Aerotriangulation vergleichbare Punktgenauigkeiten im Dezimeterbereich erreicht werden können, ohne den massiven Einsatz von Bodenpasspunkten (Heipke 2003: 61).

2.3.1.1 Ableitung Digitaler Oberflächenmodelle (DOM) und Digitaler Geländemodelle (DGM) auf Basis hochauflösender digitaler Luftbilder

Für die Ableitung Digitaler Oberflächenmodelle und Digitaler Geländemodelle aus Luftbildern wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Verfahren in die Praxis überführt. Dabei wurden sowohl Verfahren in der Photogrammetrie als auch im Bereich des Computer Vision entwickelt, welche jedoch lange Zeit hinsichtlich des Prozessierungsaufwandes sowie der absoluten und relativen Lagegenauigkeit keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferten (Hirschmüller 2011: 173).

Stereo Matching Verfahren haben sich dagegen als die bevorzugte Methode für die Tiefenrekonstruktion durchgesetzt, da diese hohe Genauigkeiten und eine schnelle Datenprozessierung ermöglichen. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit für die Ableitung der Digitalen Oberflächenmodelle ausschließlich auf Dense Stereo Matching Verfahren zurückgegriffen. Im Bereich des Dense Stereo Matchings existiert eine große Spannbreite unterschiedlicher Algorithmen (Scharstein & Szeliski 2002: 7ff). Ein genaues Dense Stereo Matching ist für eine Vielzahl von Fernerkundungsanalysen, wie auch für die Einzelbaumextraktion eine Grundvoraussetzung, bzw. der Schlüssel für das Erreichen der geforderten Vollständigkeits- und Genauigkeiten (Hirschmüller 2005: 1).

Lokale Matchingalgorithmen eignen sich aufgrund ihrer Effizienz für Echtzeitanwendungen, jedoch führen diese Ansätze häufig zu unscharfen Objektgrenzen (vgl. Hirschmüller et al. 2002), was für eine objektbasierte Auswertung im Hinblick auf die Genauigkeit der Ergebnisse problematisch ist. Pixelweise Matchingverfahren ermöglichen scharfe Objektgrenzen, jedoch ist auch mit diesen Verfahren kein eindeutiges Matching möglich. So kommt es bei pixelweisen Matchingverfahren beispielsweise zum Effekt der stückweisen Glättung. Auch die Verfahren des Dynamic Programming sowie die globalen Ansätze des Graph Cuts und der Belief Propagation haben hinsichtlich eines genauen und effektiven Matchings ihre Einschränkungen (Hirschmüller 2005: 1).

Zur Vermeidung der Nachteile der verschiedenen Stereo Matching Verfahren wurden das sogenannte Semi-Global Matching (SGM) entwickelt (vgl. Hirschmüller 2005, vgl. Hirschmüller 2008). Dieses Verfahren vereint die Vorteile globaler und lokaler Ansätze zu einem hochgenauen sowie pixelweisen Matching mit geringem Prozessierungsaufwand (Hirschmüller 2011: 174). Das Semi-Global Matchingverfahren hat sich im letzten Jahrzehnt als die führende Methode zur Generierung von Oberflächenmodellen durchgesetzt (vgl. Verleihung des Carl Pulfrich Preises 2011), weshalb im Rahmen der Arbeit auf das Verfahren des Semi-Global Matching zurückgegriffen wird. Die Stärke des SGM liegt vor allem in der Prozessierung hochauflösender digitaler Luftbilder von verschiedenen Kamerasystemen (Hirschmüller & Bucher 2010: 5).

„The Semi-Global Matching (SGM) method is based on the idea of pixelwise matching on mutual information and approximating a global, 2D smoothness constraints by combining many 1D constraints. The algorithm is described in distinct processing steps, assuming a general stereo geometry of two or more images with known epipolar geometry” (Hirschmüller

2005: 2). Das SGM beruht auf Bildpaaren, deren innere und äußere Orientierung bekannt ist und erfolgt in mehreren Stufen:

- Berechnung der Kosten des pixelweisen Matchings,
- Kostenaggregation,
- Disparitätsberechnung,
- Multibaseline Matching,
- Bereinigung der Disparitätsbilder,
- Bildprozessierung,
- Fusion der Disparitätsbilder (vgl. Hirschmüller 2005, vgl. Hirschmüller 2008).

Neben der Ableitung Digitaler Oberflächenmodelle ist im Bereich der Einzelbaumextraktion auch die Ableitung Digitaler Geländemodelle (DGM) sinnvoll. Durch die Verwendung von DGM lässt sich einerseits die Extraktionsgenauigkeit erhöhen sowie andererseits die Baumhöhe bestimmen. Für die Ableitung von DGM wurden vielfältige Verfahren entwickelt. Allen Verfahren liegt jedoch die Klassifizierung des Geländes zugrunde. Um erhöhte Objekte vom Geländegrund zu unterscheiden, lassen sich die Methoden in zwei Gruppen unterteilen. Dabei handelt es sich einerseits um direktionale Filtermethoden sowie andererseits um nachbarschaftsbasierte Methoden. Filtermethoden werden vor allem bei der Ableitung von DGM aus Laserdaten verwendet. Beispiele sind die Morphologische Filterung (vgl. Vosselmann 2000), die adaptiven TIN Modelle (vgl. Axelsson 2000), die sturdy interpolation (vgl. Kraus et al. 1997), die hierachical robust linear predicion (vgl. Kraus & Pfeifer 2001) sowie die multidirektionale Grundfilterung (vgl. Meng et al. 2009).

Neben der Ableitung von DGM aus Laserdaten wurden darüber hinaus Verfahren entwickelt, um aus photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodellen auch Digitale Geländemodelle ableiten zu können. Eine erste, jedoch fehlerbehaftete, Methode war die morphologische Öffnung. Diese führt zu einer Reihe von Weiterentwicklungen, die alle durch einen zweistufigen Prozess gekennzeichnet sind. In einem ersten Schritt werden erhöhte Pixel oder Grundpixel bestimmt und in einem zweiten Schritt erfolgt eine Interpolation zur Schließung der erhöhten Bereiche. Beispiele für diese nachbarschaftsbasierten Verfahren sind unter anderem die regionsbasierten Ansätze nach Mayer (2003) und Schiewe (2001). Neuere Ansätze stammen von Bochow (2009), Perko et al. (2015) und Pilz et al. (2016).

Aufgrund der Eigenschaften optischer Bilddaten eignen sich die Ansätze zur Ableitung von DGM aus photogrammetrisch abgeleiteten DOM nur sehr eingeschränkt für geschlossene Waldbereiche. In Waldgebieten sind die aus Laserdaten abgeleiteten DGM durch eine höhere Genauigkeit gekennzeichnet, da die Laserimpulse die Vegetation durchdringen und zwischen dem ersten und dem letzten Impuls unterschieden werden können.

2.3.1.2 Ableitung hochauflösender True Orthophoto Mosaik

Die Rohdaten einer Luftbildbefliegung liegen meist als Nadir-Abbildung vor. Dadurch kommt es zum Rand der Bilder hin zu geometrischen Verzerrungen der erhöhten Objekte. Um diese Verzerrung, so wie sie im Orthophotomosaik vorkommen, zu verhindern, ist eine Differentialentzerrung mit Hilfe des erzeugten digitalen Oberflächenmodelles notwendig. Dabei werden die sogenannten True Orthophotomosaik (TOM) erzeugt. Abbildung 2.18 zeigt die Differentialentzerrung auf Basis des erstellten DOM. Durch diese wird das Verkippen der Bäume im TOM verhindert und die sichttoten Räume mit Informationen aus Nachbarbildern aufgefüllt (Heipke 2003: 63). Zusätzlich entspricht jeder Bildpixel der exakten Position im verwendeten Koordinatensystem. Die erhöhten Objekte können dementsprechend lagegenau und kantenscharf abgebildet werden (Hirschmüller & Bucher 2010: 3). Die aktuellsten Entwicklungen im Bereich der Bildzuordnung haben die Qualität des DOM so stark verbessert, dass auch eine weitgehend korrekte Abbildung extremer Erhöhungen sowie eine verbesserte Bildzuordnung in Sichtschattenbereichen möglich sind (vgl. Hirschmüller 2011).

Für die Extraktion von Einzelbäumen ist die Ableitung und Modellnutzung von True Orthophoto Mosaiken von entscheidender Bedeutung. Sie ermöglicht einerseits die genaue Positionsbestimmung ohne Verzerrungen und andererseits die Attributierung der extrahierten Bäume.

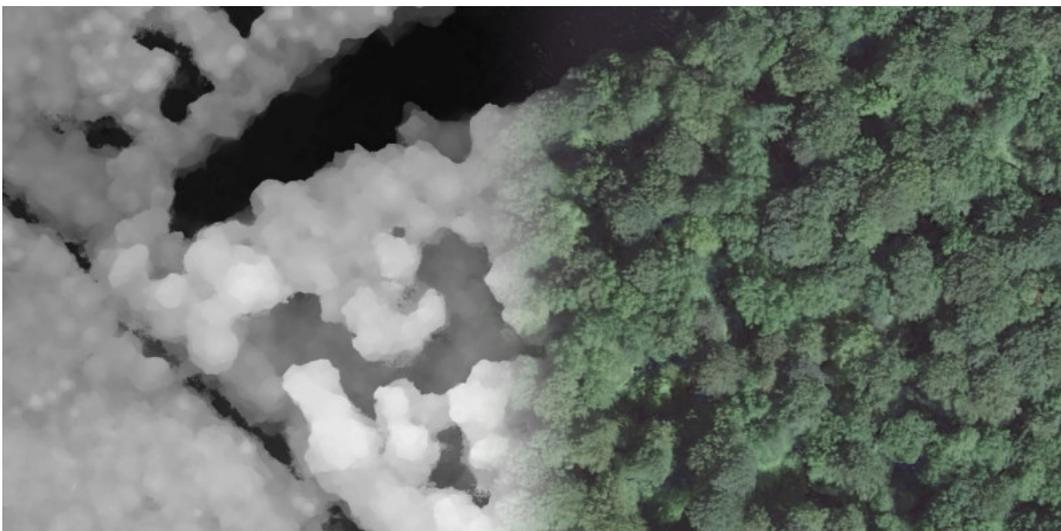


Abb. 2.18: DOM (links) und TOM (rechts) einer Laubwaldszene (Habichtswald)

2.3.2 Interpretation und Analyse hochauflösender digitaler Luftbilder

Die Bildinterpretation oder -analyse ist die automatische Ableitung physischer Objekte der realen Welt aus Bilddaten (vgl. Rosenfeld 1982, zitiert in Straub & Heipke 2001: 267). Dementsprechend ist das Ziel der Bildanalyse eine Generierung eindeutiger Objektindividuen oder Objektklassen aus den in den verwendeten Fernerkundungsdaten enthaltenen Informationen. Nach Sester (1995: 8) versucht die automatische Bildanalyse hochauflösender Luftbilder

zur Erreichung dieses Zieles das menschliche Sehen nachzubilden. Dieses beruht nicht nur auf reinen Farbinformationen, sondern auch auf der Lage der Objekte im Raum, charakteristischen Formen und Mustern der Objekte, Nachbarschaftsbeziehungen und strukturellen Merkmalen, d.h. auf semantischen Informationen. Semantische Informationen über die zu extrahierenden Objekte sind dabei nicht über die physikalischen Eigenschaften der Objekte selbst bestimmt, sondern durch den Menschen, weshalb die in Luftbildern gespeicherten Informationen keine semantischen Informationen enthalten. Die Erzeugung von semantischen Informationen ist daher nur durch die Integration von erweitertem Wissen möglich.

2.3.2.1 Modellbasierte Bildanalyse

Das Wissen über die physischen und semantischen Objekteigenschaften wird mit Hilfe eines Modelles erzeugt, welches wiederum die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Bildanalyse von hochauflösenden Luftbildern ist (Baumgartner 2003: 11). Das erstellte Modell macht dabei die Nutzung des Wissens über die zu extrahierenden Objekte für die rechnergestützte Analyse möglich (Heipke 2003: 62). Das grundlegende Ziel eines Modelles ist daher eine eindeutige und von Computern interpretierbare Objektbeschreibung (Hinz 2004: 15).

Dabei muss zwischen der Modellbildung bzw. Modellierung und der Modelldefinition bzw. Modellnutzung unterschieden werden (Flyn & Jain 1989: 162, Flyn & Jain 1991: 115). Unter der Modellierung versteht man die Modellakquisition, d.h. den Prozess der Auswahl des richtigen Modells. Modelldefinition ist der Prozess der Zusammenführung des ausgewählten Modelles sowie der Objektinformationen, was die Objekterkennung ermöglicht (Sester 1995: 8). Dabei spielt auch die Extraktionsstrategie eine entscheidende Rolle. Mit ihr wird festgelegt, welches Modellwissen für die Objektextraktion genutzt wird, an welcher Stelle es für die Analyse eingesetzt wird und welche Extraktionsmethoden eingesetzt werden, d.h. in welcher Reihenfolge die einzelnen Extraktionsschritte durchgeführt werden (Bacher 2006: 7).

Die Übertragung des menschlichen Sehens auf das maschinelle Sehen ist vor allem bei modellbasierten Verfahren seit längerer Zeit erfolgreich möglich (vgl. Sester & Förstner 1989, vgl. Schickler 1992). Dies betrifft Luftbilder, deren Parameter (Beleuchtungsverhältnisse, Blickwinkel, Lage etc.) gut bekannt sind und Objekte über die viele Vorabinformationen (Position, Art des Objektes, etc.) zur Verfügung stehen.

Nach Förstner (1993: 374) lässt sich die modellbasierte Bildanalyse in fünf Teilbereiche unterteilen (siehe Abb. 2.19):

- Objektmodell,
- Sensormodell,
- Bildmodell,
- Analysemodell,
- Interpretationsmodell.

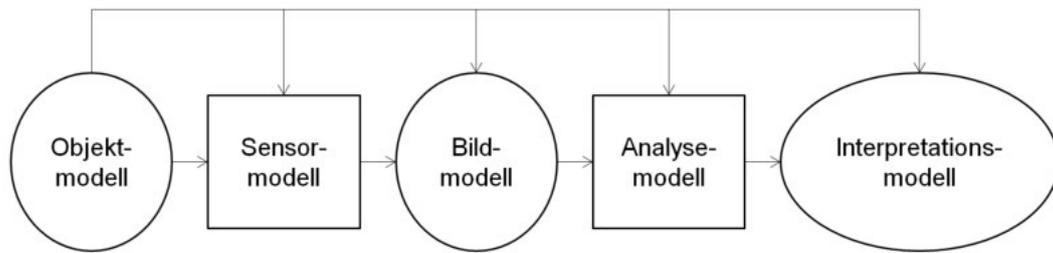


Abb. 2.19: Teilmodelle der Bildanalyse (verändert nach Förstner 1993: 374)

Unter einem Objektmodell versteht man eine idealisierte Beschreibung der realen Welt (Wessel 2006: 31). Objektmodelle müssen auf das zu extrahierende Objekt ausgerichtet sein und enthalten alle für die Objektbeschreibung notwendigen geometrischen, physischen, biologischen, strukturellen sowie semantischen Elemente. Darüber hinaus müssen Beziehungen zwischen Objekten in entsprechenden Hierarchien beschrieben werden (Förstner 1993: 375). Mit Hilfe des Sensormodelles wird das Objektmodell in den Bildraum übertragen. Das Sensormodell beinhaltet die geometrisch und physikalisch notwendigen Anpassungen im Zuge der Luftbildaufnahme (Hinz 2004: 15). Dazu gehören die Transformationsprozesse von 3D zu 2D, die Speicherung der spektralen Objektreflektanz, die Beleuchtungsverhältnisse sowie die Sensoreigenschaften (Förstner 1993: 375).

Das Bildmodell enthält die Objekteigenschaften der realen Welt, welche im Bildraum wiedergefunden werden können. Dazu gehören beispielsweise die geometrischen und radiometrischen Eigenschaften von Objekten, welche in Luftbildern analysiert werden können. Das Bildmodell bildet damit den Link zwischen Objekt- und Interpretationsmodell und muss vom Objekt- und Sensormodell abstammen (Förstner 1993: 375).

Das Analysemodell ist abhängig vom Bildmodell und der Extraktionsstrategie. Im Analysemodell erfolgt die eigentliche automatische Objektextraktion auf Basis der im Bildmodell definierten Objekteigenschaften. Dazu gehört auch der zielgerichtete Einsatz von Extraktionsalgorithmen und -methoden.

Im Interpretationsmodell erfolgt die Beschreibung, Darstellung und Überprüfung sowie Speicherung der Ergebnisse der Objektextraktion. Das Interpretationsmodell enthält alle ableitbaren Objektinformationen aus dem Objekt- und Bildmodell. Dazu gehören beispielsweise die Lage, Höhe oder Grenzen der Objekte (Förstner 1993: 376).

Die automatische Bildanalyse verwendet dementsprechend vorhandenes Wissen, welches über die im Luftbild dargestellten Objekte a priori zur Verfügung gestellt wird. Dazu gehört nach Sester (1995: 11):

- „Wissen über die auftretenden Objekte und deren Strukturen (deskriptive Eigenschaften),
- Wissen über die Unterschiede zu anderen Objekten (diskriminierende Eigenschaften),
- Wissen über funktionelle Eigenschaften der Objekte,
- Wissen über Relationen zwischen den Objekten einer Szene (kontextuelles Wissen),

- Wissen über die Verfahren und Methoden der Objekterkennung,
- Wissen über die Verfahren und Methoden der Objektklassifikation,
- Wissen über Erkennungsstrategien und Konfliktlösungsmöglichkeiten“.

Neben der horizontalen Modellierung innerhalb einer Maßstabsebene ist für die Bildanalyse auch ein Vorgehen in vertikaler Ebene auf verschiedenen Maßstabsebenen in Form eines Ebenenmodells sinnvoll. Dadurch lassen sich die notwendigen Bildinformationen auf wesentliche Merkmale reduzieren. Das Ebenenmodell unterteilt sich in drei hierarchische Ebenen (siehe Abb. 2.20):

- low level: Ebene der Bildvorverarbeitung
- mid level: Ebene der Merkmalsextraktion
- high level: Ebene der Objektextraktion

In Abhängigkeit vom Ebenenmodell lassen sich auch bei der Extraktionsstrategie drei Strategien (siehe Abb. 2.20) unterscheiden. Bei der Wahl der geeigneten Extraktionsstrategie wird zwischen datengetriebenen, modellgetriebenen und hybriden Ansätzen unterschieden.

Datengetriebene Ansätze (bottom-up Ansätze) beginnen mit einer Bildvorverarbeitung. Darauf aufbauend werden aus den Luftbildern Merkmale extrahiert (Segmentierung) und zu höherwertigen Strukturen zusammengefasst. Diese werden wiederum zu Objektteilen und Objekten zusammengefasst. Dieser Vorgang wird solange durchgeführt, bis den Modellvorgaben entsprochen wird und eine möglichst eindeutige Modellzuordnung erfolgen kann. Grundvoraussetzung dieses Ansatzes ist, dass auf jeder Ebene neue Informationen extrahiert werden, bis diese Informationen für die Objektextraktion ausreichen (Baumgartner 2003: 12, Hinz 2004: 18).

Modellgetriebene Ansätze (top-down Ansätze) generieren vom Objekt- und Sensormodell ausgehend Hypothesen für die Objektextraktion. Zur Überprüfung der aufgestellten Objekthypothesen wird im Bild nach Merkmalen gesucht, die dem Modell zugeordnet werden können, d.h. es wird auf Basis des vorgegebenen Wissens gezielt im Bild nach Objekten oder Objektteilen gesucht. Voraussetzung dieses Ansatzes ist jedoch ein eindeutiges Modell. Der Vorteil der modellgetriebenen Ansätze besteht in der starken Einschränkung des Suchraumes und des damit bedingten geringeren Einflusses von Störungen (Baumgartner 2003: 12, Hinz 2004: 18).

Hybride Ansätze verbinden modell- und datengetriebene Ansätze. Vor allem für sehr komplexe Luftbilder ist die Kombination aus modell- und datengetriebener Vorgehensweise die Sinnvollste. Auf Grundlage der datengetriebenen Merkmalsextraktion und Strukturableitung (Einschränkung des Suchraumes) werden Hypothesen für einfach zu extrahierende Objektteile generiert. Diese werden modellgetrieben überprüft sowie zur Erzeugung komplexerer Hypothesen genutzt. Diese werden wiederum verifiziert oder falsifiziert (Baumgartner 2003: 13, Hinz 2004: 18).

Hinsichtlich der Komplexität der Bilddaten sowie hinsichtlich der Komplexität der verwendeten Modelle lässt sich nach Suetens et al. (1992: 11ff) folgende Einteilung vornehmen (siehe

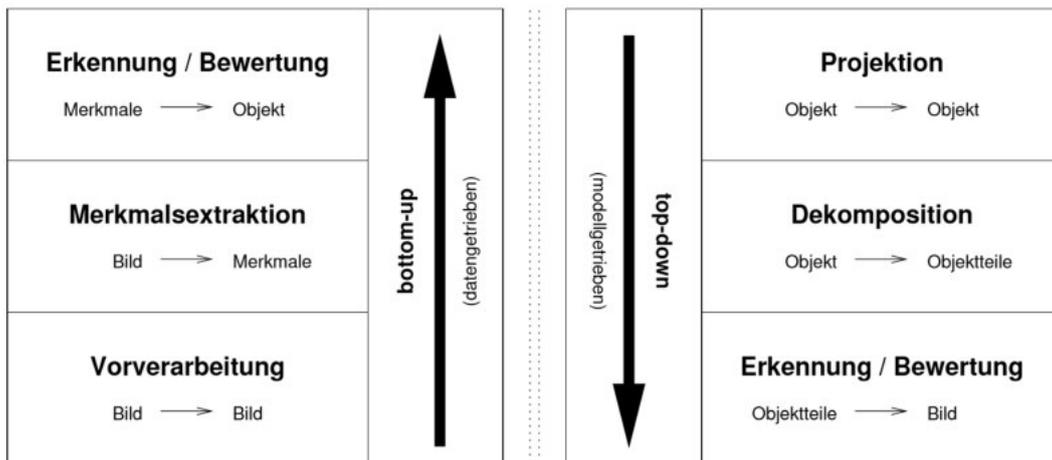


Abb. 2.20: Ebenenmodell der Bildanalyse (Hinz 2004: 18)

Abb. 2.21). Bei Bildszenen mit einer niedrigen Komplexität und einfachen Modellen, wie beispielsweise bei ländlichen Szenen, werden vor allem pixelbasierte Auswertungsverfahren eingesetzt. Mit zunehmender Komplexität der Bilddaten aber weiterhin einfachen Modellen bzw. einem stark eingeschränkten Suchraum finden überwiegend modellgetriebene Ansätze ihre Einsatzgebiete. Sollten Daten mit geringer Komplexität sowie sehr komplexe Modelle vorliegen, eignen sich vor allem stark datengetriebene Ansätze der Bildauswertung. Sind sowohl die Modelle als auch die Bilddaten komplex, werden hybride Ansätze eingesetzt, welche auf die Spezifika der jeweiligen Bildauswertung ausgerichtet sind.



Abb. 2.21: Einteilung der Ansätze der Bildauswertung hinsichtlich Komplexität der Daten und Modelle (Hinz 2004: 19 verändert nach Suetens et al. 1992: 13)

2.3.2.2 Objektbasierte Bildanalyse

Mit der Entwicklung der digitalen Luftbildaufnahme und der in jüngerer Vergangenheit verstärkten Verfügbarkeit von sehr hochauflösenden Daten wurden zunehmend auch Methoden und Algorithmen zur Auswertung dieser Daten entwickelt. Einen besonderen Stellenwert haben die höchstauflösenden Fernerkundungsdaten in urbanen Räumen, da diese sich durch eine hohe Heterogenität der detektierbaren Objekte auszeichnen (vgl. Poznanska & Bayer 2014). Aber auch in der Forstfernerkundung gehören hochauflösende Luftbilder mittlerweile zum

Standard, weshalb es auch hier zunehmend zum Einsatz von Methoden und Algorithmen der Objektbasierten Bildanalyse kommt.

Die zunehmende Verbreitung hochauflösender Daten für alle Arten von Fernerkundungsanalysen macht einerseits viele Analysen erst möglich, führt andererseits zu Problemen, die mit pixelbasierten Auswertungsverfahren nicht gelöst werden können. Die hohe geometrische, spektrale und radiometrische Auflösung von Luftbildern führt zu:

- einer großen geometrischen und spektralen Heterogenität zwischen den Objekten einer Klasse,
- einer großen Heterogenität innerhalb der einzelnen Objekte,
- einem ständigen räumlichen Wechsel unterschiedlichster Objektklassen der verschiedensten Ausprägungen.

Klassische pixelbasierte Verfahren stoßen, da sie sich nur auf Farbinformationen beziehen, bei hochaufgelösten Luftbildern an die Grenzen der Auswertung. Zum einen führt die hohe Auflösung aufgrund der spektralen Heterogenität zu einem sogenannten Salz-und-Pfeffer-Effekt, zum anderen werden die Variabilität und das Rauschen erhöht, da die einzelnen Pixel kleiner sind als die zu extrahierenden Objekte. Dies führt zu Fehlklassifizierungen und einer Verschlechterung der Genauigkeiten.

Die für geringaufgelöste Daten entwickelten pixelbasierten Klassifizierungsverfahren haben sich in vielen Studien als ungeeignet für hochaufgelöste Daten erwiesen. Da in hochaufgelösten Bildern die zu klassifizierenden Pixel viel kleiner sind als die Objekte, die sie repräsentieren, wurden sogenannte objektbasierte Klassifizierungsverfahren entwickelt, um diesem Problem gerecht zu werden (vgl. Blaschke 2000, vgl. Blaschke & Strobel 2001, vgl. Myint et. al. 2011, vgl. Sebari & He 2013).

Vorbild der Objektbasierten Bildanalyse ist die menschliche Perzeption. Diese beruht nicht nur auf den reinen Farbinformationen, sondern auch auf der Lage der Objekte, Formcharakteristiken, Nachbarschaftsbeziehungen, charakteristischen Mustern und strukturellen Merkmalen. Das heißt, bei der objektbasierten Analyse werden einzelne Objekte in deren Kontext zu ihrer Umgebung analysiert. Es werden dabei nicht nur die spektralen Eigenschaften, sondern auch die Objektform und Textur sowie die Nachbarschaftsbeziehungen berücksichtigt. Auf diese Weise versucht das objektbasierte Verfahren die menschliche Wahrnehmung zu modellieren (Blaschke 2000: 30ff). Um die Komplexität der menschlichen Wahrnehmung nachahmen zu können, ist der Aufbau eines umfassenden Modellwissens über die Eigenschaften der zu extrahierenden Objekte notwendig. Diese Objektinformationen lassen sich nicht aus einzelnen Pixeln ableiten, sondern nur aus einer sinnvollen Gruppierung mehrerer Pixel. Diese werden in der Objektbasierten Bildanalyse als Segmente bezeichnet.

Das Prinzip der Objektbasierten Bildanalyse beruht dementsprechend auf der Grundannahme, dass semantische Informationen notwendig sind, um hochauflösende Bilder sinnvoll auswerten und klassifizieren zu können. Daher wird der Klassifizierung ein Segmentierungsschritt vorgeschaltet, nach welchem die vorher erstellten Segmente anstelle der ursprünglichen Pixel

klassifiziert werden. Das Klassifizierungsergebnis wird dabei entscheidend von der Genauigkeit der Segmentierung bestimmt. Nicht objektgenaue Segmentierungen, wie beispielsweise die gleichzeitige Erfassung unterschiedlicher Objekte (z.B. Baum und Weg) in einem Segment, sind in der Klassifizierung nicht mehr korrigier- und trennbar.

Unter Segmentierung versteht man nach Hildebrandt (1996: 526) die „Gruppierung von Bildelementen nach bestimmten Einheitlichkeitsprädikaten“. Das heißt, die Bilder werden in zusammenhängende, sich nicht überlappende Segmente zerlegt, die definierte Homogenitätsbedingungen erfüllen und reale Objekte repräsentieren. Die Segmentierung kann entsprechend der Extraktionsstrategie modellgetrieben und datengetrieben erfolgen.

2.4 Verfahren zur Einzelbaumextraktion aus Satellitenbildern und digitalen Luftbildern

Seit den 1970er Jahren werden Fernerkundungsdaten in der Forstfernerkundung zur Ableitung von Baumbeständen und größeren Baumgruppen verwendet (Bücken 2014: 7). Mit zunehmender Verbesserung der Auflösung von LIDAR-Daten und Luftbildern sowie der Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen wurden seit den 1980er Jahren vielfältige Ansätze zur Ableitung von Einzelbäumen entwickelt (vgl. Haenal et al. 1987).

Nach Straub (2003a: 28f) lassen sich die Verfahren zur Einzelbaumextraktion entsprechend den unterschiedlichen Extraktionsstrategien der Bildanalyse (siehe Kap. 2.3.2.1) in modellgetriebene und datengetriebene Ansätze unterteilen.

Bei modellgetriebenen Ansätzen wird zunächst ein 3D-Modell der zu extrahierenden Bäume entwickelt, welches mittels einer geometrischen Transformation in ein 2D-Modell umgewandelt wird. Mit diesem wird auf der Bildebene ein Mustervergleich durchgeführt und die Einzelbäume bestimmt (siehe Abb. 2.22). Modellgetriebene Ansätze eignen sich vor allem, wenn von den zu extrahierenden Bäumen umfassende Modelle entwickelt und für die Extraktion genutzt werden können. Zudem ist der Einsatz von modellgetriebenen Ansätzen in homogenen Beständen sinnvoll, bei dem nur eine geringe Anzahl von Modellen, bzw. Mustern entwickelt werden muss und die zu extrahierenden Bäume vergleichsweise einfach zu beschreiben sind (Straub 2003a: 28).



Abb. 2.22: Modellgetriebener Ansatz der Einzelbaumextraktion (verändert nach Straub 2003a: 28)

Bei Extraktionsverfahren, die datengetrieben vorgehen, steht zunächst die Bildebene im Vordergrund. Basierend auf der Bildebene werden zunächst mit unterschiedlichsten Verfahren eindeutige Baummerkmale, wie Kanten oder Segmente bestimmt. Durch eine Gruppierung der extrahierten Merkmale werden darauf aufbauend die Einzelbäume abgeleitet (siehe Abb. 2.23). Datengetriebene Ansätze werden überwiegend eingesetzt, wenn das Modell einfacher beschrieben werden kann. Die Probleme von datengetriebenen Ansätzen liegen in der komplizierten Zuordnung der extrahierten Merkmale zu Einzelbäumen, da diese oftmals einzelfallabhängig sind (Straub 2003a: 28f).



Abb. 2.23: Datengetriebener Ansatz der Einzelbaumextraktion (verändert nach Straub 2003a: 28)

2.4.1 Template-Matching Verfahren

Basierend auf optischen Bilddaten wurden seit Mitte der 1990er Jahre eine Reihe von Template-Matching Verfahren entwickelt, bei denen auf einem Modell basierend, die Baumkrone von Bäumen beschrieben und für die Extraktion von Einzelbäumen eingesetzt wird (vgl. Pollock 1994, vgl. Pollock 1996, vgl. Pollock 1999, vgl. Larsen & Rudemo 1997a, vgl. Larsen & Rudemo 1997b, vgl. Larsen & Rudemo 1998, vgl. Larsen 1997, vgl. Larsen 1999, vgl. Mayr et al. 1999, vgl. Sheng et al. 2001, vgl. Sheng et al. 2003, vgl. Straub & Heipke 2001, vgl. Straub 2003a, vgl. Andersen et al. 2002, vgl. Gong et al. 2002, vgl. Korpela 2004, vgl. Erikson & Olofsson 2005, vgl. Heurich 2006, vgl. Olofsson et al. 2006, vgl. Wolf & Heipke 2007, vgl. Yang et al. 2009). Die auf ein Template-Matching zurückgreifenden Algorithmen lassen sich den modellgetriebenen Ansätzen zuordnen.

Grundlage vieler Verfahren sind die in Pollock (1996: 31ff) beschriebenen geometrischen Aspekte eines Baumkronenmodelles. Diese beruhen auf der Idee, dass eine Baumkrone nach Horn (1971: 106) durch eine zweidimensionale Fläche wie folgt beschrieben werden kann:

$$\frac{z^n}{a^n} + \frac{y^n}{b^n} = 1$$

Wird dieses zweidimensionale Modell um eine dritte Dimension erweitert, lässt sich ein dreidimensionales generalisiertes Ellipsoid (Baummodell) ableiten, welches nach Pollock (1994: 527, 1996: 31) wie folgt beschrieben werden kann:

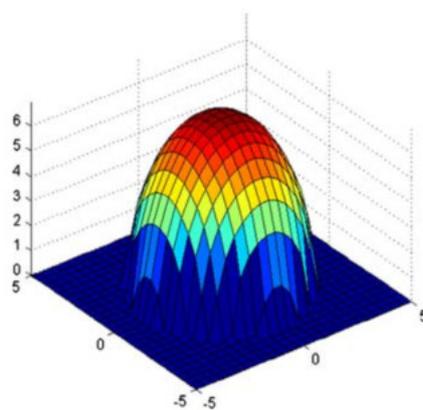
$$\frac{z^n}{a^n} + \frac{(x^2 + y^2)^{\frac{n}{2}}}{b^n} = 1$$

Dabei entsprechen x , y und z den Koordinaten, welche die Baumoberflächen beschreiben. Der Parameter a entspricht der Baumhöhe, b dem Kronendurchmesser und n einem Formparameter. Der Formparameter n ermöglicht eine Anpassung der Baumform. Ist $n = 1$ ist die Form kegelförmig, ist $n = 2$ ist die Form elliptisch und ist $n = \infty$ ist die Form zylindrisch. Für die Beschreibung der Baumform wird nur die obere Hälfte des Ellipsoids verwendet. Dieses wird wiederum mit einem Distanzparameter h über dem Boden positioniert (Erikson & Olofsson 2005: 260) (siehe Abb. 2.24a & b).

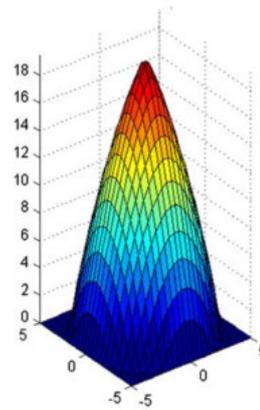
Gong et al. (2002: 1204) haben in ihrer Arbeit die typischen, minimalen und maximalen Parameter für Laub- und Nadelbäume untersucht (siehe Tab. 2.2). Nach Mayr et al. (1999: 159) ist der ideale Formparameter basierend auf einem Digitalen Oberflächenmodell für Laubbäume $n = 2.5$ und für Nadelbäume $n = 1.8$.

Tab. 2.2: Parameterwert für den geometrischen Teil des Baummodelles nach Pollock (1996) (verändert nach Gong et al. 2002: 1204)

Parameter	Nadelbaum			Laubbaum		
	<i>typisch</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>typisch</i>	<i>min</i>	<i>max</i>
Baumhöhe a	25	15	40	7	2,5	15
Kronendurchmesser b	5	3	8	7	2,5	15
Formparameter n	1,2	1,0	1,8	2,0	1,5	2,5



(a) Baummodell nach Pollock für einen Laubbaum ($n = 2$, $b = 3,5$, $a = 7$) (Wolf & Heipke 2007: 319)



(b) Baummodell nach Pollock für einen Nadelbaum ($n = 1,2$, $b = 5$, $a = 20$) (Wolf & Heipke 2007: 319)

Abb. 2.24

Neben der geometrischen Form eines Baumes betrachtet Pollock (1996: 36ff) auch das Reflexionsverhalten der Baumkrone. Dabei wird für jeden Bereich der Baumkrone die Reflexion der elektromagnetischen Strahlung berechnet. Larsen und Rudemo (1997b) erweitern darauf aufbauend das geometrische Baumkronenmodell um die Position der Sonne und der Kamera. In ihr Modell gehen neben der Ellipsoidenform auch die Position des Objektes in Bezug zur Kamera und zur Sonne sowie die einfallende und reflektierte Strahlung ein. Die so erstellten Templates werden anschließend im Bild gesucht und Wahrscheinlichkeitskandidaten für Baumspitzen ausgegeben. Dieses Verfahren führt jedoch häufig zu einer erhöhten Anzahl von Baumspitzen. In Larsen (1999) wird daher das Verfahren mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt und für unterschiedliche Template-Kandidaten für Baumspitzen abgeleitet. Dabei werden die Kandidaten, die hohe Wahrscheinlichkeiten besitzen, addiert, da davon ausgegangen wird, dass richtige Kandidaten bei verschiedenen Parametern erzeugt werden.

Straub (2003a: 42ff) sowie Wolf & Heipke (2007: 319ff) verwenden in ihren Arbeiten nur geometrische und radiometrische Eigenschaften zur Beschreibung der Baumkrone, die mit Fernerkundungsdaten direkt gemessen werden können. Dazu gehören die Größe, die Kreisförmigkeit, die Konvexität sowie die Vitalität, welche beide in ihren Modellen verwenden. Die Größe jeder Baumart ist von der Natur vorgegeben und eignet sich daher sehr gut zur Abgrenzung von Baumsegmenten. Bei der Kreisförmigkeit wird davon ausgegangen, dass eine Baumkrone im Grundriss im Idealfall einem Kreis entspricht. Eine weitere nutzbare Eigenschaft von Bäumen ist ihre durchgehende Konvexität. Zur Beurteilung der Vitalität wird der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) verwendet.

Template Matching Verfahren eignen sich vor allem für Szenen mit einem sehr homogenen Baumbestand. Bei von der Art und dem Alter her sehr heterogenen Baumbeständen ist die Einzelbaumextraktion mit Hilfe von Templates sehr aufwendig, da viele verschiedene Parameter ausgewählt werden müssen. Zudem ist ein sehr großes Vorwissen notwendig. Die Grundidee des Baummodells von Pollock wird jedoch von der überwiegenden Anzahl von Extraktionsalgorithmen verwendet, welche sich auf die Extraktion von Einzelbäumen auf der Basis von Digitalen Oberflächenmodellen stützen.

2.4.2 Region Growing

Region Growing ist eine Segmentierungsmethode der Bildanalyse, bei welcher die Segmente von einem Startpunkt nach vorher festgelegten Regeln und Abbruchkriterien wachsen. Region Growing-Algorithmen verbinden dabei Nachbarpixel zu homogenen Gebieten (Böhner et al. 2006: 31). Von entscheidender Bedeutung sind dabei die Wahl der Startpunkte (Anzahl und Ort) sowie die Wachstumsregeln, da diese das Segmentierungsergebnis stark beeinflussen. Für ein geeignetes Region Growing wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Algorithmen entwickelt, die auch für die Extraktion von Einzelbäumen eingesetzt werden (vgl. Erikson 2004a, vgl. Erikson 2004b, vgl. Erikson & Olofson 2005, vgl. Tiede et al. 2005, vgl. Erikson et al. 2006).

Erikson (2004a) beschreibt in seiner Arbeit drei Region Growing Verfahren, die für die Einzelbaumextraktion genutzt werden können:

- Segmentierung mit Fuzzy Sets (unscharfe Mengen),
- Segmentierung mit Brownian Motion (Brownscher Bewegung)
- Segmentierung mit Random Walk.

Die Fuzzy Set Theorie wurde Mitte der 1960er Jahre von Zadeh (1965) entwickelt, um Unschärfe modellieren zu können. Anwendungen, die auf der Fuzzy Set Theorie beruhen, sind in der Bildanalyse weit verbreitet. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie einfach und leicht handhabbar sind sowie durch eine große Realitätsnähe der verwendeten Modelle. Die „unscharfen“ Modelle hinsichtlich der verwendeten Schwellenwerten, der geforderten

Korrektheit und Vollständigkeit sowie der erforderlichen Komplexität sind dabei oftmals einfacher umzusetzen als „scharfe“ Modelle (Nissen 2007: 3f). Bei der Segmentierung mit Fuzzy Sets müssen Pixel eine bestimmte Wahrscheinlichkeit erfüllen, um zu einer Region oder einem Segment zugeordnet zu werden. Bezogen auf die Ableitung von Baumsegmenten aus Luftbildern wird ein Ähnlichkeitsmaß ermittelt. Ist das Ähnlichkeitsmaß kleiner als ein vorgegebener Wert, wird der Pixel dem Segment zugeordnet. Die Startpunkte werden mit Hilfe des Fuzzy Schwellenwert Verfahrens nach Chi et al. (1996) bestimmt.

Beim Segmentierungsverfahren mit der Brownschen Bewegung wird die Partikelbewegung in einer Flüssigkeit simuliert. Für die Simulation der Bewegung in 2D werden zufällig verteilte 2D-Vektoren summiert. Die Lage des Partikels nach n-Schritten ist dementsprechend die Summe der ersten n-Zufallsvektoren. Von einem Startpunkt ausgehend gibt es keine Einschränkungen der Bewegung bis auf die Bildgrenzen. Die Startpunkte werden gebildet, indem gezählt wird, wie oft ein Partikel einen Pixel besucht hat. Dieses Ergebnis wird als Graustufenbild (numPass) ausgegeben. Von den gebildeten Startpunkten ausgehend und unter Berücksichtigung der numPass-Werte werden mit einem Expansions-Algorithmus die Baumsegmente bestimmt. Die Ergebnisse des Segmentierungsverfahrens der Brownschen Bewegung führen zu besseren Baumsegmenten, als die Fuzzy Set Segmentierung (Erikson 2004a: 26ff).

Da auch das Segmentierungsverfahren der Brownschen Bewegung zu Segmentfehlern führt, wurde das Random-Walk-Segmentierungsverfahren entwickelt. Dies betrifft vor allem die Trennungslinie zwischen verbundenen Objekten, welche mit dem Random Walk Verfahren verbessert wird. Dementsprechend baut das Random Walk Verfahren auf der Brownschen Bewegung auf und zielt auf eine Kontrasterhöhung in den Bereichen zwischen den aneinandergrenzenden Baumkronen (Erikson 2004a: 28ff).

Region Growing Verfahren gehören zu den besten Verfahren für die Abgrenzung von Baumsegmenten hinsichtlich Vollständigkeit und Korrektheit für multispektrale Luftbilder. Der Vorteil besteht in der Segmentierung auf der Bildebene. Der entscheidende Faktor für die Genauigkeit der Ergebnisse ist die Wahl der Startpunkte, welche sich bei Nadelwäldern mit verschiedenen Methoden einfacher bestimmen lassen, als bei Laubwäldern. Bei den Region Growing Verfahren nach Erikson werden in den verwendeten Modellen eine Reihe von Merkmalen, wie beispielsweise Form und Größe, die zu einer weiteren Verbesserung der Ergebnisse führen, nicht berücksichtigt.

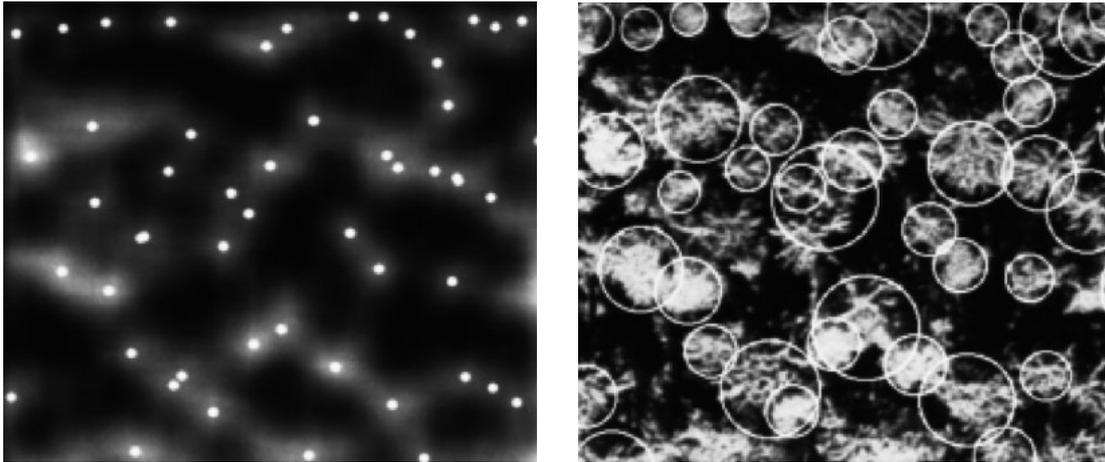
2.4.3 Blob Detection – Extraktion spektraler lokaler Maxima

Mit automatisierten Verfahren der Bildanalyse lassen sich in Bildern helle Flecken (engl. Blobs) als lokale Maxima detektieren (vgl. Lindeberg 1993, vgl. Lindeberg 1994, vgl. Lindeberg 1996, vgl. Lindeberg 1998). Dieser Effekt lässt sich auch für die Spektralkanäle in Luftbildern beobachten und für die Extraktion von Baumspitzen nutzen (vgl. Pinz 1988, vgl. Pinz 1989, vgl. Pinz 1991, vgl. Pinz 1999, vgl. Culvenor 2002, vgl. Pouliot et al. 2002).

Baumkronen erscheinen in Luftbildern heller als ihrer Umgebung. Mit Hilfe von Algorithmen zur Suche von lokalen Helligkeitsmaxima können so Bäume aus Luftbildern extrahiert werden. Die lokalen Maxima entsprechen dabei den Baumspitzen. Aufgrund der hohen Auflösung von Luftbildern werden bei der Anwendung auf den Originalbildern jedoch zu viele Maxima detektiert. Aus diesem Grund ist vor Verwendung dieser Methode eine Glättung der Originalbilder mit einem Low-Pass-Filter notwendig. Die Größe des Filters wird von der erwarteten Baumgröße bestimmt und anhand der gegebenen Auflösung berechnet. Da in einem Luftbild jedoch oft unterschiedlich große Bäume vorkommen, die mit einer Filtergröße nicht erfasst werden können, werden verschiedene Filtergrößen eingesetzt. Die Ergebnisse der verschiedenen Filtergrößen werden anschließend kombiniert und Kandidaten für Baumspitzen ausgegeben (siehe Abb. 2.25a). Dabei kann jedoch noch nicht sicher davon ausgegangen werden, dass jedes Maximum einer Baumspitze entspricht. Zur Überprüfung der Kandidaten für Baumspitzen wird von diesen ausgehend im Originalbild für jedes Maximum die radiale Helligkeitsverteilung berechnet, welche für die Bestimmung von richtigen Kandidaten genutzt wird. Innerhalb eines Radius, welcher von der Baumgröße abhängt, muss der Helligkeitswert unter einen vorgegeben Wert absinken (z.B. 50 Prozent des Helligkeitsmaximums). Die entstehenden Kreise entsprechen den Baumkronen (siehe Abb. 2.25b). Für die weitere Überprüfung der korrekten Baumstandorte wird auf ein Modellwissen über Bäume (z.B. Standort von Bäumen, Abstand zwischen Bäumen) zurückgegriffen (Pinz 1999: 129). Darauf aufbauend können neuronale Netze genutzt werden, um einzelne Baumarten zu klassifizieren (vgl. Pinz & Bischof 1990, vgl. Pinz & Bischof 1992, Pinz et al. 1993).

Brandtberg et al. (2003) verwenden die Blob Detektion für die Extraktion von entlaubten Laubbäumen auf Basis einer Saab TopEye Laserscanning Aufnahme. Grundlage ihrer Analyse ist eine 2D-Aufnahme mit der Höhen- und Helligkeitsinformation. Auch Brandtberg et al. (2003) glätten zunächst das Originalbild mit einem Gaußfilter auf verschiedenen Maßstabsebenen und berechnen darauf die verschiedenen Helligkeitsflecken für die Segmentierung der Einzelbäume.

Die Verfahren der Detektion von lokalen Helligkeitsmaxima in Luftbildern zur Ableitung von Einzelbäumen lassen sich sehr leicht umsetzen. Ihre Stärke liegt vor allem in der Berücksichtigung verschiedener Baumgrößen sowie in der hohen Genauigkeit der Extraktion der Baumspitze. Allerdings ist die Filtermaske rechteckig, was nicht der natürlichen Form von Bäumen entspricht, und die Größe des Glättungsfilters wird manuell bestimmt. Die Bestimmung des Kronenradius für den definierten Helligkeitsabfall ist darüber hinaus stark vom eingesetzten Originalbild abhängig. Die Verwendung eines Modelles zur Identifizierung falscher Maxima führt zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse. Die detektierten Maxima können sehr gut als Ausgangspunkt für weiterführende Analysen verwendet werden.



(a) Lokale Helligkeitsmaxima im geglätteten Bild (Pinz 1999: 133) (b) Bestimmung der Baumkronen (Pinz 1999: 133)

Abb. 2.25

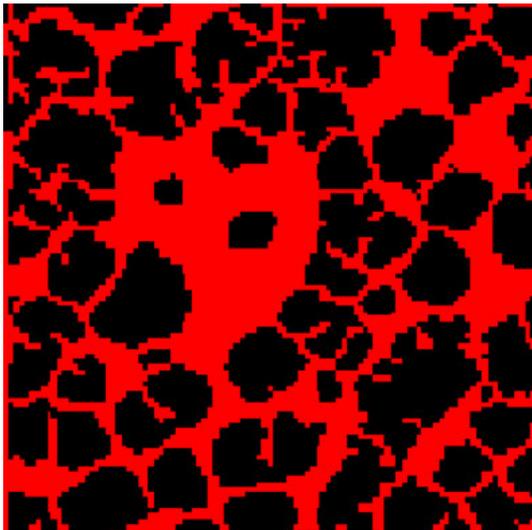
2.4.4 Valley Following Approach – Extraktion spektraler lokaler Minima

Neben den Versuchen Baumspitzen über spektrale Helligkeitsmaxima zu bestimmen wurden auch Verfahren zur Bestimmung des Baumumrisses anhand von spektralen Helligkeitsminima entwickelt (vgl. Gougeon & Moore 1988, vgl. Gougeon 1995, vgl. Gougeon 1999, vgl. Gougeon & Leckie 2001, vgl. Carson et al. 2001, vgl. Culvenor 2002, vgl. Leckie et al. 2003, vgl. Gougeon & Leckie 2003, vgl. Leckie et al. 2005, vgl. Warner et al. 2006, vgl. Gougeon 2009, vgl. Katoh & Gougeon 2012).

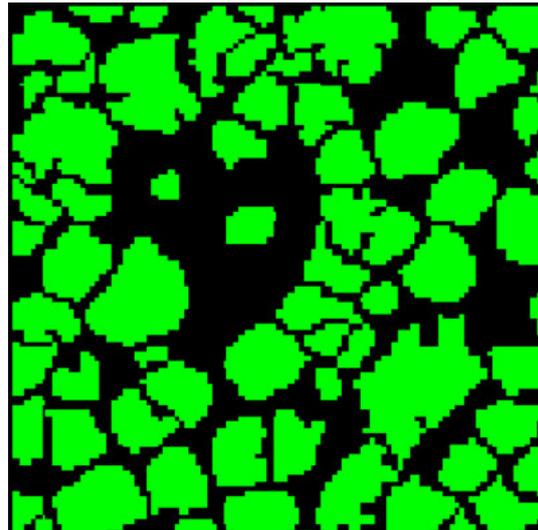
Der Valley Following Approach beruht auf der Annahme, dass die Ränder von Bäumen dunkler erscheinen und daher für die Rekonstruktion der Baumkrone genutzt werden können. Zur Umsetzung dieses Verfahrens sind zwei elementare Bearbeitungsschritte notwendig. In einem ersten Schritt erfolgt mit Hilfe eines Schwellwertes die Trennung der Baumkronen von der Hintergrundvegetation oder anderen Nichtwaldflächen. Darauf aufbauend werden alle lokalen Minima extrahiert, die den dunkelsten Bildbereichen zwischen zwei Baumkronen entsprechen. Beim Einsatz einer hydrologischen Modellierung würden diese Bereiche Tälern entsprechen, an welchen sich Wasser sammelt. Von den lokalen Minima ausgehend werden Linien innerhalb der Täler gebildet (Valley Following) bis diese ein anderes lokales Minimum oder einen Nichtwaldbereich erreichen (siehe Abb. 2.26a). In einem zweiten Schritt werden die Kronenabgrenzungen bestimmt. Dazu werden die gebildeten Liniensegmente in den Tälern mit Hilfe von vorgegebenen Regeln vervollständigt, um so eine geschlossene Umrisslinie für jeden Baum zu erzeugen (siehe Abb. 2.26b) (Gougeon 1995: 4ff).

Warner et al. (2006) nutzen in ihrem Ansatz zur Abgrenzung von Baumkronen für Mischwälder den Schatten der Baumkronen, da diese in ihrem Modell die Grenzen der Umrisse markieren. Der Schatten im Originalbild wird mit einem Rank Filter, welcher auf den grünen Kanal angewendet wird, verstärkt. Diese berücksichtigt über die Filtergröße die Größe der Baumumrisse. Die so erzeugten Linien werden mit einem Weg der geringsten Kosten-Algorithmus verbunden, um so die Baumkrone zu erzeugen.

Der Valley Following Ansatz eignet sich vor allem für homogene Nadelwaldgebiete und erfordert einen niedrigen Sonnenstand und deutliche Schatten zwischen den Bäumen. Zudem müssen komplexe Regeln zur Schließung der Liniensegmente gebildet werden, weshalb eine Übertragbarkeit auf andere Waldsituationen nur bedingt möglich ist. Dennoch kann die Grundannahme der dunkleren Baumränder in Luftbildern als allgemeingültig angenommen und für eine komplexe Modellierung eines Baumes genutzt werden.



(a) Ergebnisse des Valley Following Programm
(Gougeon 1999: 21)



(b) Ergebnisse der Baumkronenabgrenzung
(Gougeon 1999: 21)

Abb. 2.26

2.4.5 Morphologischer Ansatz

Auf Basis Digitaler Oberflächenmodelle lassen sich mit morphologischen Operationen Einzelbäume ableiten (vgl. Andersen et al. 2001). Durch den Einsatz morphologischer Algorithmen können geometrische Strukturen von Oberflächenmodellen analysiert und darauf aufbauende Einzelbäume abgeleitet werden.

Mit dem morphologischen Ansatz lassen sich die oberen Kuppen von Nadelbäumen und damit die Baumspitzen detektieren. Diese werden durch die morphologische Top-Hat Transformation mit Hilfe eines kreisförmigen Strukturelementes mit variierendem Durchmesser abgeleitet. Die Variation des strukturierenden Elementes ist notwendig, um Bäume unterschiedlicher Größe extrahieren zu können. Mit der morphologischen Öffnungsoperation werden zunächst die Kuppen der Bäume im Oberflächenmodell entfernt (siehe Abb. 2.27). Durch die Subtraktion des Ergebnisses der morphologischen Öffnungsoperation vom originalen Oberflächenmodell können die Kuppen isoliert werden, die den Baumspitzen entsprechen (siehe Abb. 2.28). Durch eine Schwellenwert-Operation werden die Ergebnisse der Top-Hat Transformation in ein binäres Bild umgewandelt. Dabei entsteht jedoch ein Rauschen, welches mit einem minimal

kleineren Strukturelement als dem für die Top-Hat Transformation verwendeten mit einer binären morphologischen Öffnungsoperation entfernt wird (Andersen et al. 2001: 15ff).

Der morphologische Ansatz eignet sich vor allem für Nadelbäume und Szenen mit homogenen Beständen hinsichtlich Baumart und Größe, da diese sehr ähnliche und deutlich ausgeprägte Kuppen in einem Oberflächenmodell bilden. Der morphologische Ansatz weist jedoch auch deutliche Schwächen auf. So muss beispielsweise die Größe des Strukturelementes für jeden Datensatz einzeln bestimmt werden, da diese nicht übertragbar ist. Auch sind die unterschiedlichen Strukturelemente nicht kombinierbar, weshalb der Ansatz bei heterogenen Beständen keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert.

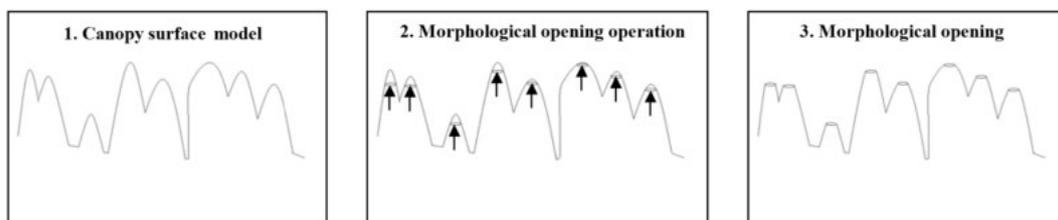


Abb. 2.27: Morphologische Öffnungsoperation (Andersen et al. 2001: 16)

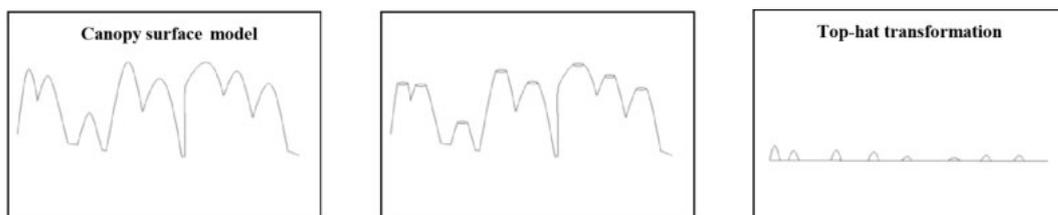


Abb. 2.28: Top-Hat Transformation (Andersen et al. 2001: 17)

2.4.6 Hill Climbing Approach – Extraktion lokaler Maxima im Oberflächenmodell

Durch die Verwendung Digitaler Oberflächenmodelle sowohl von Laser-, als auch Luftbildaufnahmen können auch über die Detektion lokaler Maxima in den Oberflächenmodellen Einzelbäume abgeleitet werden (vgl. Persson 2001, vgl. Persson et al. 2002, vgl. Holmgren & Persson 2004, vgl. Heurich et al. 2004, vgl. Tiede et al. 2005, vgl. Ke & Quackenbusch 2009, vgl. Tiede et al. 2009). Ausgehend von der Morphologie von Bäumen, welche durch eine markante Spitze eines erhöhten Objektes charakterisiert ist, lässt sich dieses Muster in Digitalen Oberflächenmodellen erkennen und für die Einzelbaumextraktion nutzen.

Der in Persson et al. (2002) vorgestellte Ansatz zur Ableitung von Baumspitzen und Baumkronen beruht auf sechs Bearbeitungsschritten:

- Erstellung eines Digitalen Oberflächenmodelles (DOM),
- Erstellung eines Digitalen Geländemodelles (DGM),

- Modellierung der Baumoberflächen und Erstellung eines Digitalen Kronenmodelles (DKM),
- Glättung des Digitalen Kronenmodelles,
- Anwendung auf verschiedenen Maßstabsebenen,
- Ableitung der Einzelbäume auf Basis der Baumhöhe und des Kronendurchmessers nach Persson (2010: 20).

Grundlage für das DOM bildet eine Saab TopEye Laserscannerbefliegung mit Auflösungen von 26 Zentimetern bis 2,08 Metern. Diese ist durch verschiedene Filterverfahren möglich (vgl. Pfeifer 2003). Das DGM wird nach Elmqvist (2000) mit aktiven Konturen abgeleitet sowie darauf aufbauend ein normalisiertes Oberflächenmodell. Zur Erzeugung des DKM wird zunächst eine Lowpass-Glättung zur Reduzierung des Rauschens durchgeführt. Über die Klassifizierung der Laserpunktwolke sowie die Betrachtung der Echos können Digitale Kronenmodelle abgeleitet werden (vgl. Kraus & Pfeifer 1998, vgl. Kraus & Rieger 1999, vgl. Rieger et al. 1999). Durch die Anwendung eines Schwellenwertes, welcher alle Pixel kleiner zwei Meter Objekthöhe entfernt, wird ein Kronenmodell abgeleitet. Auf dieses wird wiederum ein 5*5 Medianfilter zur Bereinigung der Daten angewendet (siehe Abb. 2.29), da bei der Erstellung des DOM in Baumnähe zwischen Grundpixeln und erhöhten Pixeln interpoliert wird (Persson et al. 2002: 927).

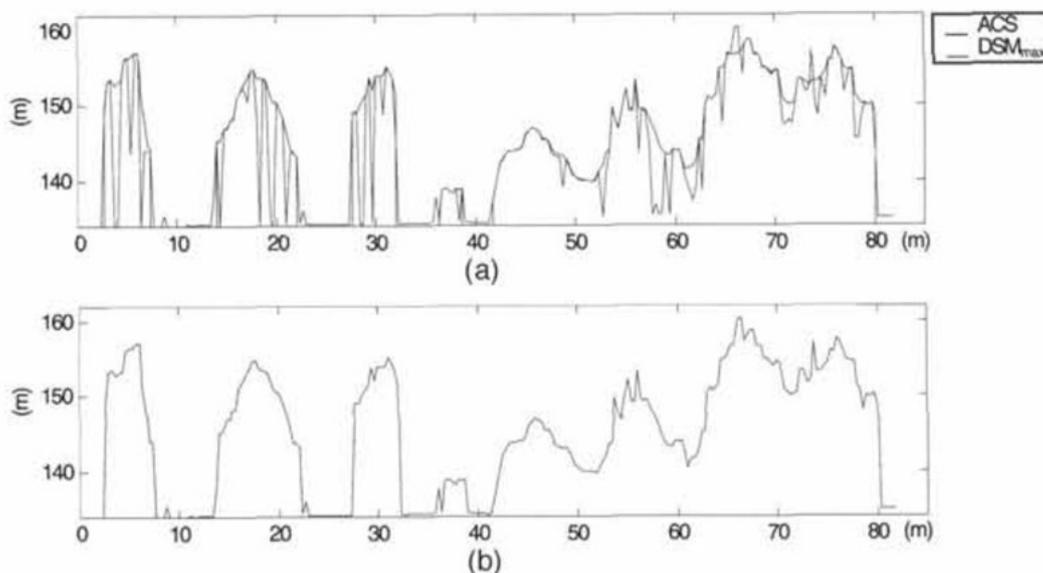


Abb. 2.29: Erstellung und Bereinigung eines Kronenmodelles (Persson et al. 2002: 928)

Damit jeder Baum möglichst nur ein Höhenmaximum besitzt, wird das DKM mit einem Gaußfilter geglättet. Dabei werden drei Filtergrößen eingesetzt, um zu erreichen, dass bei der größten Filterung jeder Baum maximal ein Maximum aufweist und dass bei der feinsten Filterung jeder Baum mindestens ein Maximum aufweist. Darauf aufbauend werden die Baumspitzen bestimmt. Zur Bestimmung der lokalen Maxima im DKM werden alle Pixel mit einer Höhe von zwei Meter als Initiale Startpixel für den lokal Maximum Algorithmus

verwendet. Von den kleinsten Pixeln ausgehend wird jeder Nachbarpixel betrachtet und die höchste Steigung berechnet, an welchen die Pixel aufsteigen, bis das Maximum erreicht ist (hill climbing). Die Kronenfläche wird berechnet, indem alle Pixel, die zum selben Pixel aufsteigen, zu einem Segment zusammengefasst werden. Dieser Prozess wird auf allen drei Maßstabsebenen durchgeführt. Zur Entscheidung des optimalen Maßstabes für jeden Baum bzw. jeden Bereich des Bildes werden die höchsten Punkte eines Segmentes (30%) durch eine parabolische Oberfläche angepasst. Dabei können zwei Fälle auftreten:

- Besitzt ein Segment der gröberen Maßstabsebene in der feineren Maßstabsebene nur ein Maximum, wird die Baumhypothese als verifiziert angenommen.
- Besitzt ein Segment der gröberen Maßstabsebene in der feineren Maßstabsebene mehrere Maxima, muss überprüft werden, ob in der feineren Maßstabsebene der Baum durch mehrere Maxima charakterisiert ist oder es sich um mehrere Einzelbäume handelt. Die Entscheidung erfolgt über eine Anpassung der parabolischen Fläche. Liegt die Summe der Residuen auf der feineren Ebene signifikant unter der der gröberen Ebene, wird ein zusätzlicher Baum angenommen. Auf diese Weise werden alle drei Maßstabsebenen mit einander verglichen (Persson et al. 2002: 927).

Tiede et al. (2009) stellen einen Ansatz zur Extraktion lokaler Maxima auf Basis von photogrammetrisch abgeleiteten normalisierten Digitalen Oberflächenmodellen (nDOM) vor. Sie nutzen für ihre Auswertung den Cognition Network Language Algorithmus (CNL) mit den entsprechenden Anpassungen für die Ableitung von Einzelbäumen. Dabei werden von einem lokalen Maximum ausgehend auf Grundlage der eingehenden Höhenwerte des nDOM Höhenwertänderungen abgegrenzt. Dieser Algorithmus zeigt dabei seine Stärken in der Extraktion von hohen Waldbeständen ab 20 Meter mittlerer Bestandshöhe.

Der Ansatz des Hill Climbing eignet sich gut für ältere Nadelbaumbestände, da diese charakteristische Maxima im Oberflächenmodell ausbilden. Die größten Stärken des Ansatzes liegen in der Berücksichtigung mehrerer Maßstabsebenen und in der Bewertung der Ergebnisse in Bezug auf die verschiedenen Maßstabsebenen. Von Interesse ist vor allem auch die systematische Untersuchung der verschiedenen Auflösungen des Oberflächenmodelles. Nach Persson et al. (2001: 929) haben die unterschiedlichen Auflösungen des Laseroberflächenmodelles nur einen geringen Einfluss auf das Extraktionsergebnis.

2.4.7 Kantendetektion

Die Detektion von Kanten wird in der Objektrekonstruktion und Objektextraktion seit längerer Zeit mit Erfolg eingesetzt (vgl. Marr & Hildreth 1980). Auch in der Extraktion von Einzelbäumen wird auf die Detektion von Kanten zur Bestimmung von Baumkronen zurückgegriffen (vgl. Brandtberg & Walter 1998, vgl. Brandtberg & Walter 1999, vgl. Borgfors et al. 1999).

Brandtberg & Walter (1998, 1999) gehen in ihrem Modell davon aus, dass eine Baumkrone einen überwiegend kreisförmigen Grundriss besitzt und verwenden für ihre Analyse daher ein mit 10 cm Bodenaufösung hochaufgelöstes Farbinfrarotbild (CIR) eines Mischwaldbestandes in Schweden. Ihrer Analyse ist dabei auf mehreren einzelnen Verarbeitungsschritten aufgebaut. Der erste Schritt ist die Glättung des CIR-Bildes zur Abrundung der Umrisse jedes Einzelbaumes sowie zur Fusion von Umrissbereichen, die nahe beieinander liegen. Darüber hinaus werden mit der Glättung alle Umrisskanten identifiziert, die eindeutig zu einem Baum gehören. Um Baumkronen unterschiedlicher Form und Größe identifizieren zu können, erfolgt die Glättung auf verschiedenen Maßstabsebenen (Brandtberg & Walter 1998: 65).

Für die Kantendetektion wird die non-maximum suppression nach Canny (1986) verwendet. Kanten, die eine Baumkrone abgrenzen, werden mit Hilfe des differential geometric approach nach Lindeberg (1994) bestimmt, so wird für jeden Kantenpixel die Krümmung berechnet (siehe Abb. 2.30). Kantenpixel mit einer konvexen Krümmung werden zu Kanten zusammengefasst und für jede Kante wird der Radius berechnet. Die Krümmungsmittelpunkte entsprechen dabei den Baumspitzen. Zur Berücksichtigung der verschiedenen Maßstabsebenen werden alle Krümmungsmittelpunkte der verschiedenen Ebenen zusammen betrachtet und die lokalen Maxima der Krümmungsmittelpunkte als Baumspitzen ausgegeben. Diese werden genutzt, um mit einem Region Growing-Verfahren, welches verschiedene Schwellenwerte einbezieht, die Baumumrisse zu bestimmen (Brandtberg & Walter 1998: 66ff).



Abb. 2.30: Baumkronenkanten mit berechneter Krümmung (Graustufen) (Brandtberg & Walter 1998: 67)

Kantenbasierte Ansätze bieten eine gute Grundlage für die Bestimmung von Teilbereichen des Baumumrisses für Laub- und Nadelbäume für verschiedenste Datensätze. Die Berücksichtigung verschiedener Maßstabsebenen sowie die umfassende Modellierung der Baumkrone bilden dabei die größte Stärke des Ansatzes. Kritisch betrachtet werden muss jedoch die verwendete Segmentierung zur Abgrenzung der gesamten Baumkrone.

2.4.8 Wasserscheidenverfahren und Senkenanalyse

In der Bildanalyse werden zur Objektabgrenzung bereits seit längerer Zeit sogenannte Wasserscheidenverfahren eingesetzt (vgl. Beucher 1982, vgl. Soille & Vincent 1990, vgl. Vincent & Soille 1991, vgl. Roerdink & Meijster 2001, vgl. Chen et al. 2004, vgl. Tarabalka et al. 2010). Diese Verfahren werden auch erfolgreich zur Identifikation und Abgrenzung von Einzelbäumen aus Fernerkundungsdaten eingesetzt (vgl. Hyypä & Inkinen 1999, vgl. Ziegler et al. 2001, vgl. Schardt et al. 2002, vgl. Straub 2003b, vgl. Fuchs 2003, vgl. Pouliot et al. 2005, vgl. Hyypä et al. 2005, vgl. Heurich 2006, vgl. Kaartinen et al. 2008, vgl. Tompalski et al. 2009, vgl. Reitberger 2010, vgl. Vastaranta et al. 2011, vgl. Heinzl 2011, vgl. Heinzl et al. 2011, vgl. Saarinen et al. 2014).

Wasserscheidenverfahren nutzen für die Analyse Grauwertunterschiede für die Erstellung einer Höheninformation. Dabei wird die betrachtete Szene im Sinne einer hydrologischen Modellierung in Wassereinzugsgebiete unterteilt. Während der Modellierung wird die gesamte Szene allmählich mit Wasser geflutet. Ausgehend von den lokalen Minima bilden sich Seen. An den Bereichen, wo sich zwei Wassergrenzen berühren befindet sich die Wasserscheide. Damit die gesamte Szene modelliert werden kann, wird an den Wasserscheiden ein Damm errichtet und die Szene weiter geflutet, bis sie komplett geflutet ist (siehe Abb. 2.31). Das Ergebnis sind Segmentgrenzen, die an den lokalen Grauwertmaxima verlaufen (Reitberger 2010: 29).

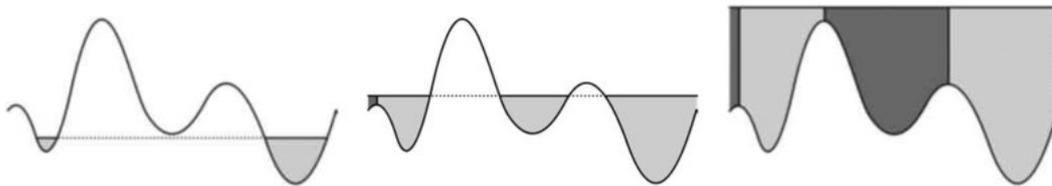


Abb. 2.31: Identifizierung von Wasserscheiden und Errichtung von Dämmen (Reitberger 2010: 30)

Da für die Extraktion von Baumkronen jedoch die lokalen Minima, sowohl bei der Verwendung von Spektralinformationen, als auch in Oberflächenmodellen für die Abgrenzung der Segmente von Bedeutung sind, müssen die Eingangsdaten zuvor invertiert werden. Das Ergebnis der Wasserscheidentransformation auf den invertierten Eingangsdaten sind Segmente, die möglichst den realen Baumgrenzen entsprechen.

Die Senken- und Senkensohlenanalyse ist dem Wasserscheidenverfahren ähnlich und wird auf digitalen Oberflächenmodellen angewendet. Mit diesem Verfahren können Baumsegmente und Baumspitzen abgeleitet werden (vgl. Bayer et al. 2013). Die beiden Verfahren führen vor allem in Nadelwaldgebieten zu hohen Genauigkeiten. Ausgangspunkt der Analyse ist eine Invertierung des DOM. Darauf aufbauend wird für jeden Pixel die Fließrichtung zum nächsten Nachbapixel mit der größten Neigung berechnet. Im Zuge einer hydrologischen Modellierung wird das DOM geflutet und die Wassersenken werden berechnet. Durch eine

Verschneidung mit einer Waldmaske können so kantengenau Einzelbaumsegmente abgeleitet werden. Durch die Berechnung der Senkensohle, welche den lokalen Maxima im Originalbild entspricht, können darüber hinaus die Baumspitzen extrahiert werden (siehe Abb. 2.32).

Sowohl die Wasserscheidentransformation als auch die Senkenanalyse eignen sich sehr gut zur Bestimmung von Nadelbäumen auf Basis von digitalen Oberflächenmodellen. Durch eine Kombination mit zusätzlichen Informationen, wie lokalen Maxima oder Waldmasken, lässt sich die Extraktionsgenauigkeit weiter steigern. Allerdings zeigen auch die Wasserscheidenverfahren Schwächen. Vor allem bei heterogenen Beständen mit großen Höhenunterschieden kommt es häufig zu Über- und Untersegmentierungen (Kwak et al. 2007, Heinzl 2011: 55).

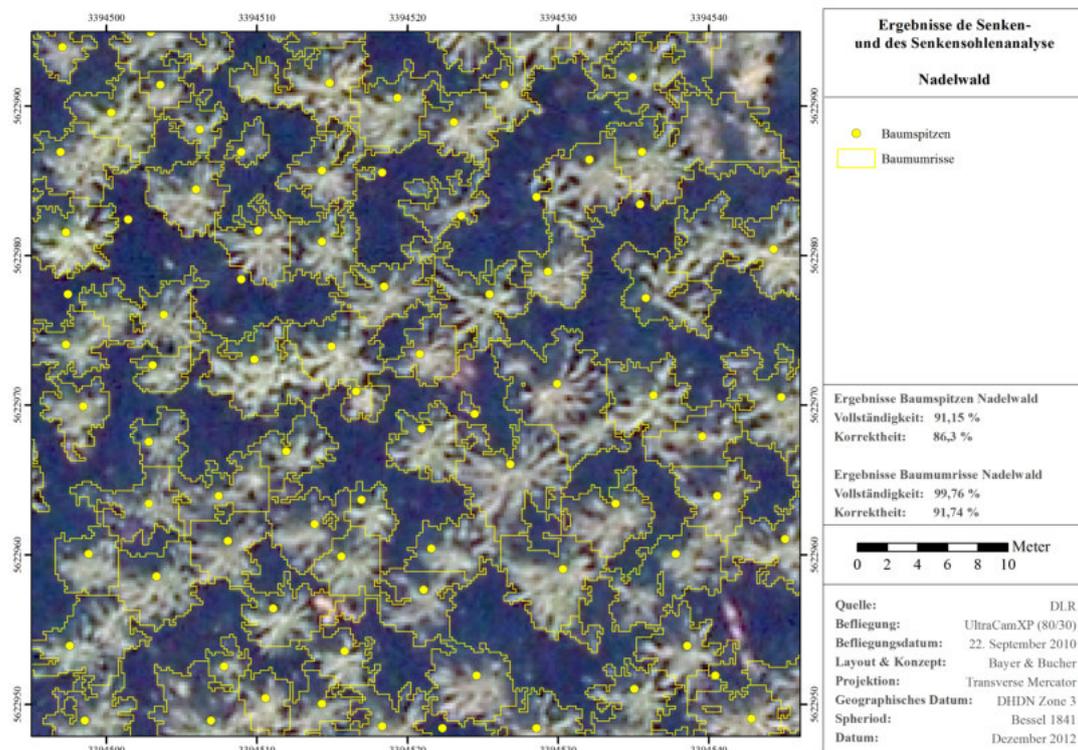


Abb. 2.32: Senken und Senkensohlenanalyse für Nadelwälder (Bayer et al. 2013: 33)

2.4.9 Volumetrische Baumerkennung

Ein Großteil der bisher entwickelten Algorithmen zur Ableitung von Einzelbäumen nutzt lediglich 2D und 2.5D-Informationen aus Spektral- und Höhendaten. Die dreidimensionale Betrachtung, welche zusätzliche Modellinformationen ermöglicht, wird in vielen Verfahren nicht berücksichtigt. Die Volumetrische Baumerkennung (vgl. Bücken & Rossmann 2010, vgl. Bücken & Rossmann 2013, vgl. Bücken 2014) ist ein Ansatz, der auch das Volumen der Baumsegmente in die Analyse miteinschließt.

Der erste Schritt der Volumetrischen Baumerkennung ist die Zuordnung der lokalen Maxima zu einem Baumindividuum. Betrachtet man beispielsweise zwei nahe beieinanderliegende lokale Maxima, so ist bei der ausschließlichen Betrachtung des Bereiches, der aus dem Oberflä-

chenmodell herausragt, eine Zuordnung, ob es sich um einen Baum mit einem Nebenmaximum oder um zwei Bäume handelt, nur schwer möglich. Daher wird das Basal-Volumen in die Zuordnung mit einbezogen. Dieses kann zwischen beiden Maxima verteilt werden oder in vollem Umfang dem höheren Maximum zugeschlagen werden. Eine Aufteilung des Basal-Volumens ermöglicht einerseits die Trennung ineinander verwachsener Baumkronen, jedoch werden damit große Nebenmaxima auch als Einzelbaum erkannt. Daher wird in der Volumetrischen Baumerkennung das Basal-Volumen dem höchsten Maximum zugeordnet. Bei mehreren Maxima, die einem Baumkandidaten zugeordnet werden, erfolgt die Zuordnungsentscheidung über das Volumen, welches wie folgt berechnet wird (siehe Abb. 2.33):

$$\text{Volumen} = c * \text{Grundfläche} * \text{Höhe}$$

Die Vorabsegmentierung der Baumkandidaten erfolgt mit der Wasserscheidentransformation. Durch eine Flutung mit Wasser können so Schritt für Schritt die Spitze bestimmt werden, auf welcher die höchste Wassersäule lastet. Das Ergebnis dieser Modellierung ist eine eindeutige und im Gegensatz zu anderen Algorithmen deutlichere Bestimmung des dominanten Maximums.

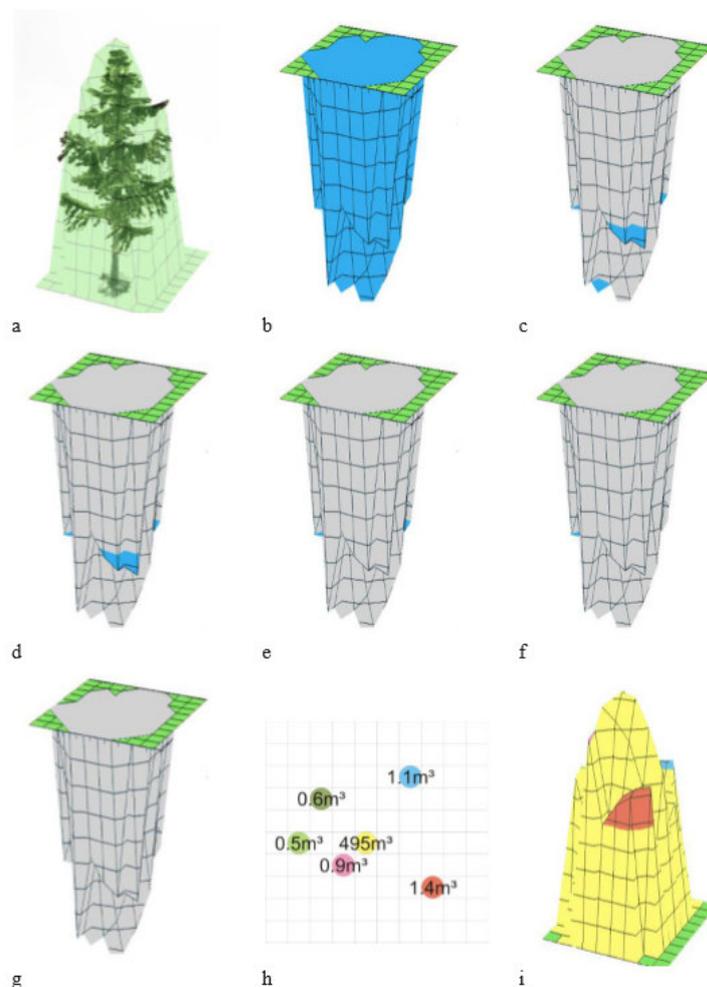


Abb. 2.33: Ablauf der Volumetrischen Baumerkennung (Bücken 2014: 62)

2.4.10 NATSCAN Verfahren

Das Verfahren wurde im Rahmen des Projektes NATSCAN entwickelt und greift für die Ableitung von Einzelbäumen auf Laser- und Multispektraldaten sowie GIS-Informationen zurück (vgl. Diedershagen et al. 2003a, vgl. Diedershagen et al. 2003b, vgl. Diedershagen et al. 2004).

In einem ersten Schritt wird ein normalisiertes Oberflächenmodell (nDSM) erstellt. Durch die Unterscheidung der Baumhöhen werden Alt- und Jungbestände getrennt. Auf den abgeleiteten Beständen wird ein Gaußfilter angewendet, wobei die Altbestände stark gefiltert werden und die Jungbestände geringer. Basierend auf dem Pouring-Algorithmus, der den Wasserscheidenverfahren ähnlich ist, erfolgt die Ableitung der Baumspitzen und Baumkronen. Dafür werden zunächst die lokalen Maxima und von diesen bergab der Talboden bestimmt. Zur Bereinigung falscher und zu großer Segmente werden unterschiedliche Nachbearbeitungsschritte durchgeführt. Dazu gehören beispielsweise unterschiedliche Formparameter, Nachbarschaftsbeziehungen oder der Einsatz des Ray-Algorithmus, was die Form der Segmente verbessert und Nichtbaumbereiche entfernt (Diedershagen et al. 2003: 6ff).

Das NATSCAN Verfahren kann auch bei komplexen Beständen noch gute Baumsegmente liefern. Allerdings muss die Filtergröße manuell gewählt und jeweils angepasst werden und es sind sehr viele unterschiedliche Nachbearbeitungsschritte notwendig, was eine Übertragbarkeit erschwert.

2.4.11 Marble-Rolling Verfahren

Ein weiteres Verfahren zur Ableitung stellt die jüngst veröffentlichte Arbeit von Miri (2016) vor. Dieses Verfahren verwendet ausschließlich Digitale Oberflächenmodelle aus LIDAR-Befliegungen und photogrammetrisch abgeleitete DOM aus Luftbildbefliegungen und verzichtet auf die Verwendung der Spektralinformationen und Intensitätswerte. Grundlage der Arbeit ist die Analyse der Oberfläche für die anschließende Merkmalsextraktion. Dafür wird das Konzept der Eye-Fingers entwickelt, welches den menschlichen Tastsinn simuliert und für die Bildverarbeitung nutzbar macht. Zur Verbesserung des Verfahrens wird ein Non-Smoothing-Filter verwendet, welcher das Oberflächenrauschen minimiert.

Für die Einzelbaumextraktion wurde darauf aufbauend das Marble-Rolling-Verfahren entwickelt. Dieses Verfahren ermöglicht die Ableitung von Seed-Objects, welche der Ausgangspunkt für ein Region Growing-Verfahren sind. Für die Bestimmung der Baumkronen wurden dabei ausschließlich geometrische und morphologische Merkmale verwendet.

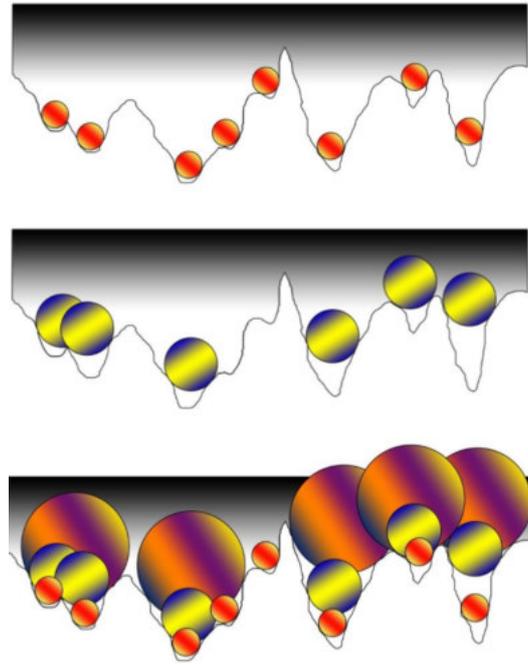


Abb. 2.34: Konzept der rollenden Kugel für die Ableitung von Einzelbäumen (Miri 2016: 78)

2.4.12 Weiterführende und vergleichende Ansätze zur Einzelbaumextraktion

Über die bereits beschriebenen Ansätze zur Einzelbaumextraktion hinaus wurden weltweit in den vergangenen 25 Jahren noch eine Vielzahl weiterer Ansätze entwickelt. Straub (2002) beschreibt in seinem Ansatz auf Basis hochauflösender Luftbilder die Textureigenschaften von Bäumen, um aufgrund von Texturinformationen Objektklassen unterscheiden zu können. Textureigenschaften können dabei genutzt werden, um Bäume von anderen Klassen zu trennen.

Mustafic et al. (2014) stellen in ihrer Veröffentlichung einen Ansatz zur Extraktion von Einzelbäumen vor, in welchem die Höheninformationen des eingesetzten nDOM in Ebenen gleicher Höhe untergliedert (Ebenenschnitte) wird. Bei diesem Ansatz entstehen auf jeder Höhenebene Polygone, welche anschließend zu Einzelbäumen zusammengefasst werden. Dabei wird kein Modell zur Beschreibung der Kronenform verwendet, da die Kronenform ohne Vorwissen direkt aus dem nDOM abgeleitet wird.

Gonzales (2011) entwickelt zur Einzelbaumableitung in tropischen Regenwäldern ein Regionenwachstumsverfahren auf verschiedenen Maßstabsebenen, das mit der Baumabgrenzung in der Maßstabsebene mit der geringsten Auflösung beginnt und schrittweise die Auflösung erhöht. Dabei werden für jede Maßstabsebene drei Bearbeitungsschritte durchgeführt. Zunächst erfolgt eine Glättung des Digitalen Kronenmodelles (DKM) mit einem Gaußfilter. Dem schließt sich eine Ableitung eines Minima-Netzes auf Basis des DKM an. In einem dritten Schritt werden die lokalen Maxima von Basis des DKM berechnet.

Friedlander (2002) beschreibt einen Ansatz, der dem Wasserscheidenverfahren ähnlich ist, in dem jedoch die Ableitung der Baumkronen einzelbaumweise und vektoriell erfolgt. Nach einer Filterung des Datensatzes werden zunächst die lokalen Maxima als Startpunkte für die baumweise Extraktion bestimmt. Von diesen Startpunkten werden 16 Vektoren im Abstand von 25 gon gebildet, bis diese eine von drei Bedingungen erfüllen. Dazu gehören das Erreichen einer Nachbarschaftskrone, das Erreichen des Endes bzw. einer Lücke des Kronendaches sowie das Erreichen einer definierten Barriere. In einem letzten Schritt werden die Enden der 16 Vektoren zu einem geschlossenen Polygon verbunden.

Darüber hinaus wurden in der Vergangenheit eine Reihe von vergleichenden Analysen hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeiten der verschiedensten Algorithmen durchgeführt (vgl. Hyypä et al. 2001, vgl. Straub 2003a, vgl. Pitkänen et al. 2004, vgl. Hyypä et al. 2004, Garcia et al. 2007, vgl. Koch et al. 2009, vgl. Larsen et al. 2011, vgl. Vauhkonen et al. 2012, vgl. Bücken 2014). Daher wird im Rahmen der Arbeit auf einen Anwendungsvergleich der Algorithmen verzichtet und auf die zuvor genannte Literatur verwiesen.

3 Methodische Vorüberlegungen und Untersuchungsgebiete

Im Rahmen der Arbeit wird eine Reihe unterschiedlicher Methoden verwendet, die im folgenden Kapitel beschrieben werden sollen. Wie in vielen Ansätzen zur Extraktion von Einzelbäumen werden auch in dieser Arbeit die Eingangsdaten mit einer Filterung vorverarbeitet. Dabei wird eine Filtermethode verwendet, die bisher noch nicht für die Einzelbaumextraktion verwendet wurde. Diese wird in Kapitel 3.1 näher beschrieben. Die empirischen Untersuchungen der Arbeit sind entsprechend der Zielsetzung und Themenstellung zweigeteilt. In Kapitel 3.2 wird die statistische Auswertung der Qualitätsanalyse der Digitalen Oberflächenmodelle erläutert, in Kapitel 3.3 werden die einzelnen Schritte der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode zur Einzelbaumextraktion vorgestellt. Kapitel 3.4 beschreibt das Vorgehen hinsichtlich der Genauigkeitsanalyse. In Kapitel 3.5 werden die Untersuchungsgebiete sowie die verwendeten Kamerasysteme vorgestellt.

3.1 Datenvorverarbeitung

Ein Großteil der Arbeiten zur Extraktion von Einzelbäumen aus Fernerkundungsdaten verwendet vor der eigentlichen Extraktion einen Filter, um damit die Extraktionsergebnisse überhaupt zu ermöglichen bzw. zu verbessern. Low-Pass-Filter und Gaußfilter werden dabei am häufigsten verwendet. Gaußfilter werden dabei zur Glättung bzw. zum Weichzeichnen des Originalbildes verwendet, um damit das Bildrauschen zu verhindern. Dabei werden kleinere Strukturen im Bild geglättet, während größere Strukturen erhalten bleiben. Allerdings werden dabei, wie auch bei Low-Pass-Filtern, die Objektkanten mit weichgezeichnet.

Für die Extraktion von Baumkronen ist es jedoch von Bedeutung, dass die Objektkanten erhalten bleiben. Daher wird im Rahmen der Arbeit ein Bilateral-Filter nach Tomasi & Manduchi (1998) verwendet. Ein Bilateral-Filter ist ein nichtlinearer Filter, der wie ein Gaußfilter oder Low-Pass-Filter das Bild weichzeichnet, jedoch gleichzeitig die Objektkanten erhält (Paris et al. 2008: 1). Erste Ansätze für Bilateral-Filter wurden Mitte der 1990er Jahre von Aurich & Weule (1995) sowie Smith & Brandy (1995, 1997) entwickelt. Seitdem wurden verschiedene Abwandlungen des Bilateral-Filters entwickelt (vgl. Weiss 2006, vgl. Chaudhury et al. 2011, vgl. Chaudhury 2015, vgl. Chaudhury & Rithwik 2015) und immer häufiger in der Bildanalyse eingesetzt.

Neben dem Erhalt der Objektkanten hat der Einsatz eines Bilateral-Filters noch eine Reihe weiterer Vorteile:

- die einfache Formulierung bzw. Umsetzung, da jeder Pixel durch den gewichteten Durchschnitt seiner Nachbarn ersetzt wird,
- die Abhängigkeit von lediglich zwei Parametern: Größe und Kontrast,
- eine nicht interaktive Methode, was die Parametersetzung vereinfacht da ihr Effekt nicht kumuliert wird,
- die schnelle Berechnung auch von großen Eingangsbildern (Paris et al. 2008: 2f),
- die Möglichkeit, Graustufen- oder Farbbildern als Gesamtbild zu verwenden, basierend auf ihrer geometrischen Nähe und photometrischen Ähnlichkeit,
- eine der menschlichen Wahrnehmung nachempfundene Farbglättung und der Kantenerhalt,
- es werden keine Phantomfarben an den Objektkanten in Farbbildern erstellt und Phantomfarben im Originalbild werden reduziert (Tomasi & Manduchi 1998: 1).

Als Lösung für das Problem des Weichzeichnens von Bildern ohne Berücksichtigung der Objektkanten schlagen Tomasi & Manduchi (1998: 2) eine Kombination von Domain- und Range-Filter vor, um die geometrische und photometrische Lokalität durchsetzen zu können. Die Filterkombination lässt sich mathematisch wie folgt ausdrücken:

$$h(x) = k^{-1}(x) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi$$

Diese Funktion gibt einen Pixelwert x aus, der dem Durchschnitt der in der Nähe gelegenen und ähnlichen Pixel entspricht. In glatten Regionen sind die Werte der einzelnen Pixel sehr ähnlich zu denen der Nachbarn. In diesen Regionen funktioniert der Bilateral-Filter wie ein Domain-Filter. Bei scharfen Grenzen zwischen hellen und dunklen Regionen (siehe Abb. 3.1a) ist der Bilateral-Filter ausgeglichen. Das bedeutet, für einen Pixel auf der hellen Seite der Grenze nimmt die Ähnlichkeitsfunktion s Werte an, die nahe eins den Pixeln auf der hellen Seite sind und nahe null zu den Pixeln auf der dunklen Seite sind (siehe Abb. 3.1b). Als Ergebnis dieser Funktion ersetzt der Filter die hellen Pixel im Zentrum mit dem Durchschnitt der hellen Pixel in ihrer Nähe und ignoriert die dunklen Pixel. Das entsprechende Prinzip wirkt auf der dunklen Seite. Das Ergebnis führt wiederum dazu, dass die Grenzen und damit die Objektkanten erhalten bleiben (siehe Abb. 3.1c) (Tomasi & Manduchi 1998: 2).

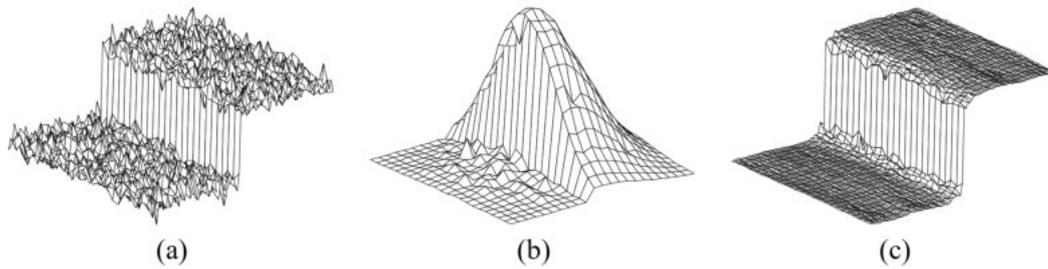


Abb. 3.1: Funktionsweise des Bilateral-Filters (Tomasi & Manduchi 1998: 3)

Dieses Vorgehen funktioniert dabei für Graustufenbilder, wie beispielsweise Digitale Oberflächenmodelle (DOM), und auch für Farbbilder. Im Rahmen der Arbeit werden mit dem Bilateral-Filter vor allem die verwendeten DOM kantenerhaltend geglättet. Die Ergebnisse des Bilateral-Filters werden in Kap. 4.3 dargestellt.

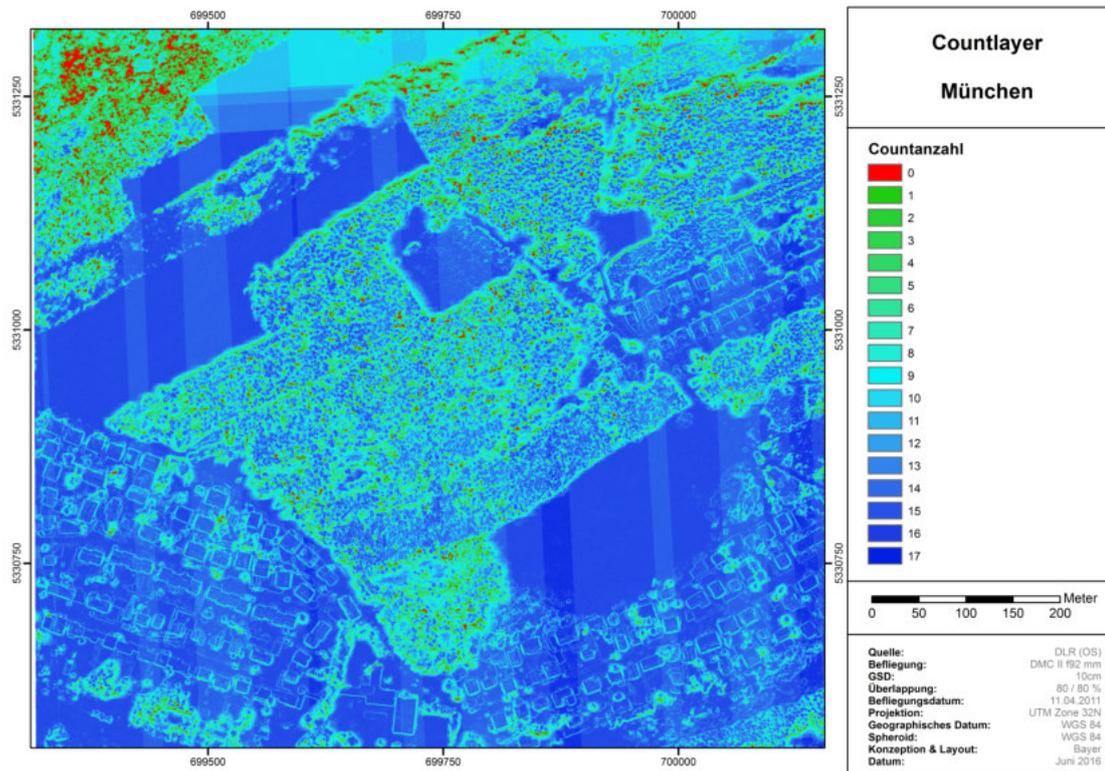
3.2 Qualitätsanalyse der Digitalen Oberflächenmodelle

Zur Beurteilung der Datenqualität der Digitalen Oberflächenmodelle werden die zwei Parameter Anzahl der Matchings pro Pixel und der Einschneidewinkel am Bildmittelpunkt herangezogen.

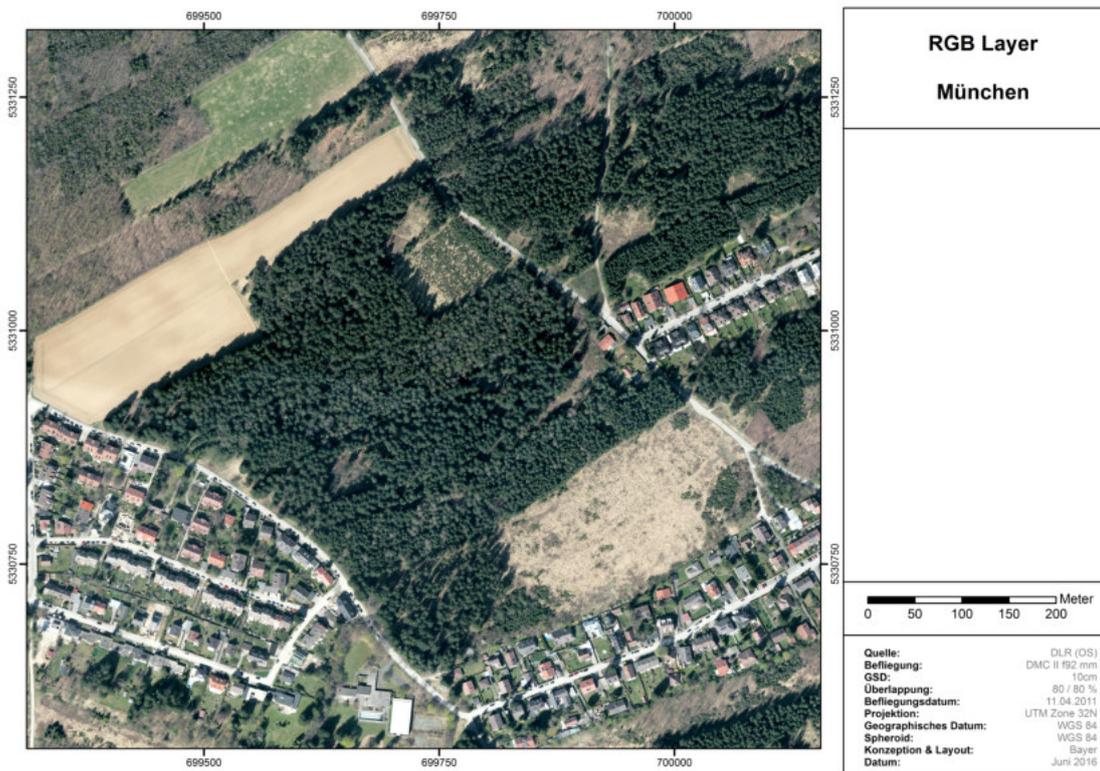
3.2.1 Auswertung der Matchings pro Pixel

Die Qualitätsanalyse der originalen und ungefilterten Digitalen Oberflächenmodelle erfolgt anhand der Annahme, dass die Zuverlässigkeit eines jeden gemessenen Pixels im Oberflächenmodell mit der Anzahl der Matchings pro Pixel zunimmt. Das Matching pro Pixel gibt an, in wie vielen Einzelbildern der jeweilige Pixel gesehen und für die Ableitung des Digitalen Oberflächenmodelles verwendet wurde. Zur Beurteilung der Datenqualität wird dementsprechend die Anzahl der Matchings für jedes erstellte Digitale Oberflächenmodell gemessen und statistisch ausgewertet. Die Anzahl der Matchings pro Pixel wird in einem Countlayer (siehe Abb. 3.2a) ausgegeben. Dieser Layer entspricht einem georeferenziertem 2D-Graustufenbild, bei dem die Pixelwerten der Anzahl der Matchings entsprechen. Dies ermöglicht neben einer deskriptiven statistischen Auswertung auch eine räumliche Auswertung der Einflüsse der Flugparameter auf die Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen. Mit Hilfe des Countlayers können sehr gut die Einflüsse der Längs- und Querüberlappung (siehe Kap. 4.1.3) analysiert werden. Bei Betrachtung des Countlayers von München ist sehr gut der Einfluss der Überlappung in Längs- und in Querrichtung erkennbar. So nimmt im nördlichen Bereich von Abbildung 3.2a die Countanzahl aufgrund der fehlenden Querüberlappung ab. Auch sind in Längsrichtung die tatsächlichen Bildüberlappungen, wie sie für die Prozessierung des Digitalen Oberflächenmodelles verwendet wurden, anhand der Countanzahl auswertbar. Weiterhin lassen sich durch die Verwendung des Countlayers bereits grobe Landnutzungsklassen anhand ihres Countwertes unterscheiden. So wird auf ebenen Flächen, wie Wiesen oder Feldern, ein nahezu vollständiger und damit sehr hoher Countwert erreicht, während es in Waldgebieten zu einer deutlichen Verringerung der Countwerte kommt. Die Gründe für den Abfall der Countwerte in Waldgebieten werden in Kapitel 4 ausführlich dargestellt. Zur besseren visuellen Unterscheidbarkeit der Landnutzungsklassen sei auf die RGB-Darstellung des Gebietes (siehe Abb. 3.2b) verwiesen.

Neben den bereits genannten Anwendungen des Countlayers, lassen sich darüber hinaus sehr gut sichttote Räume identifizieren, welche durch Verdeckungen von erhöhten Objekten entstehen. Betrachtet man Abbildung 3.2a, so sind an den Hauskanten die Verdeckungen bzw. sichttoten Räume der einzelnen Bildpaare durch eine deutliche Reduzierung der Anzahl der Counts erkennbar. Im Waldbereich sind an einigen Stellen die Verdeckungen so groß, dass es zu Bereichen kommt, in denen kein Matching mehr möglich ist und dementsprechend ein Count von Null erreicht wird.



(a) Countlayer München



(b) RGB Layer München

Abb. 3.2

Da die Anzahl der maximal möglichen Matchings von der jeweiligen Überlappung der Einzelbilder abhängig ist, wurde für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Befliegungen und Prozessierungen die Anzahl der tatsächlichen Matchings mit der Anzahl der maximal möglichen Matchings normalisiert. Zur Berechnung der maximal möglichen Matchings wurden zunächst die Footprints (Bildausdehnung am Boden) aller Einzelbilder lage- und winkelgetreu erstellt. Die Footprints der für die Prozessierung des Oberflächenmodelles verwendeten Einzelbilder wurden anschließend in einem GIS-Modell (siehe Anhang 1) mit dem Countlayer verschnitten und statistisch ausgewertet. Das GIS-Modell wurde mit der Software ArcGIS 10.3 erstellt. Dabei wurden folgenden Statistiken ausgegeben:

- Anzahl der Matchings (Counts) im Untersuchungsgebiet,
- Anzahl der Matchings (Counts) innerhalb der Baummaske,
- Verhältnis von maximal möglichem Matching zu erreichtem Matching im Untersuchungsgebiet,
- Verhältnis von maximal möglichem Matching zu erreichtem Matching innerhalb der Baummaske,
- Spannbreite zwischen maximal möglichem Matching zu erreichtem Matching im Untersuchungsgebiet,
- Standardabweichung zwischen maximal möglichem Matching zu erreichtem Matching im Untersuchungsgebiet.

Um die Qualität des Matchings in Baumbereichen besser beurteilen zu können, wurde zusätzlich eine auf den Kontrolldaten und Kartierungen basierende Baummaske erstellt und die Statistiken innerhalb der Baummaske berechnet und ausgewertet.

Die Anzahl der maximal möglichen Matchings wurde über die Bildabgrenzung der Einzelbilder am Boden berechnet. Für jedes Einzelbild werden während der Bildaufnahme sowie während der Aerotriangulation die Position der Bildmitte, die Flughöhen sowie der Rollwinkel, der Anstiegswinkel und der Kurswinkel (siehe Kap. 2.2.3) gespeichert. Darüber hinaus sind für jedes Kamerasystem die Pixelanzahl in Flugrichtung und quer zur Flugrichtung sowie der Pixelabstand, die Brennweite und die maximalen Öffnungswinkel bekannt. Anhand dieser Daten kann für jedes Einzelbild der Footprint am Boden berechnet werden. Der Footprint jedes Einzelbildes wird dabei nicht auf eine Ebene projiziert sondern auf ein SRTM Geländemodell. Dies ermöglicht eine sehr genaue Berechnung des Footprints, wie sie auch bei der Prozessierung der Digitalen Geländemodelle verwendet werden. Für die Berechnung der Statistiken, werden für jedes DOM die verwendeten Footprints als Input Features verwendet. Die Berechnung erfolgt mit einem GIS-Modell, welches in Anhang 1 dargestellt ist.

Das Verhältnis (V) von maximal möglichem Matching zu erreichtem Matching wurde wie folgt berechnet:

$$V = \frac{\text{erreichte Matchinganzahl (Count)}}{\text{maximal mögliche Matchinganzahl}}$$

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde das Verhältnis von maximal möglichem Matching zu erreichtem Matching in folgende 11 Klassen eingeteilt:

Klasse	V in Prozent
0%	0
10%	0,1 - 10
20%	10,1 - 20
30%	20,1 - 30
40%	30,1 - 40
50%	40,1 - 50
60%	50,1 - 60
70%	60,1 - 70
80%	70,1 - 80
90%	80,1 - 90
100%	90,1 - 100

3.2.2 Berechnung des Einschneidewinkels

Neben der Matchinganzahl wurde auch der Einschneidewinkel (α) für jede Kamera berechnet, da von diesem die Höhengenaugigkeit als auch die Sichtbarkeit der Pixel und damit das Matchingergebnis direkt abhängen. Der Einschneidewinkel wurde dabei immer von Bildmittelpunkt (BM) zu Bildmittelpunkt berechnet (siehe Abb. 3.3). Dieser lässt sich wie folgt ableiten:

$$\tan \alpha = \frac{\text{Abstand zwischen den Bildmitten am Boden (L1)}}{\text{Flughöhe (h)}}$$

$$\tan \alpha = \frac{\text{Abstand zwischen den Bildmitten am Boden (L2)}}{\text{Brennweite (f)}}$$

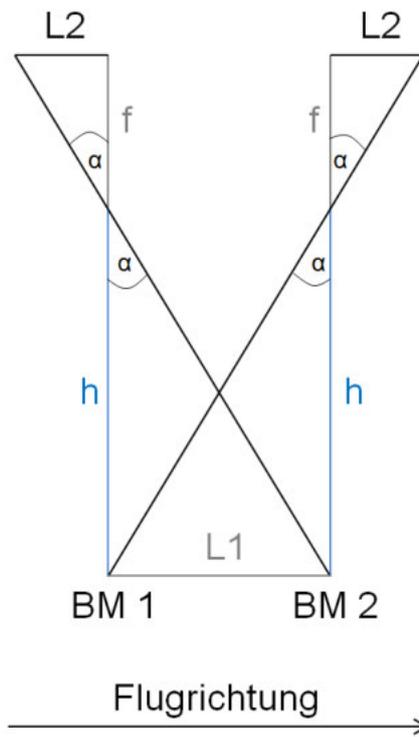


Abb. 3.3: Einschneidewinkel am Bildmittelpunkt

3.3 Verfahrensschritte der Einzelbaumextraktion

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Verfahren zur Extraktion von Einzelbäumen beruht auf zwei Schritten. In einem ersten Schritt werden die Baumspitzen auf Basis der Digitalen Oberflächenmodelle abgeleitet. In einem zweiten Schritt werden von diesen Baumspitzen ausgehend auf Basis der spektralen Informationen der True Orthophoto Mosaike sowie auf Basis der geometrischen Informationen der Digitalen Oberflächenmodelle die Baumumringe abgeleitet. Unter dem Baumumring wird im Rahmen der Arbeit die äußere im TOM sichtbare Grenze der Baumkrone verstanden. Im Rahmen der Bildanalyse entspricht der Baumumring auch dem Baumsegment.

Für die Ableitung der Baumspitzen und -kronen wurde auf die modellbasierte Bildanalyse zurückgegriffen (siehe Kap. 2.3.2.1). Dafür wurden ein Objekt-, ein Bild- sowie ein Extraktionsmodell erstellt, auf deren Basis die automatische Bildanalyse erfolgt.

Objektmodell eines Baumes

Um eine eindeutige und vom Computer interpretierbare Objektbeschreibung zu ermöglichen, wurde ein sehr einfaches Objektmodell der zu extrahierenden Bäume aufgestellt. Dabei wurden die Eigenschaften eines Baumes auf ein für die Analyse notwendiges Minimum reduziert und keine Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelbäumen vorgenommen. Das Objektmodell Baum für die Ableitung der Baumspitzen und -kronen ist durch folgende Eigenschaften charakterisiert (siehe Abb. 3.4):

- Ein Baum ist ein erhöhtes Objekt mit einer Mindesthöhe von drei Metern.
- Ein Baum ist durch eine Baumkrone abgrenzbar, die einen begrenzten minimalen und maximalen Durchmesser hat.
- Die Baumkrone ist in der Draufsicht durch eine Kreisform gekennzeichnet.
- Jeder Baum hat innerhalb der Baumkrone eine Baumspitze, welche der höchste Punkt des Baumes ist.
- Von der Baumspitze ausgehend verringert sich die Baumhöhe mit einer definierten negativen Mindest- und Maximalneigung sowie einer richtungsabhängigen Ausrichtung der Krone.
- Zwischen zwei oder mehreren Bäumen besteht ein Mindestabstand.
- Ein Baum ist durch eine bestimmte spektrale Signatur gekennzeichnet.
- Ein Baum ist aufgrund seiner erhöhten Form durch eine bestimmte Helligkeit gekennzeichnet.

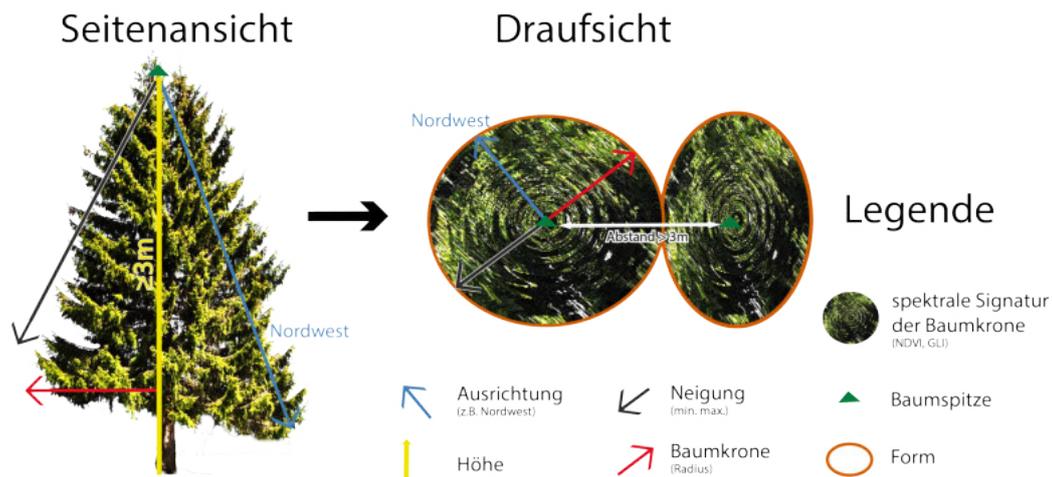


Abb. 3.4: Objektmodell eines Baumes

Bildmodell eines Baumes

Auf Basis des Objektmodelles wurde anschließend auf Basis von allen verwendeten Eingangsdaten (DOM und TOM) ein Bildmodell eines Baumes erstellt. D.h. es wurden alle Eigenschaften des Objektmodelles, welche sich im Sensormodell identifizieren lassen, auf das Bildmodell übertragen. Das Bildmodell ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Durch die Ableitung eines normalisierten Digitalen Oberflächenmodelles (nDOM) ist die Objekthöhe jedes Pixels bestimmbar. Für die Analyse werden nur Pixel verwendet, deren Höhe größer gleich 3 Meter ist.
- Die Spitze eines Baumes ist als höchster Punkt des Baumes als ein lokales Maximum im nDOM oder DOM ableitbar. Innerhalb des Bildmodelles wird die Spitze als Mittelpunkt des Baumes angenommen.
- Von der Baumspitze ausgehend wird der minimale und maximale Baumumfang der Baumkrone bestimmt.
- Die Baumkrone ist kreisförmig um die Baumspitze angeordnet.
- Von der Spitze ausgehend wird auf Basis des DOM oder nDOM die maximale und minimale Neigung sowie Ausrichtung der Baumkrone in 16 Richtungen berechnet.
- Auf Basis der Georeferenzierung der Baumspitzen wird der Mindestabstand zwischen zwei oder mehreren Bäumen berechnet.
- Die spektrale Signatur eines Baumes wird mit Hilfe von eindeutig bestimmbar Vegetationsindizes, wie dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (vgl. Rouse et al. 1974, vgl. Tucker 1978) oder dem Green Leaf Index (GLI) (Louhaichi et al. 2001) berechnet.

- Die Helligkeit (h) wird mit Hilfe von eindeutigen Indizes berechnet.
 - Für RGB-Bilder wurde die Helligkeit wie folgt berechnet:

$$h = \frac{Rot+Grün+Blau}{3}$$

- Für RGB-und NIR-Bilder wurde die Helligkeit wie folgt berechnet:

$$h = \frac{Rot+Grün+Blau+NIR}{4}$$

Extraktionsmodelle eines Baumes

Die automatische Baumextraktion erfolgt durch die Verwendung von zwei Extraktionsmodellen. Mit einem Extraktionsmodell werden die Baumspitzen bestimmt und mit einem zweiten Extraktionsmodell werden die Baumumrisse bzw. Baumkronen abgeleitet. Diese werden in Kapitel 3.3.2 und 3.3.3 näher vorgestellt.

3.3.1 Ableitung der Baummasken

Zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes wird vor jeder Baumspitzenextraktion eine Baummaske erstellt. Nur innerhalb dieser werden die Baumspitzen extrahiert. Für die Extraktion der Baummaske werden neben den spektralen Informationen der TOM auch die geometrischen Informationen der DOM verwendet. Dazu wird auf Basis der beiden Vegetationsindizes NDVI und GLI zunächst eine Vegetationsmaske abgeleitet, um zwischen Vegetation und Nichtvegetation unterscheiden zu können. Für die Baummaske werden nur die als Vegetation klassifizierten Bereiche verwendet. Durch die Verwendung der geometrischen Informationen aus dem nDOM und/oder dem DOM kann die Vegetationsmaske noch zwischen erhöhter Vegetation (z.B. Bäume und Büsche) und Grundvegetation (z.B. Wiese) unterteilt werden. Die erhöhte Vegetation wird als Baummaske verwendet. Dies ermöglicht neben der Reduzierung der Datenmenge auch eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit der abgeleiteten Baumspitzen.

3.3.2 Ableitung von Baumspitzen mit Hilfe der Focal Statistics Analyse

Mit der GIS-gestützten Focal Statistics Analyse (Esri 2016) werden lokale Maxima auf Basis der Digitalen Oberflächenmodelle bestimmt, welche den Modellannahmen entsprechend den Baumspitzen entsprechen. Diese Operation kann für die Ableitung von Baumspitzen, sowohl von Nadel-, als auch Laubbäumen genutzt werden (vgl. Bayer et al. 2013, vgl. Poznanska et al. 2013). Die Focal Statistics Analyse ist eine Nachbarschaftsoperation, bei der der Wert für die Ausgabezelle eine Funktion aller Werte der benachbarten Eingabezellen ist. Da bei der Extraktion von Baumspitzen nach lokalen Maxima gesucht wird, wird mit einer Maximalfunktion im vorgegebenen Suchraster das lokale Maximum bestimmt. Dabei wird die Summe aller Werte in der Nachbarschaft des gefundenen lokalen Maximums aufsummiert und als neuer Wert ausgegeben. Entsprechend der Modellannahme, dass Bäume einen

kreisförmigen Umriss haben, wird ein Kreis als Suchraster verwendet (siehe Abb. 3.5). Über die Größe des Kreises kann die Größe der zu extrahierenden Bäume berücksichtigt werden. Für komplexe Baumbestände mit unterschiedlichen Größen erfolgt eine Anpassung des Suchrasters, entsprechend der Modellannahme, dass mit zunehmender Baumgröße der Kronendurchmesser zunimmt.

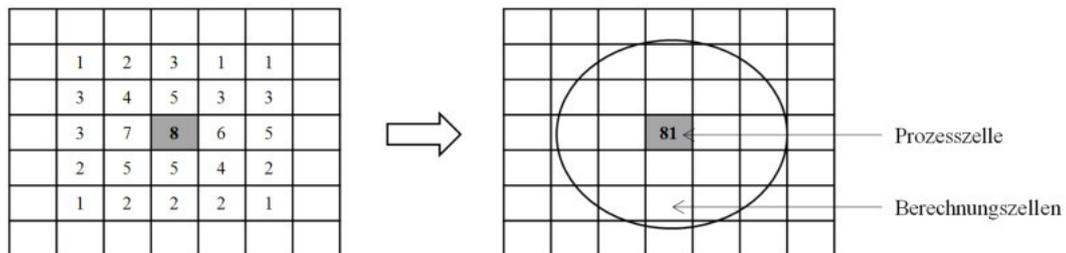


Abb. 3.5: Prinzip der Funktionsweise der Focal Statistics Analyse (verändert nach ESRI 2016)

Entsprechend der Modellannahme ist für jeden Baum nur eine Baumspitze möglich. Nach Anwendung der Focal Statistics Analyse werden jedoch für einige Nadelbäume und verstärkt für Laubbäume aufgrund der Morphologie mehrere Spitzen extrahiert. Diese werden über die Annahme bereinigt, dass die Baumspitze der höchste Punkt des Baumes ist. Daher wird für alle extrahierten Spitzen eine Nachbarschaftsanalyse auf Basis der Distanz der Spitzen zueinander durchgeführt. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass eine Baumkrone einen Maximalradius hat. Entsprechend der Größe der zu extrahierenden Bäume können so über die Distanz zueinander Baumspitzen innerhalb einer Baumkrone identifiziert und bereinigt werden. Die Umsetzung der Focal Statistics Analyse erfolgt mit Hilfe eines eigenständigen Modelles in ArcGIS, welches in Anhang 2 dargestellt ist.

Das GIS-Modell für die Ableitung der Baumspitzen lässt sich in fünf Teile gliedern:

1. Verschneidung der Baummaske mit dem Digitalen Oberflächenmodell
 - a) Vorteile:
 - i. Vor allem in städtischen Gebieten erfolgt eine deutliche Reduzierung der Datenmenge und damit des Rechenaufwandes.
 - ii. Mit der Verschneidung geht eine deutliche Erhöhung der Genauigkeit einher, da lokale Maxima auf anderen erhöhten Objekten (z.B. Häusern) nicht mitextrahiert werden. Es werden nur lokale Maxima auf Baumspitzen ausgegeben.
 - b) Nachteil:
 - i. Die Genauigkeit der Baumspitzenextraktion hängt direkt von der Genauigkeit der Baummaske ab. Bäume, die nicht in der Baummaske erfasst sind, werden nicht extrahiert. Von anderen erhöhten Objekten, welche innerhalb der Baummaske liegen, werden die lokalen Maxima der Objekte als Baumspitzen ausgegeben.

2. Resampling des verschnittenen Oberflächenmodells

a) Vorteile:

- i. Bei zu großer Bodenauflösung (GSD) des DOM werden zu viele Einzelspitzen abgeleitet. Durch das Resampling wird eine Glättung der Oberfläche erreicht, was die Genauigkeit des Ergebnisses erhöht.
- ii. Unterschiedliche Bodenauflösungen können mit nur einem Modell ausgewertet werden.

b) Nachteil:

- i. Bedingt durch die geometrische Transformation kommt es zu einer Interpolation der Grauwerte. Diese sind mit den Werten einer Originalauflösung nur bedingt vergleichbar.

3. Durchführung der Focal Statistics Analyse

a) Vorteile:

- i. Aufgrund der verwendeten Kreisform innerhalb der das lokale Maximum gesucht wird, können mit sehr hohen Genauigkeiten (siehe Kap. 4.5) Baumspitzen extrahiert werden.
- ii. Insbesondere Laubbäume, welche mit anderen Einzelbaumextraktionsmethoden mit nur geringen Vollständigkeits- und Korrektheitsraten extrahiert werden, können mit der Focal Statistics Analyse mit hohen Genauigkeiten abgeleitet werden.

b) Nachteil:

- i. Die Größe der Kreisringform bestimmt den Suchradius für die lokalen Maxima. Bei heterogenen Baumbeständen mit unterschiedlichen Baumdurchmessern müssen mehrere Kreisringformen unterschiedlicher Größe angewendet werden.

4. Selektion von Einzelspitzen und Mehrfachspitzen

a) Vorteil :

- i. Durch die Selektion können Einzelspitzen von Mehrfachspitzen auf Basis des Abstandes aller Spitzen zueinander leicht getrennt und weiter verarbeitet werden.

b) Nachteil:

- i. Für alle Spitzen wird ein konstanter Minimalabstand zueinander angenommen. Bei Baumspitzen von kleineren Bäumen, welche innerhalb des Minimalabstandes zueinander stehen, werden richtig abgeleitete Baumspitzen wieder verworfen.

5. Reduzierung der Mehrfachspitzen

a) Vorteil:

- i. Entsprechend der Modellannahme und für das Region Growing wird für jeden Baum nur eine Baumspitze extrahiert.

b) Nachteil:

- i. Aufgrund der minimalen Distanzannahme zwischen zwei Spitzen können mehrere Spitzen auf einem Baum zugelassen werden. Dies gilt insbesondere für heterogene Baumbestände mit unterschiedlichen Baumdurchmessern. So kann es bei Bäumen mit einem großen Durchmesser zu Ableitung von Mehrfachspitzen kommen. Dies verringert die Korrektheit der Extraktionsergebnisse.

3.3.3 Ableitung von Baumkronen mit Hilfe eines Region Growing Algorithmus'

Für die Ableitung der Baumkronen wird neben den geometrischen Informationen auch auf spektrale Informationen zurückgegriffen und die extrahierten Baumspitzen werden als Startpunkt für ein Region Growing verwendet. Für das Region Growing werden die Modellannahmen des Bildmodelles verwendet. Dementsprechend kann ein Pixel vom Startpunkt ausgehend nur wachsen, wenn:

- sich der Schwellwert eines Pixels im Verhältnis zu seinen Nachbarpixeln innerhalb eines minimalen und maximalen Neigungswertes bewegt,
- sich die Ausrichtung eines Pixels im Verhältnis zu seinen Nachbarpixeln innerhalb eines maximalen Schwellwertes bewegt,
- die maximale Größe eines Baumsegmentes noch nicht erreicht wurde,
- noch kein angrenzendes Nachbarsegment erreicht wurde,
- der Spektralwert des NDVI und/oder GLI sich innerhalb eines definierten Schwellwertes befindet,
- der Spektralwert einen bestimmten Helligkeitsbereich nicht unterschreitet.

Wird eines dieser Kriterien erreicht, erfolgt ein Abbruch des Wachsens. Durch eine Verschmelzung aller der jeweiligen Baumspitze durch das Region Growing zugeordneten Pixel erfolgt die Ableitung des Baumsegmentes und des Baumumrisses.

Das Region Growing wurde mit dem Breadth-First Region Growing Algorithmus in C++ umgesetzt (siehe Anhang 3).

3.4 Genauigkeitsanalyse der Einzelbaumextraktion

Zur Beurteilung der Ergebnisse wurden im Rahmen der Arbeit eine Reihe von Genauigkeitsanalysen durchgeführt. Dafür wurden Kontrolldaten terrestrisch vermessen und visuell kartiert. Diese wurden zur Berechnung von verschiedenen Genauigkeitsmaßen herangezogen.

3.4.1 Bestimmung der Kontrollbäume

Zur Beurteilung der Genauigkeit der Extraktionsergebnisse der Einzelbaumextraktion wurden in jedem Untersuchungsgebiet repräsentative Kontrollbäume eingemessen oder kartiert. Diese werden für die Berechnung der Vollständigkeit und Korrektheit verwendet. Die genaueste Methode zur Bestimmung von Kontrollbäumen ist eine terrestrische Vermessung. Im Rahmen der Arbeit wurde daher ein terrestrisches Laserscanning im Untersuchungsgebiet Habichtswald durchgeführt. Dieses dient der repräsentativen Bestimmung der Genauigkeit der entwickelten und verwendeten Methode der Einzelbaumextraktion. Eine terrestrische Vermessung von Bäumen ist einerseits sehr genau, andererseits auch mit einem hohen Aufwand und Kosten verbunden. Daher wurden in den weiteren Untersuchungsgebieten die Kontrollbäume durch eine Vorortkartierung erhoben.

Terrestrisches Laserscanning zur Bestimmung von Kontrollbäumen

Für die Bestimmung der absoluten Genauigkeiten wurden im Nadel- und Laubwaldbereich des Untersuchungsgebietes Habichtswald Kontrollbäume mit einem Riegl Laser Scanner LMS Z620 terrestrisch eingemessen (siehe Abb. 3.6). Die lokale Genauigkeit der Messung lag bei sechs Millimetern. Bezogen auf geodätische Festpunkte lag die globale Genauigkeit der Messung bei unter fünf Millimeter. Dabei wurden an 11 Messpunkten ca. 28 Millionen Punkte erfasst, welche auf Basis der gleichzeitigen Aufnahmen der kalibrierten Kamera eingefärbt wurden (Ingenieurbüro Gilan 2013). Die Kameraaufnahmen (siehe Abb. 3.7 und 3.8) wurden auch zur Bestimmung der Baumarten verwendet. Die Messungen wurden am 08. und 09. April 2013 durchgeführt, weil zu diesem Zeitpunkt aufgrund der fehlenden Belaubung des Unterbaues die besten Messergebnisse erzielt werden konnten.

Das terrestrische Laserscanning (TLS) wurde überwiegend im Laubwald durchgeführt, da dies in Laubwaldgebieten eine genaue Methode für eine Lagebestimmung von Kontrollbäumen ist (vgl. Bienert 2013). Für eine vollständige Erhebung der Kontrolldaten wurden zusätzlich auch im Nadelwald Bäume vermessen.



Abb. 3.6: Terrestrische Messung der Kontrollbäume mit dem Riegl Laser Scanner LMS Z620



Abb. 3.7: 360°C Panorama Aufnahme eines Altbestandes



Abb. 3.8: 360°C Panorama Aufnahme eines Jungbestandes

Im Nachgang der terrestrischen Messungen wurden mit Hilfe der Software PHIDIAS in Microstation die Kontrollbäume für Bestimmung der absoluten Genauigkeiten mit einer Genauigkeit von ca. einem Zentimeter bestimmt. Dabei wurden nur Bäume als Kontrollbäume erhoben, die sowohl in der terrestrischen Punktwolke als auch in der dazugehörigen Fotoaufnahme erkannt werden konnten (siehe Abb. 3.9). Für die Berechnung der Vollständigkeit und Korrektheit der Einzelbaumextraktion wurden im Laubwald alle Bäume mit einem Stammdurchmesser in Brusthöhe (ca. 1,30 m) von mindestens 25 Zentimetern sowie im Nadelwald alle Bäume mit einem Stammdurchmesser von über 20 Zentimetern verwendet. Im Zuge der Bestimmung der Kontrollbäume wurden auch Bäume mit einem kleineren Stammdurchmesser vermessen und erhoben. Diese wurden in die Genauigkeitsbestimmung jedoch nicht mit aufgenommen, da es sich im Untersuchungsgebiet überwiegend um einen Altbestand handelt, in welchem kleinere Bäume das Baumkronendach nicht erreichen und daher im True Orthophoto Mosaik und im Digitalen Oberflächenmodell nicht erkennbar sind.

Mit Hilfe des TLS kann jedoch nur der Baumstamm und damit der Standort des Baumes am Boden bestimmt werden. Eine Bestimmung des Kronenumfangs ist mit einem TLS nicht möglich. Da die Extraktion des Baumstandortes aus True Orthophoto Mosaiken und Digitalen

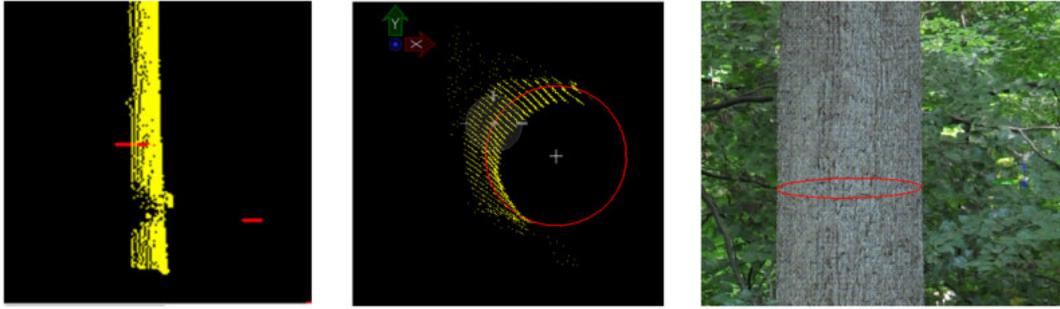


Abb. 3.9: Bestimmung der Kontrollbäume aus Punktwolke und Fotoaufnahme

Oberflächenmodellen über die Baumspitze erfolgt und viele Bäume nicht gerade wachsen, wurden die Bäume an zwei Punkten am Baumstamm vermessen, um so die Position an der Baumspitze im DOM genauer bestimmen zu können. Dabei wurde von der Annahme ausgegangen, dass ein Baumstamm in einer Linie in die Höhe wächst (siehe Abb. 3.10). Mit Hilfe des TLS wurden die Punkte x_1, y_1, z_1 sowie x_2, y_2, z_2 bestimmt. Die Werte für z_3 wurden aus dem Digitalen Oberflächenmodell abgeleitet. Anhand dieser Werte wurden die Koordinaten für x_3 und y_3 mit folgender Vektorrechnung bestimmt, welche die Baumposition an der Oberfläche darstellen:

$$\vec{v} \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \alpha * \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix}$$

$$a = \frac{(z_3 - z_1)}{(z_2 - z_1)}$$

$$x_3 = x_1 + a * (x_2 - x_1)$$

$$y_3 = y_1 + a * (y_2 - y_1)$$

Abbildung 3.11 verdeutlicht den großen Einfluss der Kontrollpunktberechnung an der Baumoberfläche. Da die Baumspitzen als Baumstandort bestimmt werden, können mit der Berechnung von x_3 und y_3 die Vollständigkeits- und Genauigkeiten lagegenauer bestimmt werden. Mit Hilfe des TLS konnte folgende Anzahl an Kontrollpunkten erhoben werden:

- Laubwald Jungbestand: 166,
- Laubwald Altbestand: 385,
- Nadelwald: 130.

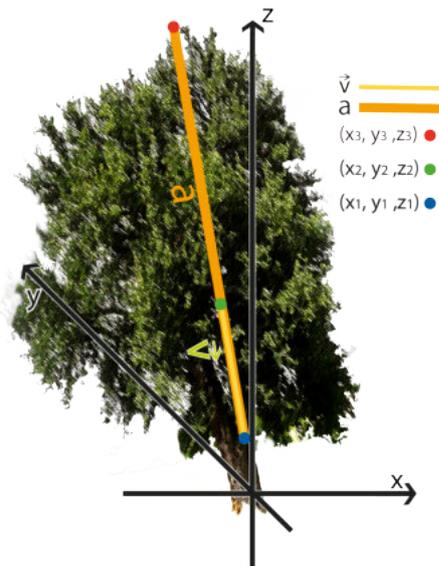


Abb. 3.10: Berechnung des Baumstandortes an der Baumspitze

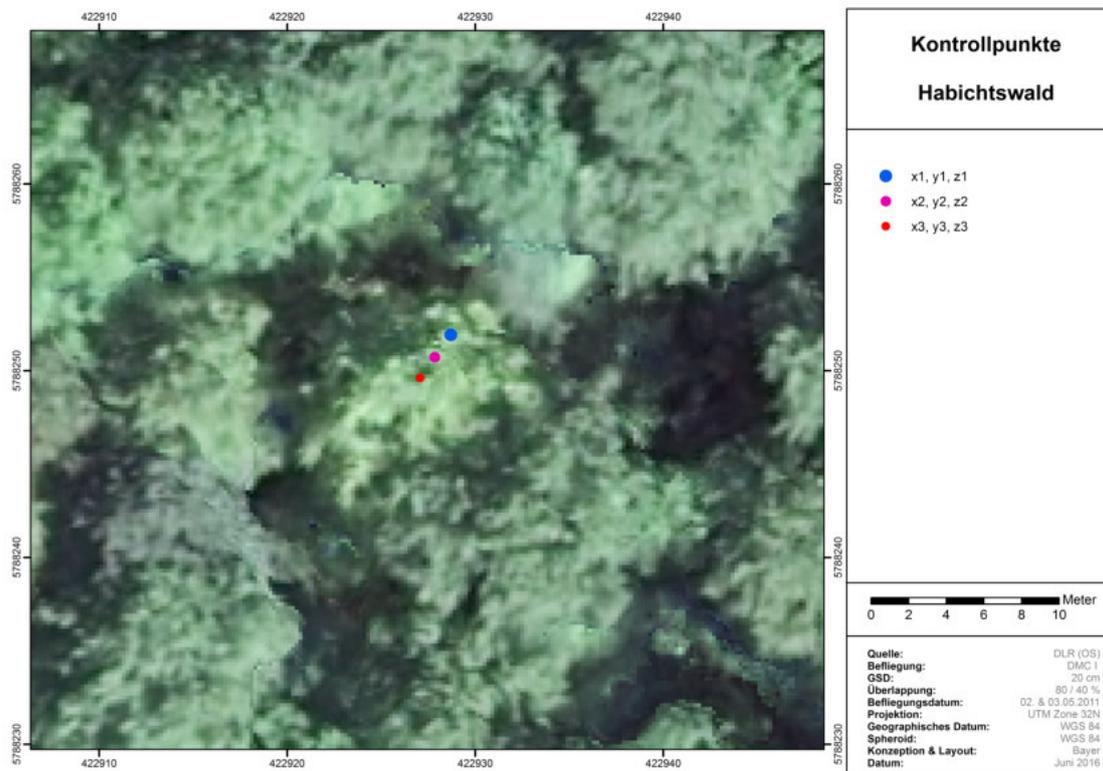


Abb. 3.11: Einfluss der Kontrollpunkte bei schräg wachsenden Bäumen

Kartierung von Kontrollbäumen

Zur Bestimmung von Kontrollbäumen für die Genauigkeitsanalyse wurde in den Untersuchungsgebieten Gleisdorf, München, Murnau und Baruth eine Kartierung der Kontrollbäume durchgeführt (siehe Abb. 3.12). Die Kartierung erfolgte durch eine Aufnahme der Kontrollbäume im Gelände sowie durch die Verwendung der True Orthophoto Mosaik und Digitalen Oberflächenmodelle. Aufgrund der hohen absoluten und relativen Lagegenauigkeit der TOM und DOM wurden diese als Kartierungsgrundlage verwendet und die Kontrollbäume anhand der Kartierungsergebnisse auf Basis der TOM und DOM digitalisiert.

Nach einer Abgrenzung der Untersuchungsgebiete war es die Zielsetzung der Kartierung die Baumstandorte in Form eines Punktlayers zu bestimmen. Baumumringe konnten aufgrund der Komplexität, der zu erwartenden Ungenauigkeit der Kartierung sowie des zeitlichen Versatzes zwischen der Luftbildaufnahme und der Kartierung nicht erhoben werden.

Aufgrund der Größe und damit verbundenen großen Anzahl von Bäumen in den jeweiligen Untersuchungsgebieten wurde eine repräsentative Anzahl an Kontrollbäumen kartiert. Die Zahl der Kontrollbäume beträgt:

- München: 1945 Kontrollbäume
- Gleisdorf: 333 Kontrollbäume
- Baruth: 3017 Kontrollbäume
- Murnau: 48 Kontrollbäume



Abb. 3.12: Kontrollbäume im Untersuchungsgebiet München

3.4.2 Absolute und relative Genauigkeiten

Jede fernerkundliche Analyse und damit auch die Extraktion von Einzelbäumen ist nie zu 100 Prozent genau und immer mit Fehlern behaftet. Nach Kellenberger (1996: 194f) kann dabei zwischen objektbedingten und verfahrensbedingten Fehlern unterschieden werden. Unter objektbedingten Fehlern versteht man Fehlerquellen, die ihre Gründe bei dem zu extrahierenden

Objekt haben. Dazu gehören beispielsweise die Beweglichkeit von Bäumen während der Luftbildaufnahme oder die Abhängigkeit der spektralen Reflexion von verschiedensten Einflüssen. Zu den verfahrensbedingten Fehlern gehören Fehler, die im direkten Zusammenhang mit dem Extraktionsprozess stehen. Zu diesen Fehlern zählen die Qualität der Kontrolldaten oder auch die Grenzen der verwendeten Algorithmen und Methoden.

Für die Bestimmung der Genauigkeit können verschiedene Methoden verwendet werden, die sich jedoch hinsichtlich der Qualität der Genauigkeitsbestimmung stark voneinander unterscheiden:

- visueller Vergleich mit den Fernerkundungsdaten bzw. einer Karte,
- visueller Vergleich mit Kontrolldaten,
- statistischer Vergleich mit Kontrolldaten.

Für eine umfangreiche Beschreibung der Methoden der Genauigkeitsanalyse sei auf Congalton & Green (2008) verwiesen. Bei der Berechnung und Beschreibung der Genauigkeit des Extraktionsergebnisses hat sich in der Fernerkundung die sogenannte Fehlermatrix durchgesetzt (siehe Abb. 3.13). In dieser werden auf der vertikalen Achse die Klassifikationsergebnisse und auf der horizontalen Achse die Kontrolldaten eingetragen. Basierend auf der Fehlermatrix lässt sich eine Reihe von statistischen Genauigkeitsmassen zur Beurteilung der Qualität der fernerkundlichen Analyse berechnen. Mit Hilfe der Fehlermatrix wird im Rahmen der Arbeit die Genauigkeit der Baummaske bestimmt.

Klassen		Referenz			
		A	B	C	D
Klassifikationsergebnis	A	richtig bestimmte Pixel	falsch bestimmte Pixel	falsch bestimmte Pixel	falsch bestimmte Pixel
	B	falsch bestimmte Pixel	richtig bestimmte Pixel	falsch bestimmte Pixel	falsch bestimmte Pixel
	C	falsch bestimmte Pixel	falsch bestimmte Pixel	richtig bestimmte Pixel	falsch bestimmte Pixel
	D	falsch bestimmte Pixel	falsch bestimmte Pixel	falsch bestimmte Pixel	richtig bestimmte Pixel

Abb. 3.13: Fehlermatrix

Die Overall Accuracy ist das Verhältnis der richtig bestimmten Objekte bzw. Pixel zur Anzahl aller Objekte bzw. Pixel. Da hierbei keine Fehler berücksichtigt werden, ist die Gesamtgenauigkeit nur bedingt aussagekräftig (Congalton 1991: 36).

$$A_0 = \frac{\text{richtig klassifizierte Pixel}}{\text{alle Pixel}}$$

Die Producers Accuracy gibt an, wie häufig ein Objekt oder Pixel im Vergleich zu den Kontrolldaten richtig klassifiziert wurde. Dabei werden falsch zugeordnete Objekte und Pixel nicht berücksichtigt (Lillesand et al. 2015: 577).

$$P_b = \frac{\text{richtig klassifizierte der Klasse}(b)}{\text{Klasse}(b) \text{ in Groundtruth}} * 100$$

Bei der Users Accuracy werden die nicht der Klasse zugeordneten Objekte und Pixel berücksichtigt. Die Users Accuracy zeigt dementsprechend an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Objekt oder Pixel der entsprechenden Klasse richtig zugeordnet wurde (Lillesand et al. 2015: 577).

$$U_b = \frac{\text{richtig klassifizierte der Klasse}(b)}{\text{Klasse}(b) \text{ in Klassifikation}} * 100$$

Die Inclass Accuracy berücksichtigt sowohl die zuviel als auch die zuwenig klassifizierten Objekte und Pixel im Verhältnis zu den richtig klassifizierten Objekten und Pixeln (Kellenberg 1996: 199).

$$Inclass_b = \frac{\text{richtig klassifizierte der Klasse}(b)}{\text{zuwenig} + \text{zuviel klassifizierte der Klasse}(b)}$$

Die Average Accuracy berechnet sich durch die User Accuracies aller Klassen durch die Anzahl der Klassen (Kellenberg 1996: 200).

$$A_A = \frac{\text{Summe der user accuracies aller Klassen}}{\text{Anzahl Klassen}}$$

Die Mean Accuracy bildet den Durchschnitt aus Overall Accuracy und Average Accuracy (Kellenberg 1996: 200).

$$A_A = \frac{\text{overall accuracy} + \text{average accuracy}}{2}$$

Mit Hilfe des Kappa Koeffizienten wird die Zufallsübereinstimmung von der Gesamtgenauigkeit bereinigt. Der Kappa Koeffizient zeigt dementsprechend an, wie gut das Extraktionsergebnis mit den Kontrolldaten übereinstimmt, d.h. welcher Anteil des Ergebnisses mit den Kontrolldaten zufällig übereinstimmt und welcher tatsächlich richtig extrahiert wurde (Congalton 1991: 40).

$$\text{Kappa Koeffizient} = \frac{\text{Gesamtgenauigkeit} - \text{Zufallsübereinstimmung}}{1 - \text{Zufallsübereinstimmung}}$$

Durch die Kappa-Werte ist eine Beurteilung des Extraktions- und Klassifikationsergebnisses möglich. Zur Bewertung der Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung der Kappa-Werte haben Monserud & Leemanns (1992: 285) folgende Bewertungstabelle aufgestellt:

Tab. 3.1: Bewertungstabelle der Kappa Werte

Kapa Wert	Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung
0,00 - 0,05	keine
0,05 - 0,20	sehr gering
0,20 - 0,40	gering
0,40 - 0,55	kaum
0,55 - 0,70	gut
0,70 - 0,85	sehr gut
0,85 - 0,99	exzellent
0,99 - 1,00	perfekt

Im Bereich der Einzelbaumextraktion aus Luftbildern stellt die Beurteilung der Genauigkeit der extrahierten Kronensegmente eine große Herausforderung dar. Dies liegt einerseits an den nur mit sehr großem Aufwand zu messenden Kontrollumringen der Bäume und andererseits an der nahezu unmöglichen einhundertprozentig genauen Bestimmung eines Segmentes. Die extrahierten Baumumringe sind entweder zu groß, zu klein oder überlappen sich nur teilweise mit den Kontrollsegmenten. Straub & Heipke (2004: 63ff) schlagen ein Verfahren vor, mit welchem Baumsegmente mit einander verglichen werden können. Dies ermöglicht den Vergleich verschiedener Extraktionsergebnisse, aber auch die Bewertung der Ergebnisse bei der Verwendung von Kontrolldaten.

Im Vorfeld der Genauigkeitsuntersuchung von Baumsegmenten muss also geklärt werden, in welchen Fällen das automatisch extrahierte Baumsegment als richtig oder falsch angenommen wird. Beim Vergleich von zwei Segmenten können nach Egenhofer (1993: 266) folgende theoretische Fälle angenommen werden, welche für die Genauigkeitsbestimmung von Baumsegmenten von Bedeutung sind:

1. Kontrollsegment und extrahiertes Segment stimmen vollständig überein (c),
2. das extrahierte Segment ist vollständig im Kontrollsegment enthalten aber kleiner (d),
3. das extrahierte Segment bedeckt das Kontrollsegment vollständig ist jedoch größer (e),
4. Kontrollsegment und extrahiertes Segment überlappen sich (h),
5. Kontrollsegment und extrahiertes Segment berühren sich mit ihren Segmentgrenzen (b),
6. Kontrollsegment und extrahiertes Segment stimmen nicht überein (a) (siehe Abb. 3.14).

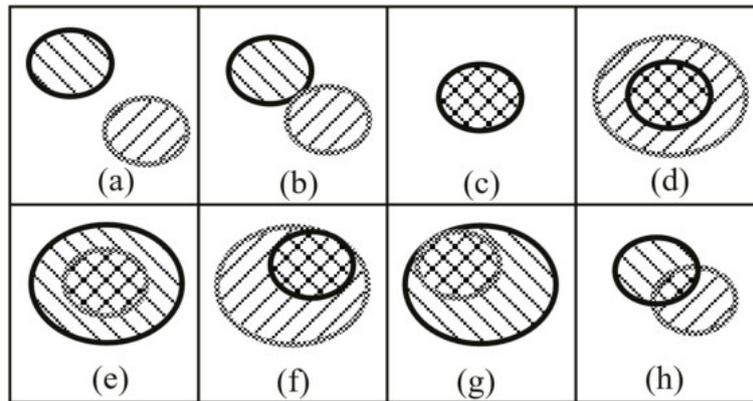


Abb. 3.14: Mögliche topologische Beziehungen zwischen zwei Segmenten (Egenhofer 1993: 266)

Im Fall eins wird das extrahierte Segment als richtig angenommen. In den Fällen fünf und sechs wird das extrahierte Segment dagegen als falsch angenommen. Für die Fälle zwei, drei und vier muss dagegen berechnet werden, wann das Extraktionsergebnis als richtig angenommen wird. Dies kann nach Winter (1996: 5) mit dem Überlappungsfaktor OF berechnet werden:

$$OF = \frac{|\mathcal{A}^\circ \cap \mathcal{B}^\circ|}{\min(|\mathcal{A}^\circ|, |\mathcal{B}^\circ|)}$$

\mathcal{A} = Grenzsegment A

\mathcal{B} = Grenzsegment B

Ist der Überlappungsfaktor kleiner oder gleich 0,5 spricht man von einer schwachen Überlappung, ist der Überlappungsfaktor dagegen größer als 0,5 spricht man von einer starken Überlappung (Winter 1996: 5). Dementsprechend kann bei einem Überlappungsfaktor von größer als 0,5 das Extraktionsergebnis als richtig angesehen werden.

Nach der Berechnung der richtig und falsch abgeleiteten Baumsegmente kann die Genauigkeit der Extraktionsergebnisse bestimmt werden. Diese kann in Vollständigkeit (Producers Accuracy) und Korrektheit (Users Accuracy) angegeben werden. Dafür müssen die richtigen (True Positives) und falschen (False Positives) Bäume sowie die nicht extrahierten Bäume (False Negatives) bestimmt werden (siehe Abb. 3.15) (Straub 2003a: 25f). Mit dieser Methode kann auch die Genauigkeit der Baumspitzen bestimmt werden.

Durch die Bestimmung der richtig extrahierten Bäume sowie die Bestimmung der nicht extrahierten Bäume lässt sich die Vollständigkeit (V) der Extraktionsergebnisse wie folgt berechnen:

$$\text{Vollständigkeit}(\%) = \frac{\text{richtig extrahierte Bäume}}{\text{richtig extrahierte Bäume} + \text{nicht extrahierte Bäume}} * 100$$

Durch die Bestimmung der richtig und falsch extrahierten Bäume lässt sich die Korrektheit (K) der Extraktionsergebnisse wie folgt berechnen:

$$\text{Korrektheit}(\%) = \frac{\text{richtig extrahierte Bäume}}{\text{richtig extrahierte Bäume} + \text{falsch extrahierte Bäume}} * 100$$

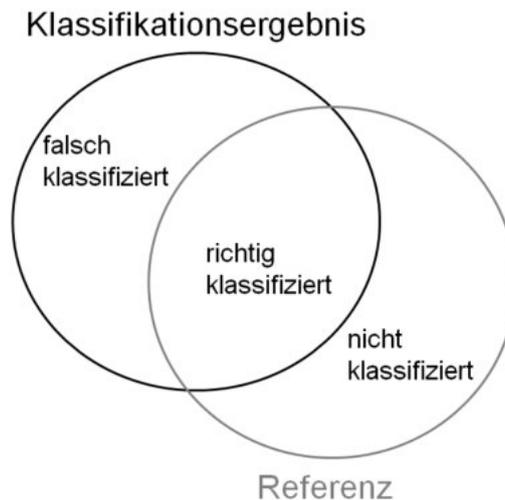


Abb. 3.15: Bestimmung der richtig und falsch sowie nicht extrahierten Baumsegmente für die Berechnung von Vollständigkeit und Korrektheit

Die Bestimmung der richtigen, falschen und nicht extrahierten Baumspitzen erfolgt mit Hilfe eines GIS-Modelles in ArcGIS. Dafür wurde für alle automatisch extrahierten Baumspitzen der Abstand zum nächsten Kontrollbaum berechnet. Wurde der gesetzte Maximalabstand zwischen extrahierter Baumspitze und Kontrollpunkt überschritten, wird der Baum als nicht extrahiert angenommen. Befindet sich eine abgeleitete Baumspitze innerhalb des Maximalabstandes wird diese Baumspitze als richtig angenommen. Befinden sich mehrere Baumspitzen innerhalb des Maximalabstandes wird nur eine Baumspitze als richtig angenommen, die anderen Baumspitzen werden als falsche Baumspitzen ausgegeben. Aufgrund der Struktur der Baumbestände (Laub- und Nadelbäume mit unterschiedlichen Kronendurchmessern) wurden in allen Untersuchungsgebieten unterschiedliche Maximalabstände angenommen.

Die Maximalabstände betragen:

- Baruth: 1,5 Meter,
- München: 2 Meter,
- Gleisdorf: 3 Meter,
- Murnau: 3 Meter,
- Habichtswald:
 - 2 Meter im Nadelwald und Laubwald (Jungbestand)
 - 3 Meter im Laubwald (Altbestand).

3.5 Vorstellung der Untersuchungsgebiete und verwendeten Luftbildaufnahmen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden sechs verschiedene Kamerasysteme, welche in fünf Untersuchungsgebieten (siehe Abb. 3.16) geflogen wurden, hinsichtlich der verschiedenen Flugparameter analysiert. Dabei handelt es sich sowohl um weit verbreitete, kommerzielle, großformatige Luftbildkameras der Firmen Vexcel Imaging und Intergraph Z/I Imaging als auch um experimentelle Mittelformatkameras des Institutes für Optische Sensorysysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).

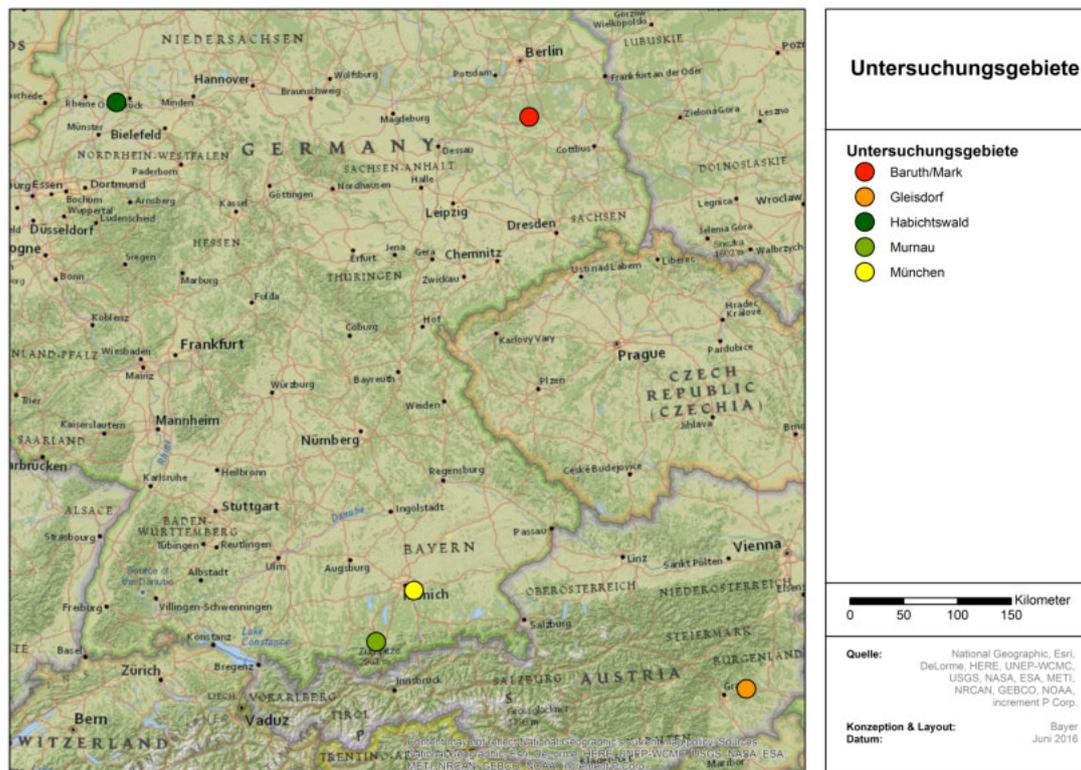


Abb. 3.16: Untersuchungsgebiete

3.5.1 Gleisdorf

Das Untersuchungsgebiet Gleisdorf liegt in Österreich in der Oststeiermark ca. 20 km östlich von Graz. Im Untersuchungsgebiet Gleisdorf wurde eine UltraCam Eagle der Firma Vexcel Imaging mit einer Brennweite von 80 mm sowie eine UltraCam Eagle mit einer Brennweite von 210 mm geflogen (siehe Tab. 3.2). Die Daten wurden von Vexcel Imaging für die Analysen im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchungen dankenswerterweise kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Aufgrund der vergleichbaren Überlappung werden im Untersuchungsgebiet Gleisdorf hauptsächlich die Einflüsse der Brennweite auf die Ergebnisse der Prozessierung untersucht. Aus diesem Grund erfolgt zunächst eine systematische Untersuchung innerhalb eines Flugstreifens

mit einer Längsüberlappung von 80 und 60 Prozent für die Befliegung mit 80 mm Brennweite sowie mit einer Längsüberlappung von 70 Prozent für die Befliegung mit 210 mm Brennweite. Aufbauend auf der Auswertung der einzelnen Flugstreifen werden auch die Querüberlappungen in die Analyse mit einbezogen. Dazu wird die Befliegung mit 80 mm Brennweite mit einer Längs- und Querüberlappung von 80 / 70 und 60 / 70 sowie die Befliegung mit 210 mm Brennweite mit einer Längs- und Querüberlappung von 70 / 70 analysiert.

Tab. 3.2: Flugparameter der Befliegungen in Gleisdorf (Quelle: Gruber et al. 2011, Gruber et al. 2012, Gruber 2013, Wiechert & Gruber 2013, Gruber & Wiechert 2015)

Kamera	UltraCam Eagle 80 mm	UltraCam Eagle 210 mm
Aufnahmedatum	unbekannt	unbekannt
Anzahl Bilder	30	30
Anzahl Flugstreifen	5	5
Bodenauflösung	ca. 5 cm	ca. 3 cm
Flughöhe	1.200 m	1.600 m
Längs- / Querüberlappung (%)	80 / 70	70 / 70
Brennweite	79.8 mm	210,75 mm
Pixelabstand	5,2 µm	5,2 µm
Pixelanzahl quer zur Flugrichtung	20.010	20.010
Pixelanzahl in Flugrichtung	13.080	13.080

3.5.2 München

Das Untersuchungsgebiet München liegt im Waldtruderinger Forst im Südosten der Landeshauptstadt München. Im Untersuchungsgebiet München wurde eine DMC II 230 der Firma Intergraph Z/I Imaging geflogen (siehe Tab. 3.3). Die verwendeten Luftbilder sind Teil einer am 11.04.2011 durchgeführten Befliegung des gesamten Stadtgebietes Münchens. Für die Untersuchungen wurde jedoch nur ein Teil Gesamtbefliegung verwendet. Bedingt durch die frühe Aufnahmezeit im April wurde ein Fichtenwaldgebiet für die Untersuchungen ausgewählt. Die Daten wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) für die Analysen im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchungen dankenswerterweise kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Tab. 3.3: Flugparameter der Befliegungen in München (Quelle: Jacobsen 2011a, Jacobsen 2011b)

Kamera	DMC II 230
Aufnahmedatum	11.04.2011
Anzahl Bilder	106
Anzahl Flugstreifen	11
Bodenauflösung	ca. 10 cm
Flughöhe	1.600 m
Längs- / Querüberlappung (%)	80 / 80
Brennweite	92 mm
Pixelabstand	5,6 μ m
Pixelanzahl quer zur Flugrichtung	15.552
Pixelanzahl in Flugrichtung	14.144

Die Befliegung in München zeichnet sich durch eine sehr große Längs- und Querüberlappung der Luftbilder von jeweils 80 Prozent aus. Anhand der Befliegung München erfolgt daher die Analyse des Einflusses der Längs- und Querüberlappung auf die Prozessierung der Digitalen Oberflächenmodelle. Im Rahmen der Arbeit erfolgt einerseits eine Untersuchung des Einflusses der Längsüberlappung innerhalb eines Flugstreifens sowie andererseits eine Analyse des Einflusses der Querüberlappung. Dabei wurden folgende Längs- und Querüberlappungen untersucht:

Längsüberlappung (%)	Querüberlappung (%)
80 (Einzelstreifen)	
60 (Einzelstreifen)	
80	80
80	60
80	40
60	60
60	40

3.5.3 Murnau

Das Untersuchungsgebiet Murnau befindet sich ca. 70 km südlich von München im Alpenvorland am Staffelsee. Die Luftbildaufnahmen in Murnau wurden mit der vom DLR entwickelten MACS-Hale Kamera mit Rahmen einer Kreuzbefliegung durchgeführt (siehe Tab. 3.4). Aufgrund der zusammenhängenden Kreuzbefliegung wird anhand der Luftbilder von Murnau der Einfluss der Flugrichtung auf die Prozessierung der Oberflächenmodelle untersucht. Die Analyse der Flugrichtung erfolgt in einem Nord-Süd-Flugstreifen sowie in einem Ost-West-Streifen mit einer Längsüberlappung von jeweils 90, 80, 70 und 60 Prozent.

Die Daten wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) für die Analysen im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchungen dankenswerterweise kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Tab. 3.4: Flugparameter der Befliegungen in Murnau (Brauchle et al. 2015)

Kamera	MACS Hale
Aufnahmedatum	21.08.2013
Anzahl Bilder	27 Nord / Süd
	24 Ost / West
Anzahl Flugstreifen	1 Nord / Süd
	1 Ost / West
Bodenauflösung	ca. 6 cm
Flughöhe	1.160 m
Längs- / Querüberlappung (%)	80 / 40
Brennweite	51,7 mm
Pixelabstand	7,4 μm
Pixelanzahl quer zur Flugrichtung	4.864
Pixelanzahl in Flugrichtung	3.232

3.5.4 Baruth/Mark

Das Untersuchungsgebiet Baruth/Mark südlich von Berlin wurde im Rahmen einer Testbefliegung mit der DLR-Kamera MACS-MAR geflogen. Im Rahmen der Testbefliegung wurden drei unterschiedliche Höhen mit sich räumlich überlagernden Flugstreifen geflogen (siehe Abb. 3.17 und Tab. 3.5). Die Bodenauflösung der drei Flughöhen liegt bei 9 cm, 15 cm und 20 cm. Die Befliegung Baruth/Mark wird daher für die Analyse des Einflusses der Auflösung auf die Prozessierung der Digitalen Oberflächenmodelle verwendet. Die drei Flugstreifen wurden mit einer Längsüberlappung von jeweils 90, 80, 70 und 60 Prozent prozessiert.

Die Daten wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) für die Analysen im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchungen dankenswerterweise kostenfrei zur Verfügung gestellt.

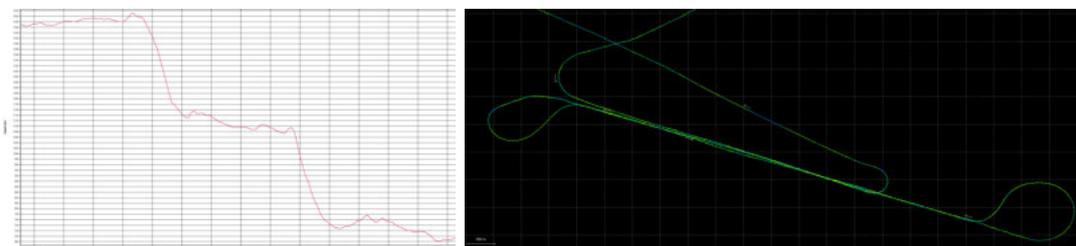


Abb. 3.17: Höhenprofil (links) und Trajektorie (rechts) der Befliegung in Baruth/Mark

Tab. 3.5: Flugparameter der Befliegungen in Baruth/Mark (Scherbaum et al. 2015)

Kamera	MACS MAR
Aufnahmedatum	02.05.2016
Anzahl Bilder	9 cm: 120
	15 cm: 130
	20 cm: 129
Anzahl Flugstreifen	3
Bodenauflösung	ca. 9 cm
	ca. 15 cm
	ca. 20 cm
Flughöhe	740 m
	1.100 m
	1.480 m
Längsüberlappung (%)	95
Brennweite	50 mm
Pixelabstand	7,4 µm
Pixelanzahl quer zur Flugrichtung	4.864
Pixelanzahl in Flugrichtung	3.232

3.5.5 Habichtswald

Das Untersuchungsgebiet Habichtswald umfasst das Naturschutzgebiet Habichtswald in der Nähe von Osnabrück (siehe Tab. 3.6). Das Gebiet ist geprägt durch einen hohen Anteil an Buchen-Eichenmischwald sowie Kleinflächen von Erlenwald und Fichtenwald (LANUV NRW, 2012). Die Daten wurden im Rahmen des Projektes „Der Virtuelle Wald“ (RIF e.V., 2012) kostenfrei für die wissenschaftlichen Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Im Untersuchungsgebiet Habichtswald wurden sehr lagegenaue Kontrolldaten für die Untersuchung der Genauigkeit der Einzelbaumextraktion erhoben. Daher werden im Habichtswald ausschließlich Untersuchungen zur Genauigkeit der entwickelten Methode der Einzelbaumextraktion durchgeführt.

Tab. 3.6: Flugparameter der Befliegungen in Habichtswald (Quelle: Hinz et al. 2001)

Kamera	DMC I
Aufnahmedatum	02. und 03.05.2011
Anzahl Bilder	4.208
Anzahl Flugstreifen	33
Bodenauflösung	ca. 20 cm
Flughöhe	2.000 m
Längs- / Querüberlappung (%)	80 / 40
Brennweite	120 mm
Pixelabstand	12 µm
Pixelanzahl quer zur Flugrichtung	13.824
Pixelanzahl in Flugrichtung	7.680

4 Darstellung der empirischen Ergebnisse

4.1 Einfluss der Flugparameter auf die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen

Im folgenden Kapitel werden die Einflüsse der verschiedenen Flugparameter auf die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen untersucht. Dazu gehören der Einschneidewinkel, die Brennweite, die Überlappung, die Bodenauflösung und die Flugrichtung.

4.1.1 Einfluss des Einschneidewinkels

Wie Kapitel vier verdeutlichen wird, hat der Einschneidewinkel (α) auf die Prozessierung der Digitalen Oberflächenmodelle mit SGM für Bäume einen entscheidenden Einfluss. Ziel jeder Befliegungsplanung muss daher die Berechnung und Einhaltung des optimalen Einschneidewinkels in Bezug auf das verwendete Kamerasystem sowie die Methode der DOM-Generierung sein. Der Einschneidewinkel in Flugrichtung hängt direkt von folgenden Parametern ab:

- Brennweite,
- Pixelabstand,
- Pixelanzahl in Flugrichtung,
- Überlappung der Nachbarbilder.

Anhand dieser Parameter kann für jedes Kamerasystem unabhängig von der Flughöhe und Bodenauflösung der Einschneidewinkel berechnet werden (siehe Kap. 3.2.2).

Ein kleiner Einschneidewinkel ermöglicht einerseits viele Messpunkte, was für ein besseres Matching von Bäumen sowie viele Bodenpunkte für die DTM-Generierung sinnvoll ist (siehe Abb. 4.1), da bei einem kleinen Einschneidewinkel identische Pixel in zwei zu matchenden Nachbarbildern häufiger sichtbar sind. Andererseits ist ein schleifender Schnitt durch zu spitze Winkel zu vermeiden, da schon sehr geringe Unsicherheiten beim Messen die Lage- und Höhengenaugigkeit deutlich reduzieren.

Ein großer Einschneidewinkel erhöht zum einen die Genauigkeit der Höhenmessung, insbesondere auf ebenen Flächen. Zum anderen kommt es bei einem großen Einschneidewinkel zu Verdeckungen durch die erhöhten Objekte und damit zu Sichtschatten (siehe Abb. 4.2). Dies wiederum führt dazu, dass in diesen Bereichen keine Höhen für das Digitale Höhenmodell abgeleitet werden können und der Count Null beträgt (Sichtbarkeit 0 und 1).

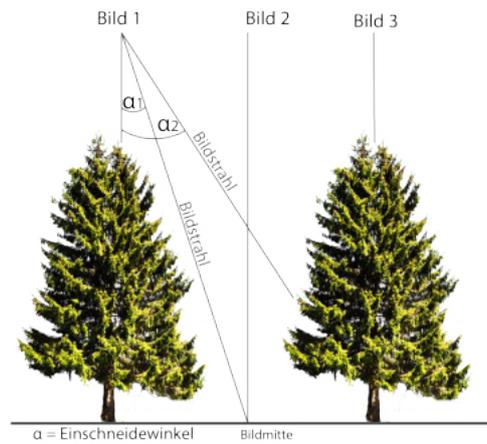


Abb. 4.1: Einfluss des Einschneidewinkels (α)

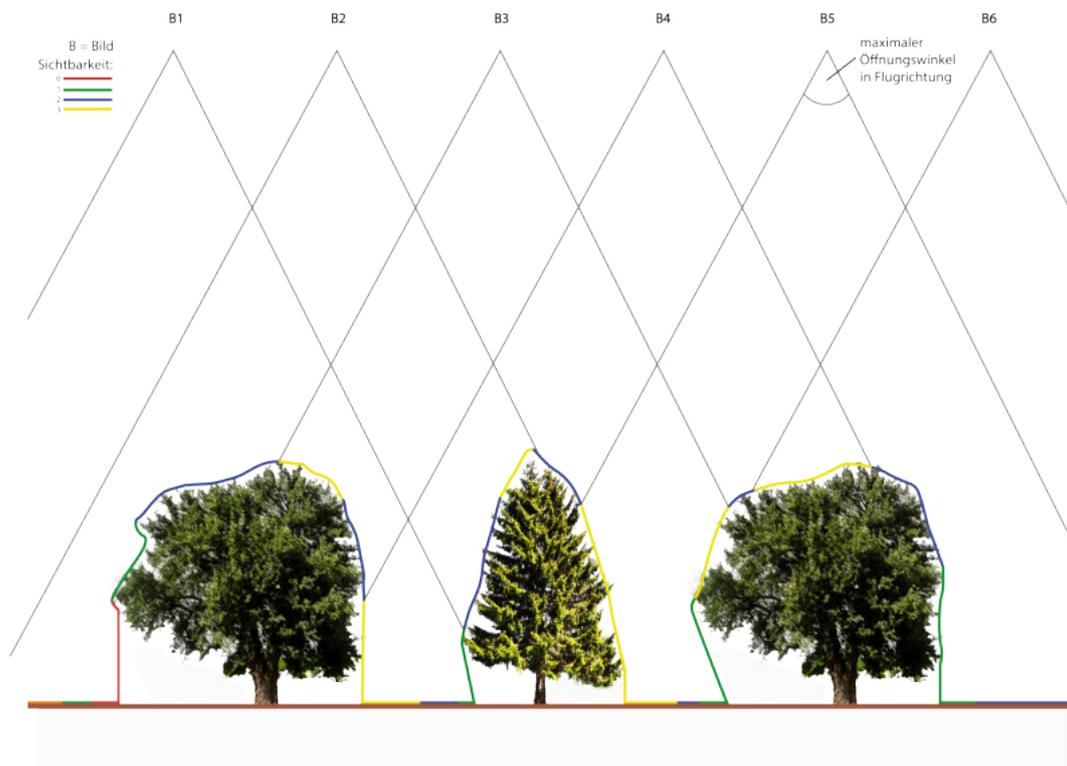


Abb. 4.2: Einfluss des Einschneidewinkels (α) auf die Sichtbeziehungen von Bäumen

4.1.2 Einfluss der Bodenauflösung

Neben dem Einschneidewinkel hat auch die Bodenauflösung (GSD) einen direkten Einfluss auf die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen. Anhand der Befliegung von Baruth, für welche die DOM mit den originalen Bodenauflösungen von 9 cm, 15 cm und 20 cm prozessiert wurden, wird der Einfluss der GSD auf die Qualität der DOM näher untersucht. Dabei wurden alle DOM mit der jeweiligen originalen Bodenauflösung gematcht (Downscale 1, siehe

Kap. 4.2). Da alle drei Flughöhen mit einer Längsüberlappung von deutlich über 90 Prozent vorliegen, konnten für eine detaillierte Analyse des Zusammenhanges von Bodenauflösung und Einschneidewinkel verschiedene Längsüberlappungen prozessiert und ausgewertet werden. Die DOM wurden für alle GSD jeweils mit einer Längsüberlappung von 90, 80, 70 und 60 Prozent gematcht.

Auswertung des Einschneidewinkels für unterschiedliche Längsüberlappungen

Da der Einschneidewinkel anhand der Brennweite und Sensorgröße berechnet werden kann, ist er unabhängig von der Bodenauflösung und dementsprechend für alle GSD bei gleicher Überlappung identisch. Für die MACS MAR liegt der Einschneidewinkel bei 90 Prozent Längsüberlappung bei 2,65 Grad (siehe Abb. 4.3). Bei 80 Prozent Längsüberlappung beträgt der Einschneidewinkel 5,3 Grad. Bei einer 70 prozentigen Längsüberlappung wird ein Einschneidewinkel von 7,9 Grad erreicht und bei 60 Prozent Längsüberlappung liegt der Einschneidewinkel bei 10,5 Grad.

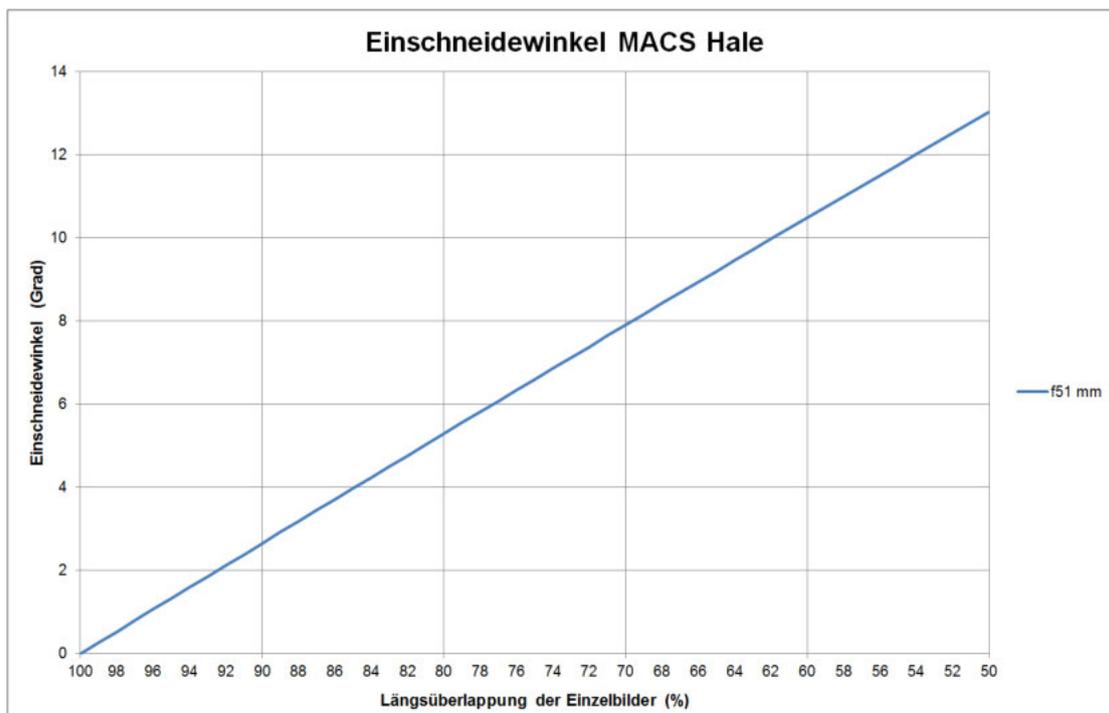


Abb. 4.3: Einschneidewinkel für die MACS MAR mit 51 mm Brennweite

Auswertung der Bodenauflösung

Um den Einfluss der Bodenauflösung auf das Matchingergebnis analysieren zu können, müssen alle GSD mit einer identischen Längsüberlappung und einem sich daraus bedingenden gleichen Einschneidewinkel untersucht werden. Betrachtet man zunächst die Anteile der Pixel, welche nicht gematcht werden konnten (Count Null, siehe Tab. 4.1), so ist der Einfluss der Bodenauflösung klar ersichtlich.

Der Anteil an Pixeln die nicht zugeordnet werden konnten, ist bei einer Bodenauflösung von 20 cm am geringsten und bei 9 cm GSD am größten. Wie Tabelle 4.1 verdeutlicht, nimmt der Anteil der nicht matchbaren Bereiche bei zunehmendem Einschneidewinkel bzw. abnehmender Längsüberlappung bei größeren Bodenauflösungen stärker zu als bei kleineren Bodenauflösungen. Bei einer GSD von 20 cm und einer Längsüberlappung von 90 Prozent konnten nur 0,02 Prozent nicht zugeordnet werden. Bei einer GSD von 9 cm und ebenfalls 90 Prozent Längsüberlappung konnten 1,02 Prozent der Pixel nicht zugeordnet werden. Reduziert man die Längsüberlappung auf 60 Prozent, so konnten bei einer GSD von 20 cm 96,32 Prozent aller Pixel ein Wert zugeordnet werden. Bei einer GSD von 9 cm betrug dieser Wert nur noch 61,58 Prozent.

Tab. 4.1: Nicht gematchte Bereiche (Count Null) für die Befliegung Baruth

GSD	<i>Längsüberlappung</i>			
	<i>90 %</i>	<i>80 %</i>	<i>70 %</i>	<i>60 %</i>
	<i>Count Null (%)</i>	<i>Count Null (%)</i>	<i>Count Null (%)</i>	<i>Count Null (%)</i>
9 cm	1,02	5,00	16,56	38,42
15 cm	0,19	0,69	3,18	10,20
20 cm	0,02	0,20	0,97	3,68

Betrachtet man exemplarisch das gesamte Counterergebnis für eine Längsüberlappung von 80 Prozent wird der Einfluss der Bodenauflösung verdeutlicht. Bei einer GSD von 20 cm konnten lediglich 0,2 Prozent der Pixel im betrachteten Gebiet nicht zugeordnet werden und erhielten einen Count von Null. 94 Prozent aller Pixel hatten dagegen einen Countwert von vier oder höher. Bei einer um die Hälfte reduzierten GSD von 9 cm lag der Anteil der Pixel mit einem Countwert von Null bei fünf Prozent. Nur 65 Prozent der Pixel hatten einen Countwert von vier oder höher.

Untersucht man darüber hinaus das Verhältnis von maximal möglichem Matching zu tatsächlich erreichtem Matching, zeigen sich auch hinsichtlich der Qualität der Matchingergebnisse deutlich bessere Ergebnisse bei einer geringeren GSD (siehe Abb. 4.4). Für die GSD von 20 cm konnten 70,5 Prozent aller Pixel im Untersuchungsgebiet vollständig zugeordnet werden. Bei einer GSD von 15 cm lag dieser Wert bei 66 Prozent. Bei einer GSD von 9 cm konnten nur noch 46,5 Prozent aller Pixel vollständig zugeordnet werden. Auch liegt bei einer GSD von 9 cm der Anteil der Pixel, die nur zu einem Drittel oder zur Hälfte zugeordnet werden konnten deutlich über den Counterergebnissen für die GSD von 15 cm oder 20 cm.

Analysiert man die räumliche Verteilung der Countwerte der beiden Prozessierungen (siehe Abb. 4.5 und Abb. 4.6), so ist erkennbar, dass im Waldbereich (siehe Abb. 4.7) bei einer GSD von 9 cm im Vergleich zu einer GSD von 20 cm ein größerer Prozentanteil nicht gematcht wird. Um Pixel matchen zu können, müssen diese in zwei aufeinanderfolgenden Bildern eindeutig zugeordnet, d.h. erkannt werden. Diese Wiedererkennung eines Pixels in zwei aufeinanderfolgenden Bildern ist für Bäume jedoch oft problematisch. Die Bewegung der Blätter führt dazu, dass diese nicht zugeordnet werden können. Bei der Ableitung von

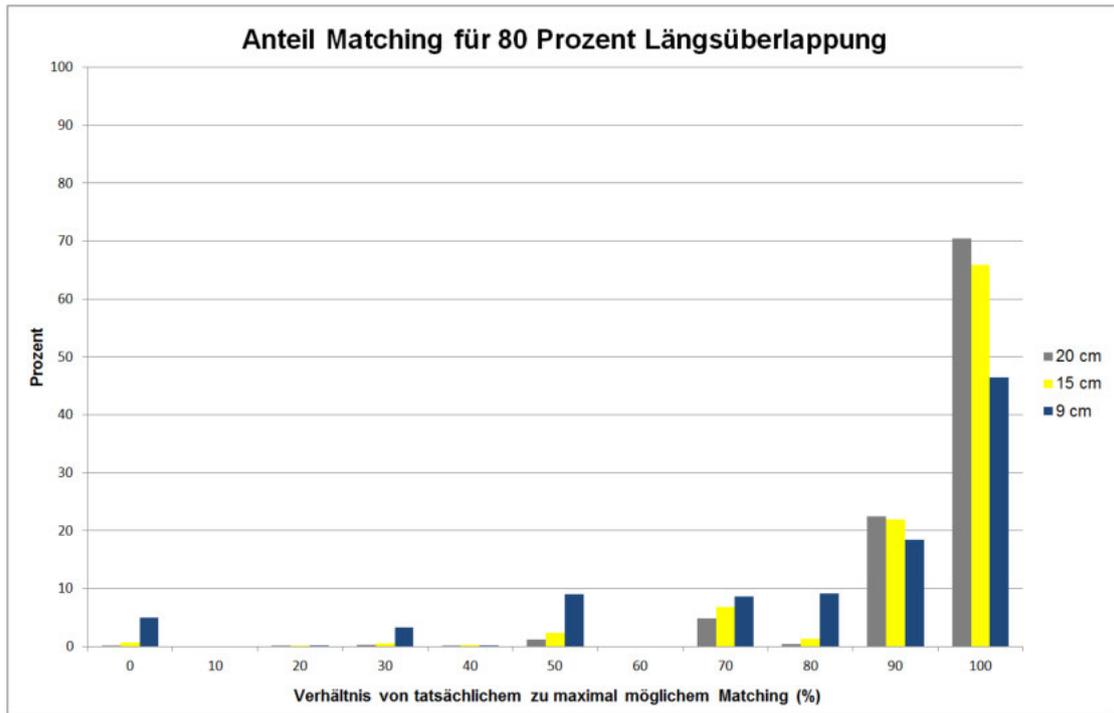


Abb. 4.4: Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichem Matchings für das Untersuchungsgebiet Baruth

digitalen Oberflächenmodellen können nur zum Zeitpunkt der Aufnahmen unbewegt Objekte und keine sich bewegenden Objekte gematcht werden. Je größer die GSD der Luftbilder ist, desto größer ist auch dieser Effekt, da schon leichte Bewegungen zu einem Fehlmatching führen können. Bei einer größeren GSD werden mehrere Blätter in einem Pixel gemischt. Dies führt dazu, dass kleinere Bewegungen der Blätter innerhalb der Auflösung keine Auswirkung auf das Matching haben.

Neben der Bewegung spielt auch die Wiedererkennung von einzelnen Pixeln aufgrund deren Größe bei der Entstehung von nicht matchbaren Bereichen eine entscheidende Rolle. Je größer die Auflösung der Bilder ist, desto genauere Details können erkannt werden. Aufgrund der Morphologie von Bäumen führt dies jedoch zu Problemen bei der Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen. Die Oberfläche von Bäumen ist keine glatte Oberfläche, sie ist durch eine hohe Rauigkeit gekennzeichnet, außerdem stehen Äste mit Blättern hervor. Diese können bei einer geringen GSD in einem Einzelbild erkannt werden. Betrachtet man jedoch denselben Ast oder dasselbe Blatt im nachfolgenden Luftbild, so werden der Ast und das Blatt aus einem anderen Blickwinkel stark verändert dargestellt. Dies führt wiederum dazu, dass diese Bildpunkte nicht automatisch wiedererkannt werden und die Bereiche dementsprechend nicht eindeutig zugeordnet und auch keine Höheninformationen abgeleitet werden können.

Bei einer größeren GSD wird die Oberfläche von Bäumen automatisch geglättet. Das heißt, mehrere Äste und Blätter werden in einem Pixel gemischt dargestellt und sind nicht mehr einzeln erkennbar. Diese Mischung und Glättung der Oberfläche führt einerseits zu geringerem Detailreichtum auf der Baumoberfläche, ermöglicht andererseits aber auch die eindeutige Zuordnung von Bildpunkten sowie die Ableitung von Höheninformationen.

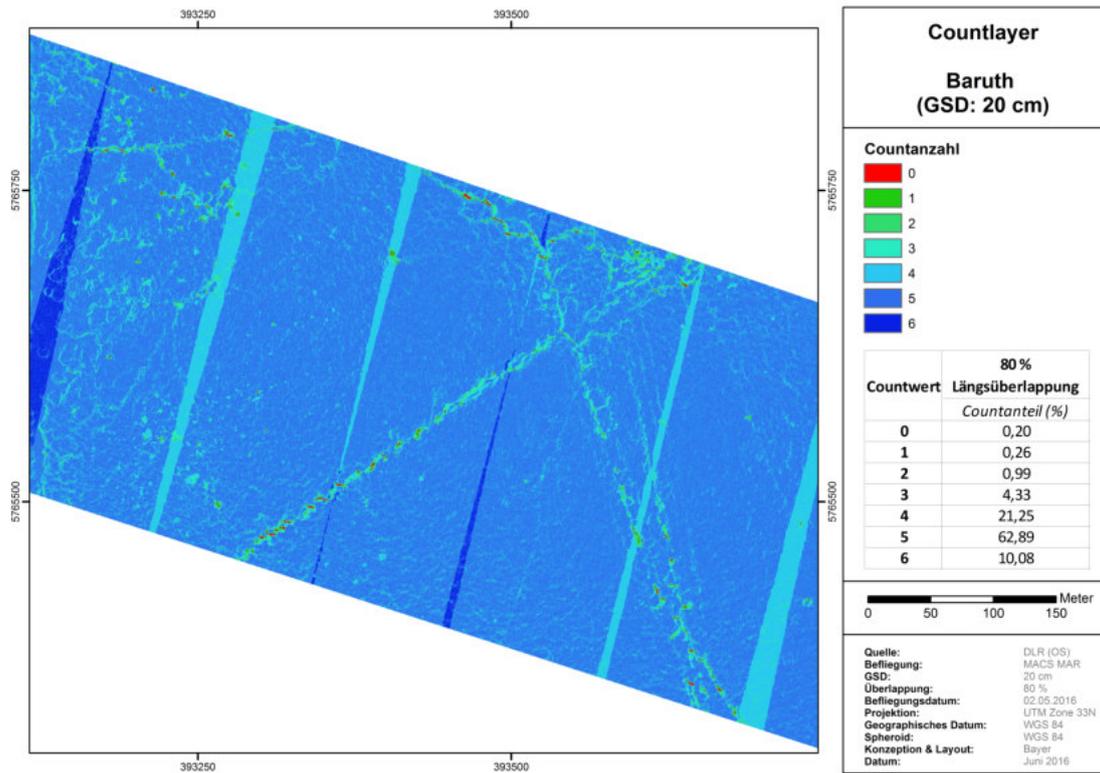


Abb. 4.5: Countlayer Baruth mit einer GSD von 20 cm und 80 Prozent Längsüberlappung

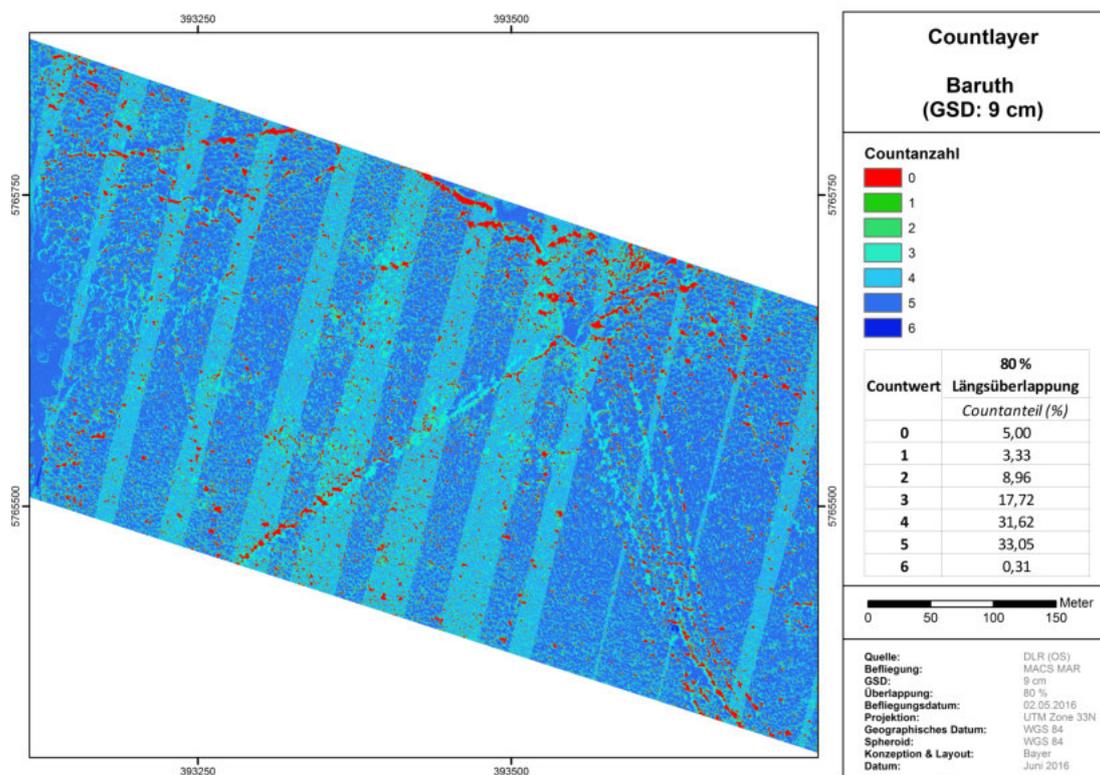


Abb. 4.6: Countlayer Baruth mit einer GSD von 9 cm und 80 Prozent Längsüberlappung

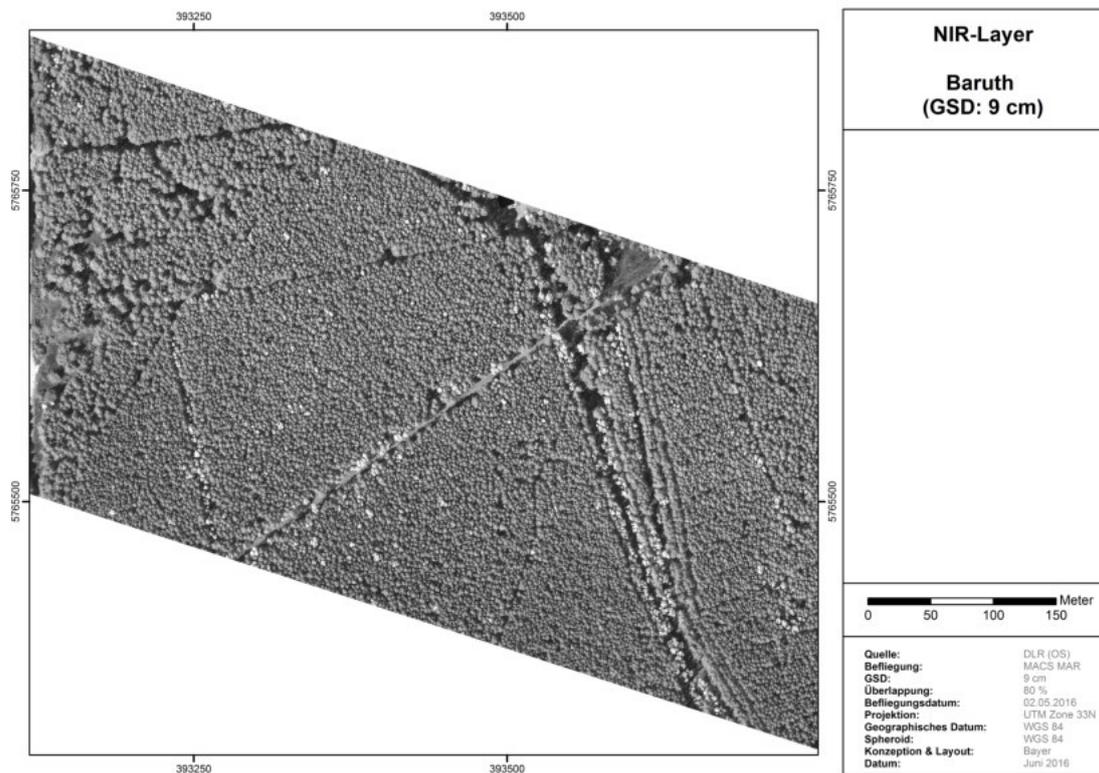


Abb. 4.7: NIR-TOM Baruth mit einer GSD von 9 cm

Auswertung der Bodenauflösung bezogen auf einen Einzelbaum

Zum Verständnis des Einflusses der Bodenauflösung auf das Matching von Bäumen ist eine Analyse eines Einzelbaumes erforderlich. Wie Abbildung 4.8 verdeutlicht, kann es bei einer hohen Auflösung aufgrund der hohen Komplexität der Baumoberfläche zu winkelabhängigen Veränderungen kommen. Das heißt in einem Bild wird beispielsweise ein Ast von der Seite gesehen, während im Nachbarbild ein darüber liegendes Blatt von oben gesehen wird. Bei einer geringeren Auflösung reduziert sich automatisch auch die Komplexität der Baumoberflächen, da weniger Strukturen beobachtbar sind und damit eine Glättung der Oberfläche einhergeht. Dadurch kommt es zu einer Verringerung der winkel- und auflösungsabhängigen Komplexität und einer Erhöhung des Counts. Zusätzlich ist auch der Einfluss der Bewegung der Bäume geringer, da sich die Bewegung der Blätter und Äste innerhalb der Auflösung bewegt.

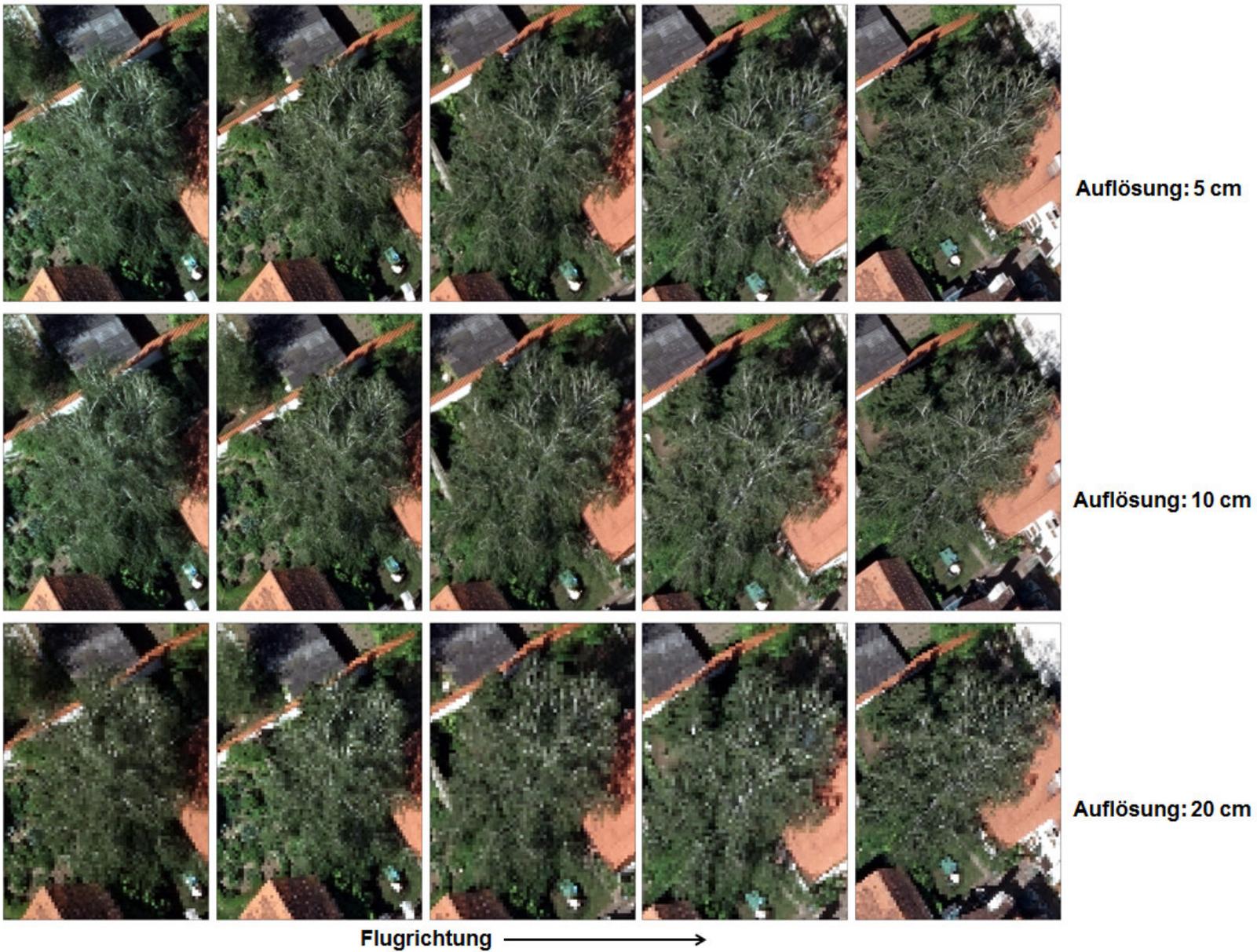


Abb. 4.8: Sichtbeziehungen auf einen Baum aus verschiedenen Bildern

Zusammenfassung der Ergebnisse für die Analyse der Bodenauflösung

Wie die Analysen gezeigt haben, hat die Bodenauflösung einen signifikanten Einfluss auf die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen aus Luftbildern. Dies trifft in besonderem Maße für Bäume, Büsche und Waldbereiche zu (siehe Abb. 4.6). Während bei künstlichen und ebenen Objekten eine kleine GSD (höhere Auflösung) zu einer Verbesserung der Qualität der Digitalen Oberflächenmodelle führen kann, verschlechtert sich das Matchingergebnis für Bäume mit abnehmender GSD signifikant.

Bei einer Bodenauflösung von unter 10 cm können durch Bewegungs- und richtungsabhängige Effekte große Bereiche auf und zwischen Bäumen nicht oder nur schlecht gematcht werden. Eine geringe Bodenauflösung erfordert daher einen kleinen Einschneidewinkel von unter 5 Grad, damit auch auf Bäumen noch ausreichende Bereiche gematcht werden können. Bei einer GSD von über 10 cm können auch mit einem Einschneidewinkel zwischen 5 und 10 Grad noch sehr gute Matchingergebnisse erzielt werden.

Zieht man die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung heran, so ist eine GSD von 15 cm bis 20 cm eine geeignete Auflösung für die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen im Waldbereich. Eine noch niedrigere GSD von 30 cm bis 50 cm führt zu größeren Höhenungenauigkeiten aufgrund der schlechteren Auflösung sowie zu atmosphärischen Effekten aufgrund der großen Flughöhe.

4.1.3 Einfluss der Längs- und Querüberlappung

Neben der Brennweite einer Luftbildkamera (siehe Kap. 4.1.4) wird der Einschneidewinkel von der prozentualen Überlappung der Einzelbilder in Flugrichtung bestimmt. Ziel dieses Kapitels ist daher die systematische Analyse des Einflusses der Längs- und Querüberlappung auf die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen. Alle Prozessierungen wurden mit gleichen Prozessierungsparametern durchgeführt. Dabei wurden für München folgende Einstellungen bei der Prozessierung der DOM mit SGM gewählt:

- Alle Digitalen Oberflächenmodelle wurden mit einer um die Hälfte reduzierten Bodenauflösung (Downscale 2, siehe Kap. 4.2) gematcht.
- Bei allen Matchings wurden jeweils nur das vorangegangene Bild und das nachfolgende Bild verwendet.
- Die Bildverbände wurden sowohl ohne Quermatching (Noacross) als auch mit Quermatching (Across) prozessiert.

Das Untersuchungsgebiet für die Analyse der Längs- und Querüberlappung hat eine Größe von 98 ha. Der Anteil der Baummaske am Gesamtgebiet liegt bei 15,6 Prozent (siehe Anhang 4).

Auswertung des Einschneidewinkels für die DMC II

Wie Abbildung 4.9 veranschaulicht, hat die Längsüberlappung der Einzelbilder einen sehr großen Einfluss auf die Größe des Einschneidewinkels. Mit abnehmender Überlappung der Einzelbilder steigt der Einschneidewinkel annähernd linear an. Bei der maximal gegebenen Längsüberlappung von 80 Prozent liegt der Einschneidewinkel bei 9,8 Grad. Bei einer 60-prozentigen Längsüberlappung liegt der Einschneidewinkel bei 19 Grad.

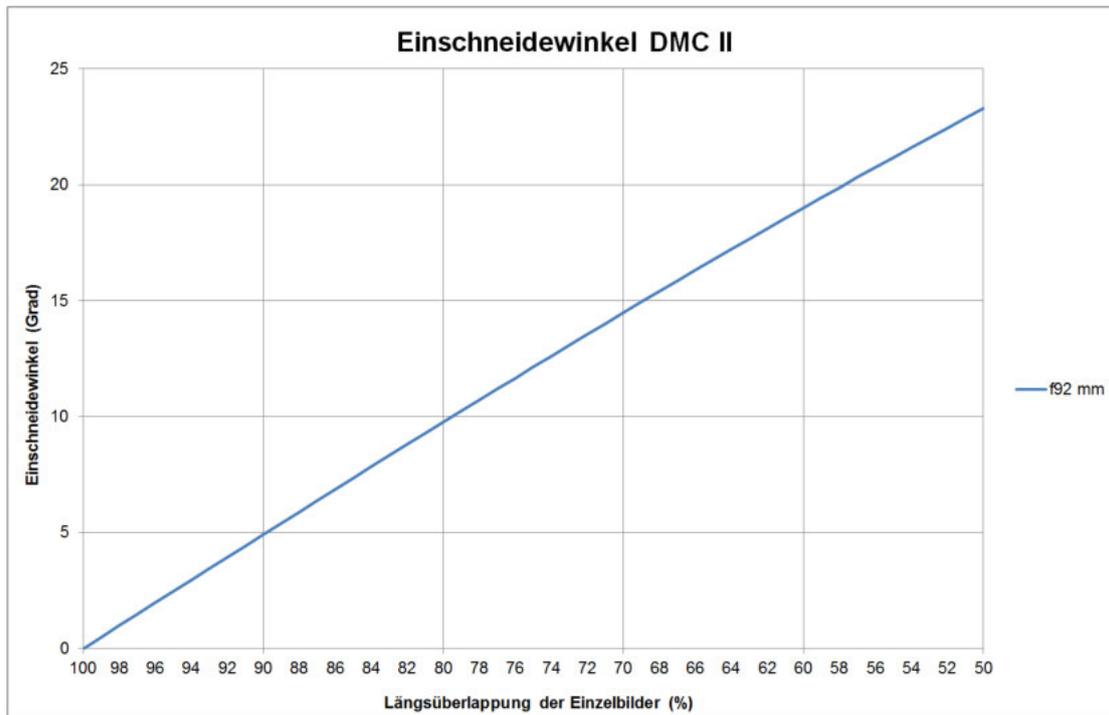


Abb. 4.9: Einschneidewinkel für die DMC II mit 92mm Brennweite

Auswertung der Einzelstreifen

Untersucht man die Längsüberlappung für München innerhalb eines einzelnen Flugstreifens, wird der große Einfluss des Einschneidewinkels und damit der Längsüberlappung deutlich (siehe Tab. 4.2). Bei einer Längsüberlappung von 80 Prozent konnten im gesamten Untersuchungsgebiet München ca. 6 Prozent der Pixel nicht gematcht werden. Für die Baummaske lag der Anteil leicht erhöht bei 6,4 Prozent. Bei einer 60-prozentigen Längsüberlappung lag der Anteil an Pixeln, die nicht zugeordnet werden konnten, im Untersuchungsgebiet bei 38,5 Prozent. Bezogen auf die Baummaske von München konnten mit über 64 Prozent ca. zwei Drittel der gesamten Baummaske nicht gematcht werden.

Bei einer Analyse der Countlayer von Baruth, welche mit einer Längsüberlappung von 90, 80, 70 und 60 Prozent prozessiert wurden, zeigt sich darüber hinaus, dass mit zunehmendem Einschneidewinkel der Anteil der nicht gematchten Bereiche mit einem Countwert von Null exponentiell ansteigt (siehe Abb. 4.10 und 4.24). Dies verdeutlicht die große Bedeutung des Einschneidewinkels für die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen. Für Baruth ist

ab einer Längsüberlappung von 80 Prozent ein sprunghafter Anstieg der nicht matchbaren Bereiche zu verzeichnen. Das entspricht einem Einschneidewinkel von 5,3 Grad.

Tab. 4.2: Countanteile für Einzelstreifen mit 80 und 60 Prozent Längsüberlappung (München)

Countwert	80 % Längsüberlappung (UG)	80 % Längsüberlappung (Baummaske)	60 % Längsüberlappung (UG)	60 % Längsüberlappung (Baummaske)
	Countanteil (%)	Countanteil (%)	Countanteil (%)	Countanteil (%)
0	5,96	6,36	38,45	64,15
1	3,54	5,13	6,70	7,51
2	8,28	13,32	32,94	20,09
3	12,77	20,03	21,91	8,25
4	21,19	24,68		
5	41,89	27,81		
6	6,36	2,67		

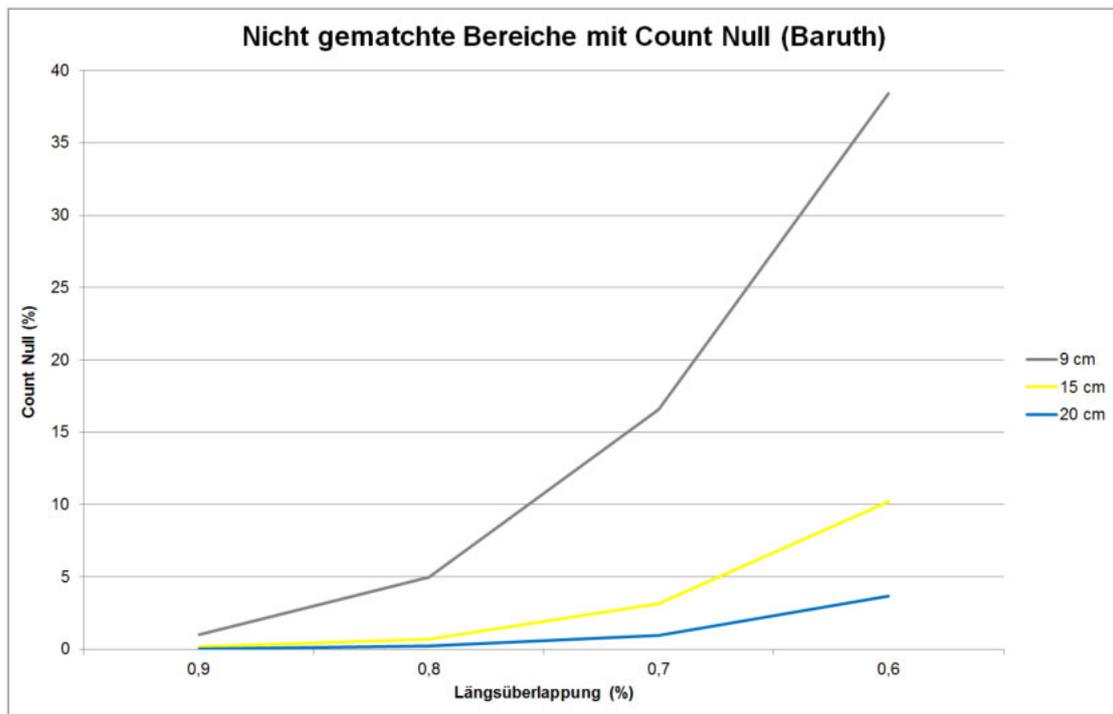


Abb. 4.10: Verlauf des Anteils der Countwerte mit Null in Abhängigkeit von der Längsüberlappung

Die Ergebnisse der absoluten Countwerte von München werden auch bei der Betrachtung der Qualität des Matchings für die Einzelstreifen bestätigt. Auch hier zeigt sich der hohe Anteil nicht gematchter Pixel für die 60 Prozent Längsüberlappung (siehe Abb. 4.11). Betrachtet man nur die 80-prozentige Längsüberlappung für das gesamte Untersuchungsgebiet und die Baummaske, zeigt sich, dass für das gesamte Untersuchungsgebiet der Anteil vollständig gematchter Pixel bei 48 Prozent liegt, während er für die Baummaske bei 30 Prozent liegt. Da der Anteil nicht gematchter Bereiche gleich ist, werden im Bereich von Bäumen bei einem

Einschneidewinkel von ca. 10 Grad große Bereiche innerhalb eines Flugstreifens gematcht. Allerdings kommt es zwischen einzelnen Bildpaaren bereits zu Sichtschatten, die jedoch mit zuordenbaren Bildpunkten aus anderen Bildpaaren aus demselben Flugstreifen ausgefüllt werden können. Bei einem Einschneidewinkel von 19 Grad erhöhen sich die Sichtschatten innerhalb eines Flugstreifens exponentiell und können auch nur sehr selten mit anderen Bildpaaren ausgeglichen werden. Für die Baummaske von München konnten nur in 18,2 Prozent der Fälle mit Informationen aus benachbarten Bildpaaren ausgefüllt werden.

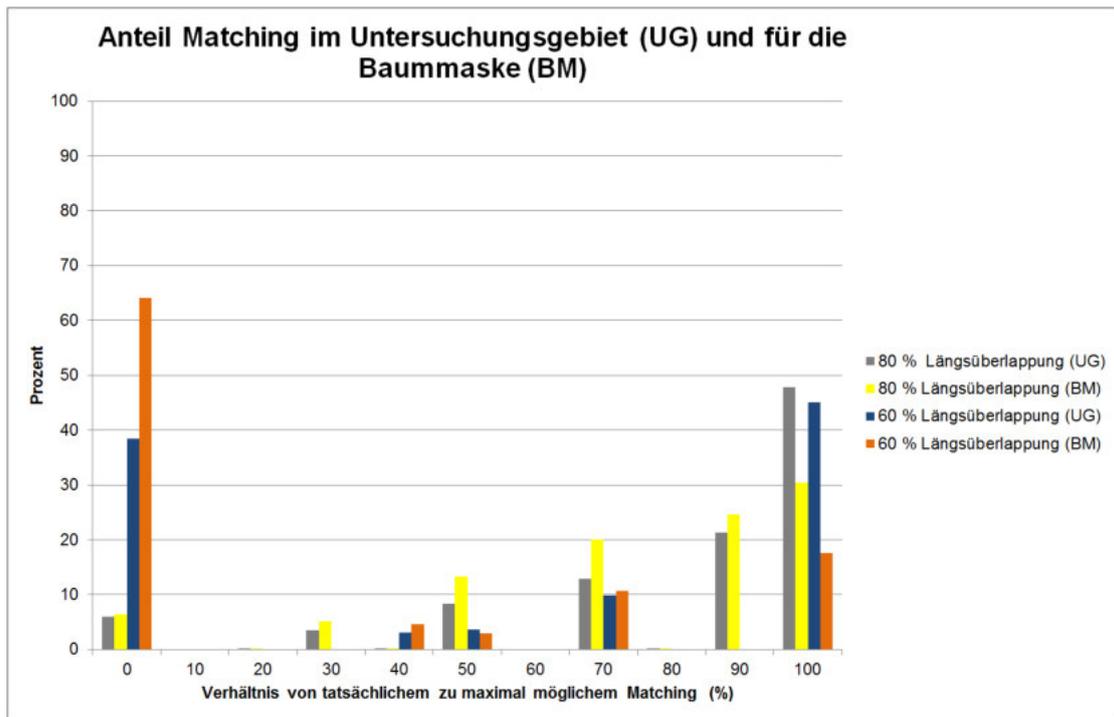


Abb. 4.11: Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichem Matchings für das Untersuchungsgebiet und die Baummaske München (Einzelstreifen)

Auswertung der Bildverbände

Wie die Auswertung der einzelnen Flugstreifen gezeigt hat, ist für ein vollständiges Matching ein Einschneidewinkel von maximal 10 Grad notwendig. Für die DMC II Befliegung von München bedeutet dies eine 80-prozentige Längsüberlappung. Ziel der Auswertung der Bildverbände, d.h. mehrerer benachbarter Flugstreifen, ist einerseits eine Untersuchung der mindestens notwendigen Querüberlappung. Das heißt es soll untersucht werden, ob bzw. ab welcher Querüberlappung eine signifikante Qualitätsverbesserung der Digitalen Oberflächenmodelle erreicht werden kann. Eine weitere Zielsetzung der statistischen Auswertung der Bildverbände ist eine Analyse, ob bei einem hohen Anteil von nicht gematchten Bereichen (NoData) im Längsmatching (Einschneidewinkel von über 10 Grad) die fehlenden Informationen durch ein zusätzliches Quermatching mit Nachbarstreifen ausgefüllt werden können.

Wertet man die unterschiedlichen Querüberlappungen von München aus, so ist zwischen der 80- und 60-prozentigen Querüberlappung sowohl für das gesamte Untersuchungsgebiet, als auch für den Bereich der Baummaske, kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der nicht matchbaren Bereiche mit einem Countwert von Null erkennbar (siehe Tab. 4.3). Sowohl für die 80-prozentige als auch für die 60-prozentige Querüberlappung betrug der Anteil der nicht matchbaren Bereiche jeweils ca. ein Prozent. Betrachtet man zusätzlich noch die Querüberlappung von 40 Prozent, so kommt es vor allem in Bereich der Baummaske zu einem leichten Anstieg der nicht matchbaren Bereiche auf 3,5 Prozent ohne Quermatching. Wird ein Quermatching durchgeführt, reduziert sich der Anteil der nicht matchbaren Bereiche auf drei Prozent.

Analysiert man für jede Querüberlappung die Ergebnisse aus der Prozessierung mit (Across) und ohne (Noacross) Quermatching, so ist auffällig, dass bei einer sehr hohen Querüberlappung von 80 Prozent die Ergebnisse für die Prozessierung mit Quermatching geringfügig schlechter ausfallen als die Ergebnisse ohne Quermatching. Der Grund hierfür liegt in den vom DLR verwendeten SGM und seinen Filtermethoden. Für die Prozessierungen mit einer Querüberlappung von 60 und 40 Prozent führte die Durchführung eines Quermatchings zu einer leichten Reduzierung des Anteils der Counts mit dem Wert Null.

Tab. 4.3: Anteile für den Countwert Null für das Untersuchungsgebiet und die Baummaske von München bei einer 80 prozentigen Längsüberlappung

Befliegung (Längsüberlappung / Querüberlappung in %)	Countanteil in Prozent für Countwert 0	
	Untersuchungsgebiet	Baummaske
80 / 80 Noacross	0,96	0,71
80 / 80 Across	1,54	1,07
80 / 60 Noacross	1,11	1,27
80 / 60 Across	0,86	1,02
80 / 40 Noacross	1,90	3,47
80 / 40 Across	1,50	2,90

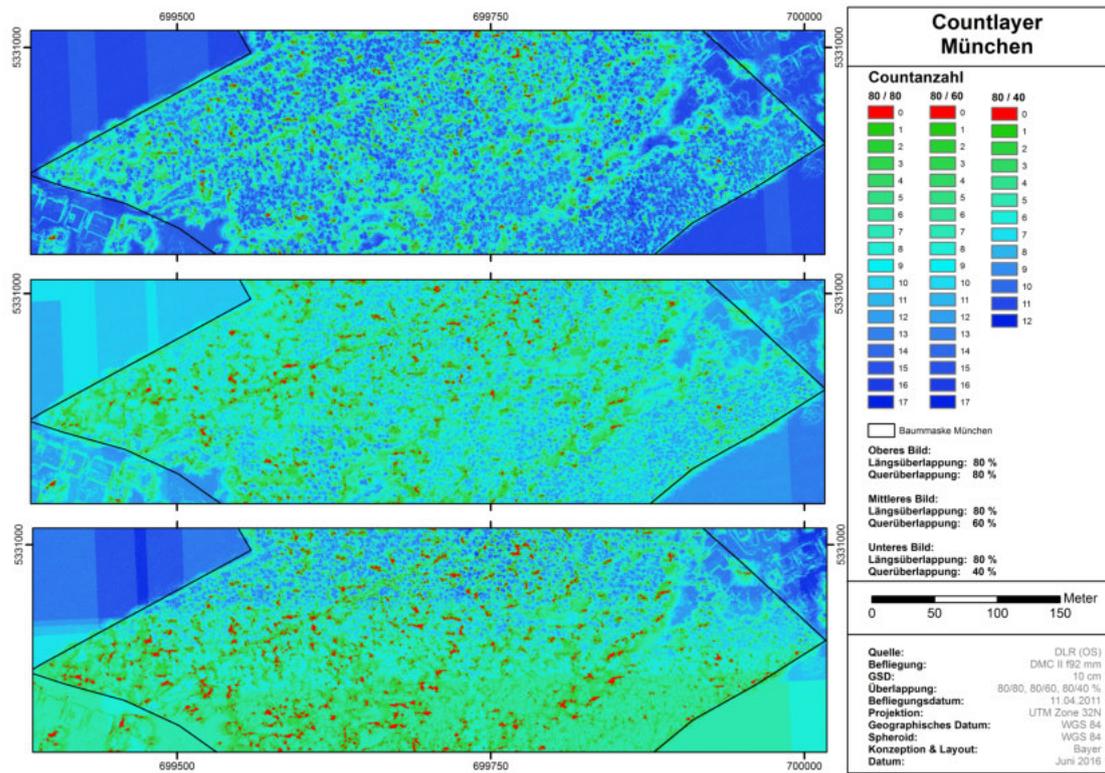
Abbildung 4.12 zeigt das Ergebnis des Countlayers für eine Querüberlappung von 80 Prozent (oben), 60 Prozent (Mitte) sowie 40 Prozent (unten). Wie der Countlayer für die 40-prozentige Querüberlappung zeigt, führt die fehlende Querüberlappung vor allem in den Bereichen mit einer geringeren Querüberlappung zu einem leichten Anstieg der nicht matchbaren Bereiche in diesen Gebieten. Ein Einfluss von echten Schatten kann ausgeschlossen werden, da diese auch bei einer höheren Querüberlappung zu nicht matchbaren Bereichen führen würden. Bei einer näheren Betrachtung des Verhältnisses von tatsächlich erreichtem Count zu maximal möglichem Count (siehe Abb. 4.13) zeigt sich, dass eine hohe Querüberlappung zu keiner signifikanten Erhöhung der Qualität der Digitalen Oberflächenmodelle führt.

Wie die Auswertung der einzelnen Flugstreifen gezeigt hat, führt eine geringe Längsüberlappung und eine dadurch bedingter großer Einschneidewinkel zu deutlichen Sichtschatten und nicht matchbaren Bereichen. Für den Bereich der Baummaske konnte für über zwei Drittel der

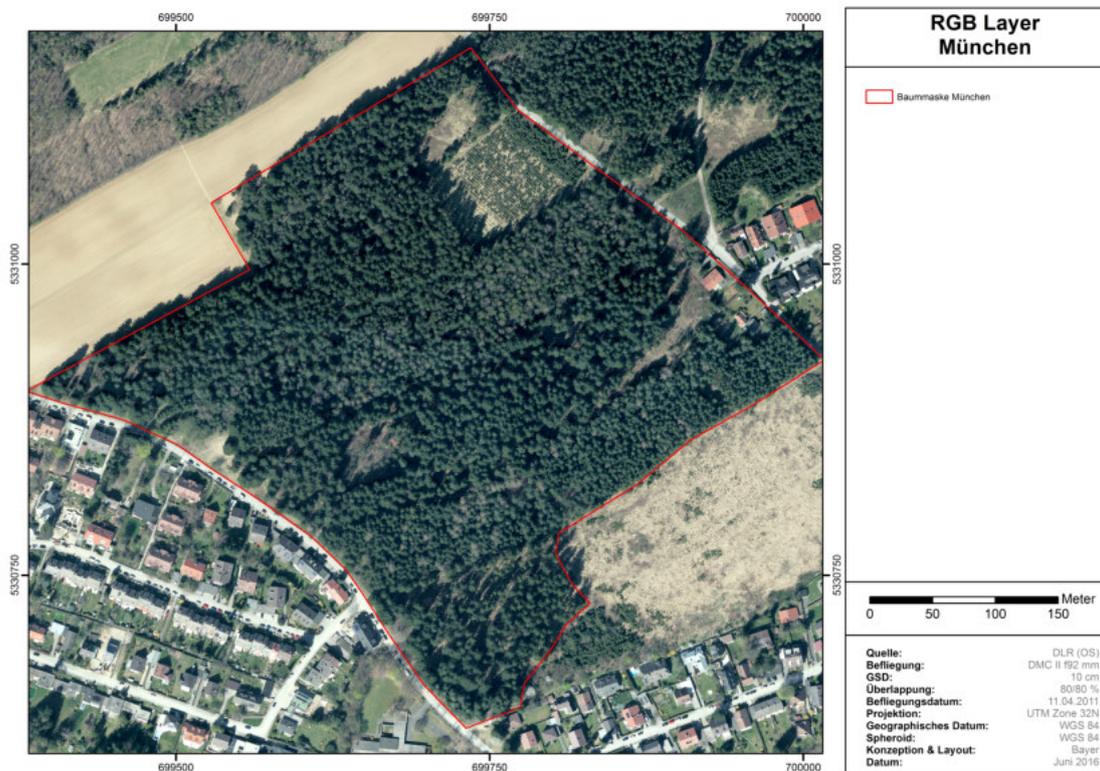
Pixel kein Matching durchgeführt werden. Tabelle 4.4 zeigt, dass der Anteil nicht matchbarer Bereiche durch weitere Querstreifen leicht reduziert werden kann. Allerdings, sind die nicht matchbaren Bereiche sowohl für die Prozessierungen mit als auch ohne Quermatching mit Werten zwischen 45 und 57 Prozent weiterhin sehr hoch. Die Durchführung eines Quermatchings führt dabei zu keiner signifikanten Reduzierung des Anteils nicht matchbarer Bereiche. Für die 60 prozentige Querüberlappung verschlechtern sich sogar die Ergebnisse bei der Anwendung eines Quermatchings. Der Grund liegt auch hier wieder in der von SGM verwendeten Filtermethode.

Tab. 4.4: Anteile für den Countwert Null für das Untersuchungsgebiet und die Baummaske von München bei einer 60 prozentigen Längsüberlappung

Befliegung (Längsüberlappung / Querüberlappung in %)	Countanteil in Prozent für Countwert 0	
	<i>Untersuchungsgebiet</i>	<i>Baummaske</i>
60 / 60 Noacross	24,75	45,87
60 / 60 Across	32,39	51,06
60 / 40 Noacross	30,50	57,16
60 / 40 Across	27,88	52,99



(a) Countlayer für die Baummaske von München ohne Quermatching



(b) RGB Layer für die Baummaske von München ohne Quermatching

Abb. 4.12: RGB und Countlayer für die Baummaske von München

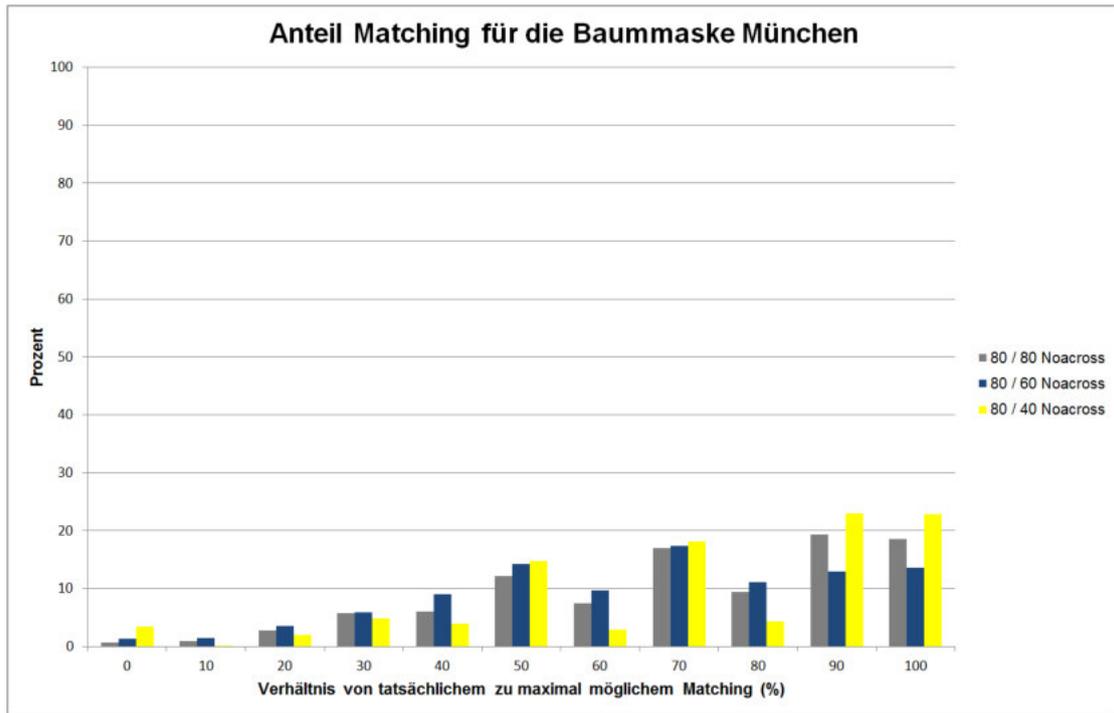


Abb. 4.13: Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings für die Baummaske von München (Bildverband)

Zusammenfassung der Ergebnisse für die Analyse der Längs- und Querüberlappung

Die statistische Auswertung der Längs- und Querüberlappung einer Luftbildbefliegung zeigt den großen Einfluss des Einschneidewinkels auf das Ergebnis der abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodelle. Da der Einschneidewinkel direkt von der Überlappung der Einzelbilder bestimmt wird, hat auch die Längs- und Querüberlappung einer Luftbildbefliegungen einen sehr großen Einfluss auf Qualität der DOM. Die Auswertung zeigt, dass der Einschneidewinkel für die Längsüberlappung bei höchstens 10 Grad liegen muss. Ein größerer Einschneidewinkel führt vor allem im Bereich von Bäumen zu großen Sichtschatten und damit nicht matchbaren Bereichen. Für die DMC II müssen die einzelnen Luftbilder mindestens mit einer 80 prozentigen Längsüberlappung aufgenommen werden. Die Auswertung der Längsüberlappung von Baruth zeigt, dass der optimale Einschneidewinkel bei ungefähr 5 Grad liegt.

Bei der statistischen Auswertung der Querüberlappung zeigt sich, dass bei einem Einschneidewinkel von 10 Grad und weniger in Längsrichtung keine sehr hohe Querüberlappung notwendig ist. Für die DMC II kann trotzdem eine 60 prozentige Querüberlappung empfohlen werden, da mit dieser Querüberlappung alle Bereiche des gesamten Aufnahmegebietes von mindestens zwei Flugstreifen abgedeckt werden.

Bei einer Querüberlappung von nur 40 Prozent werden einige Teilbereiche des gesamten Aufnahmegebietes von nur einem Flugstreifen abgedeckt (siehe Abb. 4.14). Dies führt wiederum in diesen Bereichen für Bäume zu Sichtschatten, die nicht durch Bildpaare aus den Nachbarbildstreifen ausgeglichen werden können. Die Analyse der Längs- und Querüberlappung hat darüber hinaus gezeigt, dass durch einen großen Einschneidewinkel entstehende Sichtschatten durch eine hohe Querüberlappung im Bereich von dicht stehenden Bäumen weder durch ein Längsmatching in benachbarten Flugstreifen noch durch ein Quermatching ausgeglichen werden können. Dies lässt sich dahingehend erklären, dass alle Luftbildkameras keine quadratischen Sensoren verwenden. Alle kommerziellen Matrixkameras verfügen über einen rechteckigen Sensor, bei denen der maximale Öffnungswinkel quer zur Flugrichtung größer ist, als der maximale Öffnungswinkel in Flugrichtung. Aus diesem Grund ist der Einschneidewinkel quer zur Flugrichtung auch größer als der Einschneidewinkel in Flugrichtung und das Matchingergebnis quer zur Flugrichtung schlechter als in Flugrichtung.



Abb. 4.14: Flugstreifen München mit einer Querüberlappung von 40 Prozent

4.1.4 Einfluss der Brennweite

Ziel dieses Kapitels ist die Untersuchung des Einflusses der Brennweite bei gleichen Prozessierungsparametern auf die Qualität des erstellten Digitalen Oberflächenmodelles. Parameter für die Erstellung des DOM mit SGM wurden für alle Prozessierungen gleich mit folgenden Einstellungen gewählt:

- Um den Einfluss der Brennweite in Flugrichtung analysieren zu können, wurde zunächst kein Quermatching durchgeführt, d.h., es wurden ausschließlich Bildpaare innerhalb eines Flugstreifens in das Matching einbezogen.
 - In einem weiteren Prozessierungsschritt wurde anschließend auch ein Quermatching durchgeführt. Dabei wurde jeweils das rechte und linke Bild der direkt angrenzenden Nachbarstreifen mit einbezogen.
- Für jedes Bild wurden nur das direkt vorangegangene und das direkt nachfolgende Bild für das Matching verwendet.
- Aufgrund der hohen GSD der Originalbilder und um nicht den Einfluss der Auflösung zu analysieren, (siehe Kap. 4.1.2) wurde nicht in Originalauflösung gematcht. Alle DOM wurden mit Downscale 3 gematcht, d.h. die Originalauflösung wurde vor dem Matching um das Dreifache reduziert.

Die Untersuchung des Einflusses der Brennweite wurde beispielhaft mit der UltraCam Eagle mit 80 mm und 210 mm Brennweite durchgeführt. Für die Analyse der Brennweite wurden

sowohl einzelne Flugstreifen als auch Bildverbände mit jeweils 5 Flugstreifen ausgewertet. Innerhalb der einzelnen Flugstreifen wurde die 80 mm Brennweite mit einer 80-prozentigen und einer 60-prozentigen Längsüberlappung der Einzelbilder gematcht. Die 210 mm Brennweite wurde mit einer 70-prozentigen Längsüberlappung gematcht. Die Bildverbände der 80 mm Brennweite wurden mit einer Längs- / Querüberlappung von 80 / 70 Prozent sowie 60 / 70 Prozent gematcht. Der Bildverband mit einer Brennweite von 210 mm wurde mit einer 70-prozentigen Längs- und Querüberlappung gematcht. Das analysierte Untersuchungsgebiet hat eine Fläche von 44,5 Hektar. Der Anteil der betrachteten Baummaske beträgt 11,7 Prozent.

Auswertung des Einschneidewinkels bei unterschiedlicher Brennweite

Bei gleichem Pixelabstand und gleicher Pixelanzahl des Sensors in Flugrichtung hat die Brennweite einen sehr großen Einfluss auf den Einschneidewinkel (siehe Abb. 4.15). So beträgt der Einschneidewinkel für die UltraCam Eagle mit 210 mm Brennweite bei einer Längsüberlappung von 70 Prozent 5,5 Grad, während der Einschneidewinkel für die UltraCam Eagle mit 80 mm Brennweite bei einer 80-prozentigen Längsüberlappung 9,7 Grad beträgt. Bei einer Längsüberlappung von 60 Prozent liegt der Einschneidewinkel bei 18,8 Grad.

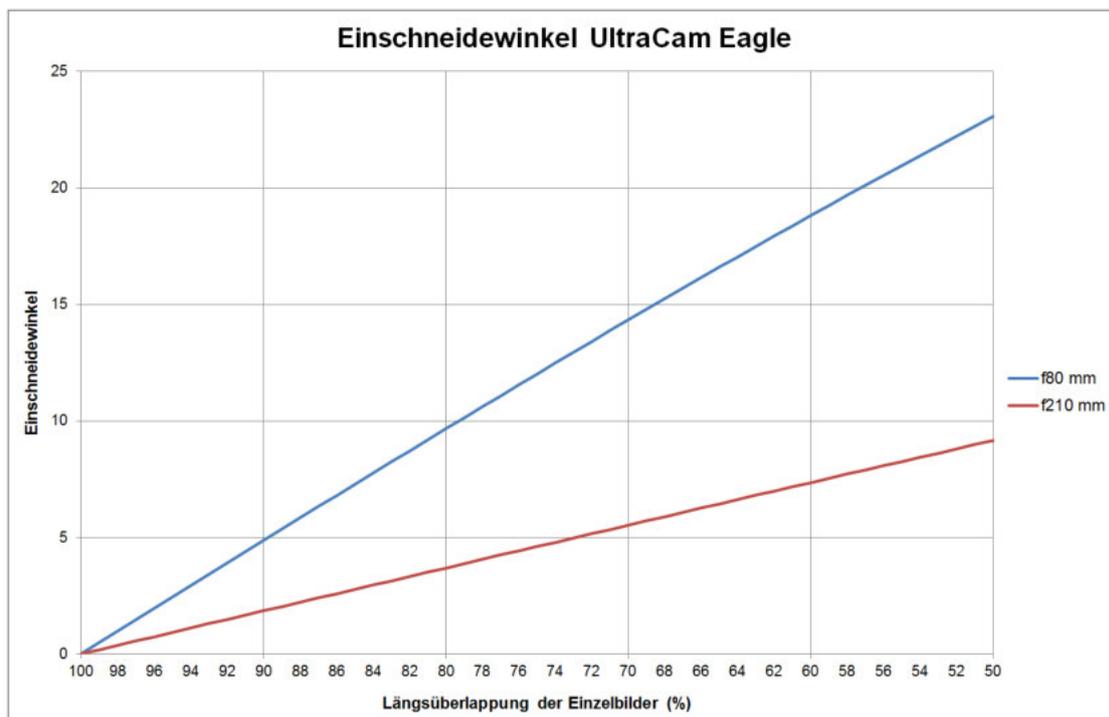


Abb. 4.15: Einschneidewinkel für die UltraCam Eagle mit 80 mm und 210 mm Brennweite

Auswertung der Einzelstreifen

Bei der Betrachtung der einzelnen Counts zeigt sich, dass die Brennweite bei vergleichbaren Überlappungen und damit unterschiedlichem Einschneidewinkel Einfluss auf die Ableitung der DOM hat. Da die Anzahl der absoluten Counts mit der Überlappung variiert, ist vor allem die Betrachtung der Counts mit dem Wert null aufschlussreich. Bei diesen Werten konnte kein Höhenwert abgeleitet und damit auch kein Oberflächenmodell generiert werden.

Für die 210 mm Brennweite mit einer 70er Längsüberlappung und einem Einschneidewinkel von 5,53 Grad liegt der Anteil der nicht gematchten Pixel bei 4,5 Prozent. Bei der 80 mm Brennweite mit einer Längsüberlappung von 80 Prozent und einem daraus resultierenden Einschneidewinkel von 9,67 Grad konnten nur für drei Prozent der Pixel im Untersuchungsgebiet keine Höhe generiert werden. Bei einer Reduzierung der Längsüberlappung auf 60 Prozent und einer Erhöhung des Einschneidewinkels auf 18,83 Grad konnten für 16,8 Prozent der Pixel im Untersuchungsgebiet keine Höhen abgeleitet werden (siehe Tab. 4.5).

Tab. 4.5: Anzahl der Counts innerhalb des Untersuchungsgebietes Gleisdorf für einen Einzelstreifen

Countwert	f210 mm	f80 mm	f80 mm
	70 % Längsüberlappung	80 % Längsüberlappung	60 % Längsüberlappung
	<i>Countanteil (%)</i>	<i>Countanteil (%)</i>	<i>Countanteil (%)</i>
0	4,50	3,08	16,84
1	1,39	3,44	13,86
2	21,20	13,06	54,92
3	71,56	29,01	14,38
4	1,36	29,84	
5		19,09	
6		2,48	

Da es sich beim Untersuchungsgebiet Gleisdorf um einen städtischen Bereich handelt, wurde die Countanzahl auch auf Basis der Baummaske berechnet (siehe Tab. 4.6). Hier zeigt sich der Einfluss der Brennweite und damit auch des Einschneidewinkels auf die Prozessierung von Bäumen. Während bei der 210 mm Brennweite sowie der 80 mm Brennweite mit 80 Prozent Überlappung nur ein geringfügiger Anstieg der nicht gematchten Pixel zu verzeichnen ist, kommt es bei der Befliegung mit 80 mm Brennweite mit einer 60-prozentigen Überlappung zu einem signifikanten Anstieg der nicht gematchten Pixel um fünf Prozent.

Um den Einfluss der Brennweite genauer untersuchen zu können, wurden zusätzlich das Verhältnis zwischen tatsächlichem Count des Matchings und maximal möglichem Count berechnet. Dies ermöglicht die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Überlappungen. Betrachtet man das Verhältnis von tatsächlichem Count des Matchings und maximal möglichem Count wird der Einfluss der Brennweite verdeutlicht. So konnten für die 210 mm Brennweite bei 87,1 Prozent aller Pixel die maximal mögliche Anzahl der Counts erreicht werden (siehe Abb. 4.16). Entsprechend der Countwerte wurden vier Prozent der Pixel nicht zugeordnet.

Tab. 4.6: Anzahl der Counts innerhalb der Baummaske des Untersuchungsgebietes Gleisdorf für einen Einzelstreifen

Count- wert	f210 mm 70 % Längsüberlappung	f80 mm 80 % Längsüberlappung	f80 mm 60 % Längsüberlappung
	<i>Countanteil (%)</i>	<i>Countanteil (%)</i>	<i>Countanteil (%)</i>
0	4,99	3,37	21,62
1	1,88	3,23	13,69
2	16,61	10,62	51,03
3	75,94	23,68	13,66
4	0,58	32,96	
5		24,64	
6		1,51	

Die 80 mm Brennweite mit einer Überlappung von 80 Prozent beträgt bei doppelt so großem Einschneidewinkel der Anteil der maximal erreichten Counts nur noch 50 Prozent. Für 36,8 Prozent der Pixel im Untersuchungsgebiet konnten zwischen 60,1 und 90 Prozent der erzielbaren Matchings erreicht werden. Dementsprechend ist für diese Pixel die Zuverlässigkeit der Höhenwerte im Vergleich zur 210 mm Brennweite geringfügig schlechter (siehe Abb. 4.16).

Bei einer weiteren Vergrößerung des Einschneidewinkels verstärkt sich dieser Effekt. Für 80 mm Brennweite mit einer Überlappung von 60 Prozent und einem resultierenden Einschneidewinkel von 18,83 Prozent konnten zwar für 60 Prozent der Pixel im Untersuchungsgebiet der maximale Count erreicht werden, allerdings betrug bei 11,7 Prozent der Pixel das Verhältnis der Counts nur noch 50 Prozent. Für 9 Prozent lag das Verhältnis von tatsächlichem Count zu maximal möglichem Count zwischen 60,1 und 70 Prozent. 16,84 Prozent konnten nicht zugeordnet werden (siehe Abb. 4.16).

Betrachtet man ausschließlich die Matchingergebnisse innerhalb der Baummaske von Gleisdorf (siehe Abb. 4.17), so bestätigen sich die Ergebnisse aus den absoluten Counts. Für alle Befliegungen ist eine Zunahme der nicht bzw. schlechter gematchten Bereiche sowie ein Rückgang des maximalen Matchings zu verzeichnen. Allerdings liegt dieser Rückgang bei 210 mm Brennweite lediglich bei 3,5 Prozent, während es bei 80 mm Brennweite mit 80 Prozent Überlappung zu einer Abnahme um 7 Prozent und bei 80 mm Brennweite mit 60 Prozent Überlappung zu einer Abnahme um 5,6 Prozent kommt. Dementsprechend hat sich auch das Verhältnis der Ergebnisse der maximalen Matchings innerhalb der Baummaske zwischen 210 mm und 80 mm Brennweite vergrößert.

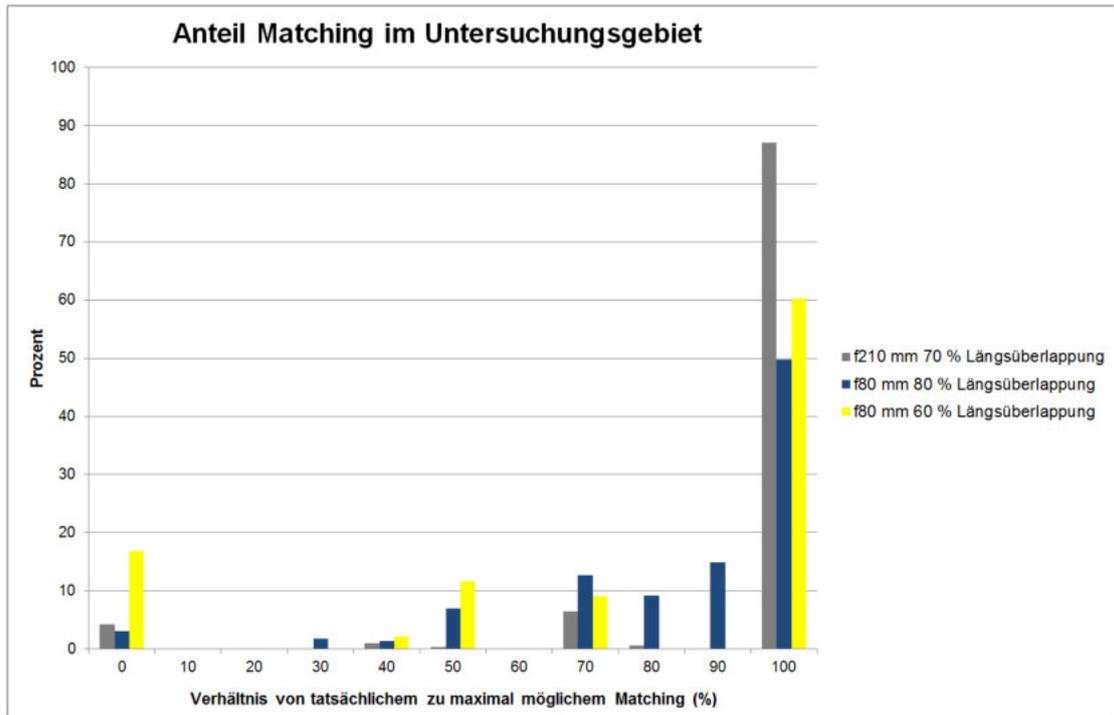


Abb. 4.16: Anteil der tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings für das Untersuchungsgebiet Gleisdorf

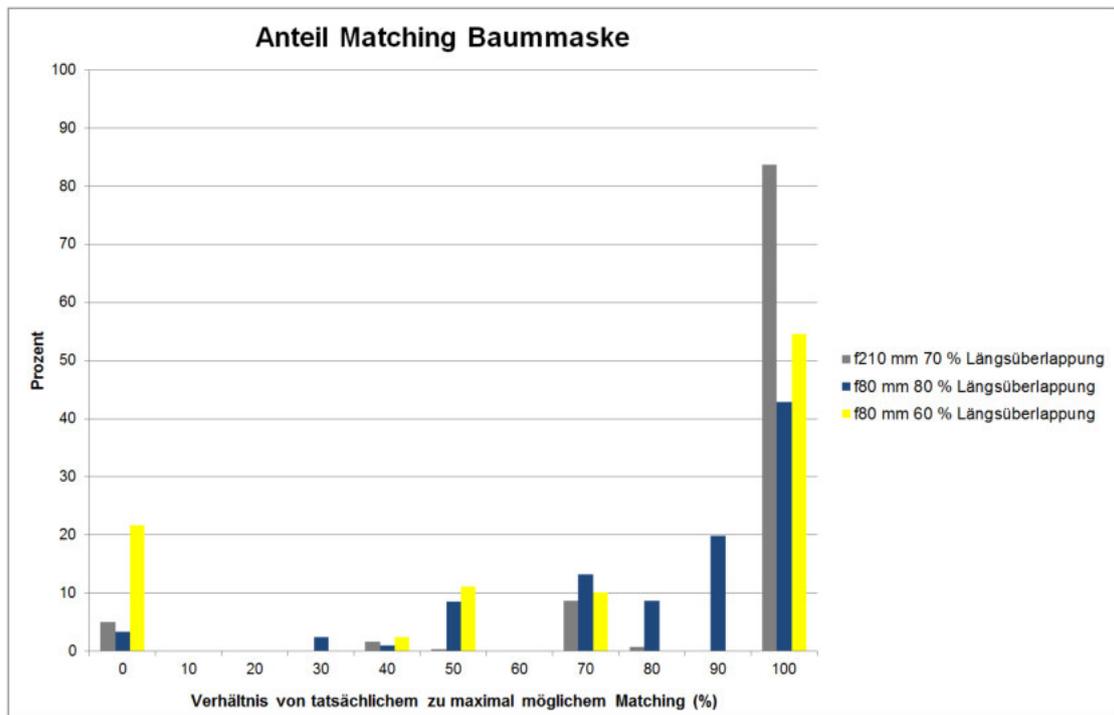


Abb. 4.17: Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichen Matchings innerhalb der Baummaske des Untersuchungsgebietes Gleisdorf

Neben dem Einfluss der Bäume selbst, hat auch die Lage der Bäume im jeweiligen Einzelbild einen großen Einfluss auf die Qualität des Matchings der Bäume. Dieser Effekt ist durch die perspektivische Verzerrung erklärbar (siehe Kap. 2.2.4). Durch den vom Mittelpunkt zum Rand hin zunehmenden Öffnungswinkel kommt es zu einer zunehmenden Verkippung von erhöhten Objekten zum Bildrand hin. Wie Tabelle 4.7 und Abbildung 4.18 zeigen ist dieser Effekt für eine große Brennweite mit einem kleinen Öffnungswinkel geringer als bei einer kleinen Brennweite. Während für die 210 mm im Randbereich nur 4,1 Prozent der Pixel nicht gematcht werden konnten, betrug der Anteil der nicht gematchten Bereiche für die 80 mm Brennweite mit einer 80 prozentige Überlappung 6,1 Prozent.

Tab. 4.7: Anzahl der Counts im Bildzentrum sowie am Bildrand

Countwert	f210 mm Zentrum	f210 mm Randbereich	f80 mm Zentrum	f80 mm Randbereich
	Countanteil (%)	Countanteil (%)	Countanteil (%)	Countanteil (%)
0	1,88	4,07	1,39	6,10
1	0,83	1,48	1,93	3,84
2	8,00	7,16	7,96	9,22
3	87,62	85,54	21,78	19,93
4	1,67	1,76	40,79	36,37
5			23,26	21,63
6			2,89	2,92

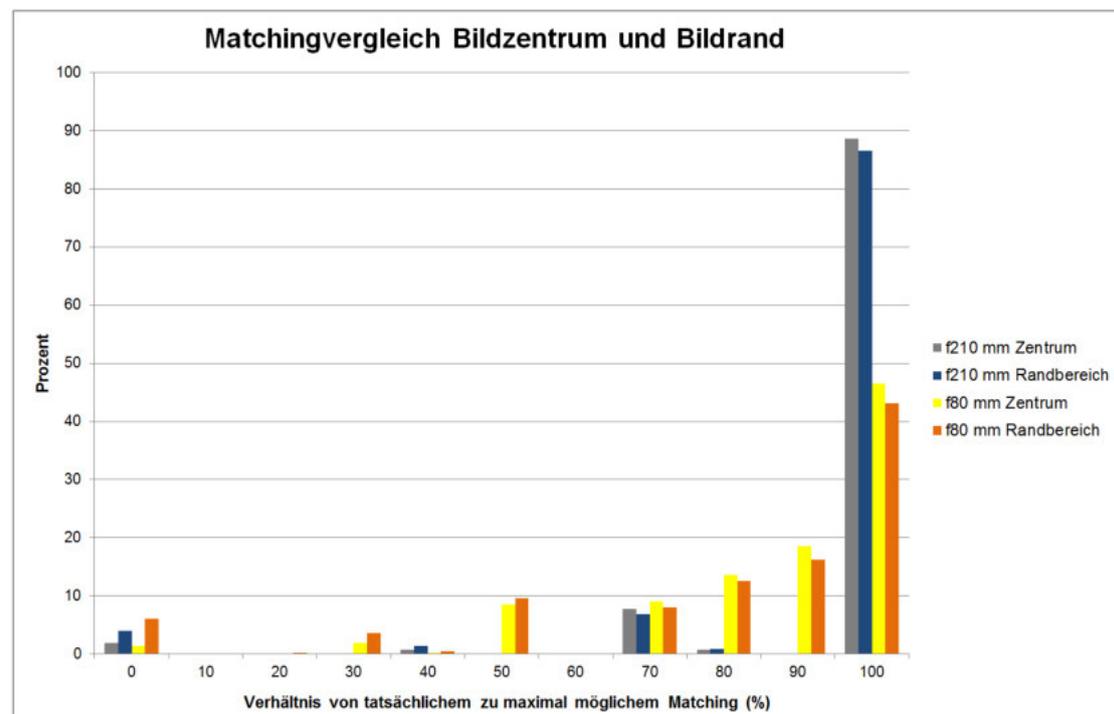


Abb. 4.18: Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichem Matchings für den Bildrand und das Bildzentrum

Auswertung der Bildverbände

Bei der Prozessierung von Bildverbänden werden die Sichtschatten und damit auch der Anteil von Pixeln mit dem Countwert Null deutlich reduziert, da sichttote Bereiche in Nachbarbildstreifen durch den veränderten Sichtwinkel teilweise gesehen werden und dementsprechend gematcht werden können. Dennoch können die Ergebnisse aus der Auswertung der Einzelstreifen auch für Bildverbände bestätigt werden. Für die 210 mm Brennweite mit einer Längs- und Querüberlappung von jeweils 70 Prozent sowie die 80 mm Brennweite mit einer Längsüberlappung von 80 Prozent und einer Querüberlappung von 70 Prozent lag der Anteil der Pixel mit einem Countwert von Null unter 0,5 Prozent. Damit konnten fast für das gesamte Untersuchungsgebiet echte Höhenwerte gemessen werden.

Für die Befliegung mit einer 80 mm Brennweite mit einer Längsüberlappung von 60 Prozent sowie einer Querüberlappung von 70 Prozent lag der Anteil der Pixel mit einem Countwert von Null für das Untersuchungsgebiet jedoch bei 3,5 Prozent sowie bei 4,8 Prozent für die Baummaske. Dabei wurde kein Quermatching (Noacross) mit den Bildern der Nachbarstreifen durchgeführt. Werden die Nachbarbilder in das Quermatching (Across) mit einbezogen reduziert sich der Anteil der Pixel mit einem Countwert von Null auf 1,2 Prozent für das Untersuchungsgebiet sowie 1,8 Prozent für die Baummaske (siehe Tab. 4.8).

Die Auswertung der Bildverbände verdeutlicht, dass bei einem Einschneidewinkel zwischen 5 und 10 Grad Bäume fast vollständig gematcht werden können. Eine Querüberlappung ist jedoch erforderlich, damit nicht gematchte Bereiche, die in einzelnen Flugstreifen entstehen, mit Informationen aus Nachbarbildstreifen aufgefüllt werden können. Die Einbeziehung von Bildern aus den Nachbarstreifen während des Matchings (Across) führt bei einem kleinen Einschneidewinkel jedoch zu keiner signifikanten Verbesserung des Anteiles der Pixel mit einem Countwert von Null (siehe Tab. 4.8).

Bei einem Einschneidewinkel von deutlich über 10 Grad erhöht sich auch der Anteil an Pixeln, welche nicht gematcht werden konnten. Vergleicht man die Ergebnisse des gesamten Untersuchungsgebietes mit den Matchingergebnissen für die Baummaske wird deutlich, dass mit einem Einschneidewinkel von mehr als 10 Grad vor allem Bäume aufgrund der zunehmenden sichttoten Bereiche nicht mehr gematcht werden können. Aufgrund der hohen Querüberlappung der Befliegung von 70 Prozent kann der Anteil der nicht gematchten Bereiche bei Berücksichtigung der Nachbarbilder jedoch reduziert werden. Für Befliegungen mit einem großen Einschneidewinkel in Flugrichtung kann die Qualität der Digitalen Oberflächenmodelle durch eine hohe Querüberlappung verbessert werden. Allerdings ist dies hinsichtlich des Flugaufwandes nicht sinnvoll. Für eine Erhöhung der Längsüberlappung ist lediglich eine höhere Taktung der Kamera oder geringere Fluggeschwindigkeit notwendig, während bei einer Erhöhung der Querüberlappung mehr Flugstreifen geflogen werden müssen.

Betrachtet man neben den absoluten Countwerten noch den Anteil des tatsächlichen Counts im Verhältnis zu den maximal möglichen Countwerten im Untersuchungsgebiet Gleisdorf (siehe Abb. 4.19), hat auch hier die 210 mm Brennweite mit einem Einschneidewinkel von

Tab. 4.8: Anteil der Countwerte mit einem Count von Null (Noacross: kein Quermatching mit Bildern aus Nachbarstreifen; Across: Quermatching mit Bildern aus Nachbarstreifen durchgeführt)

Befliegung (Längsüberlappung / Querüberlappung in %)	Countanteil in Prozent für Countwert 0	
	Untersuchungsgebiet	Baummaske
f210 mm 70 / 70 Noacross	0,41	0,27
f210 mm 70 / 70 Across	0,21	0,17
f80 mm 80 / 70 Noacross	0,14	0,08
f80 mm 80 / 70 Across	0,12	0,07
f80 mm 60 / 70 Noacross	3,46	4,78
f80 mm 60 / 70 Across	1,23	1,77

5,5 Grad mit 75,4 Prozent erreichtem maximalen Matching bei 70% Längsüberlappung das beste Matchingergebnis. Für die Befliegung mit 80 mm Brennweite und einer 80-prozentigen Längsüberlappung liegt der Anteil des maximalen Matchings nur noch bei 29 Prozent jedoch konnte für 31,6 Prozent der Pixel im Untersuchungsgebiet zwischen 80,1 und 90 Prozent der maximal möglichen Matchings erreicht werden. Für die 80 mm Brennweite mit einer Längsüberlappung von 60 Prozent zeigt sich, dass die Qualität des Matchingergebnisses weiter abnimmt. Für 25,6 Prozent der Pixel konnten nur maximal 50 Prozent der maximal möglichen Matchings erzielt werden.

Untersucht man das Verhältnis von tatsächlichem zu maximal möglichem Matching für die Baummaske des Untersuchungsgebietes Gleisdorf (siehe Abb. 4.20), verdeutlicht sich der Einfluss des Einschneidewinkels auf das Matching von Bäumen. Während sich der Anteil des maximal möglichen Matchings im Vergleich zum gesamten Untersuchungsgebiet für die 210 mm Brennweite um 7,4 Prozent reduziert, verringert sich der Anteil für die 80 mm Brennweite mit 80 Prozent Längsüberlappung um 9 Prozent.

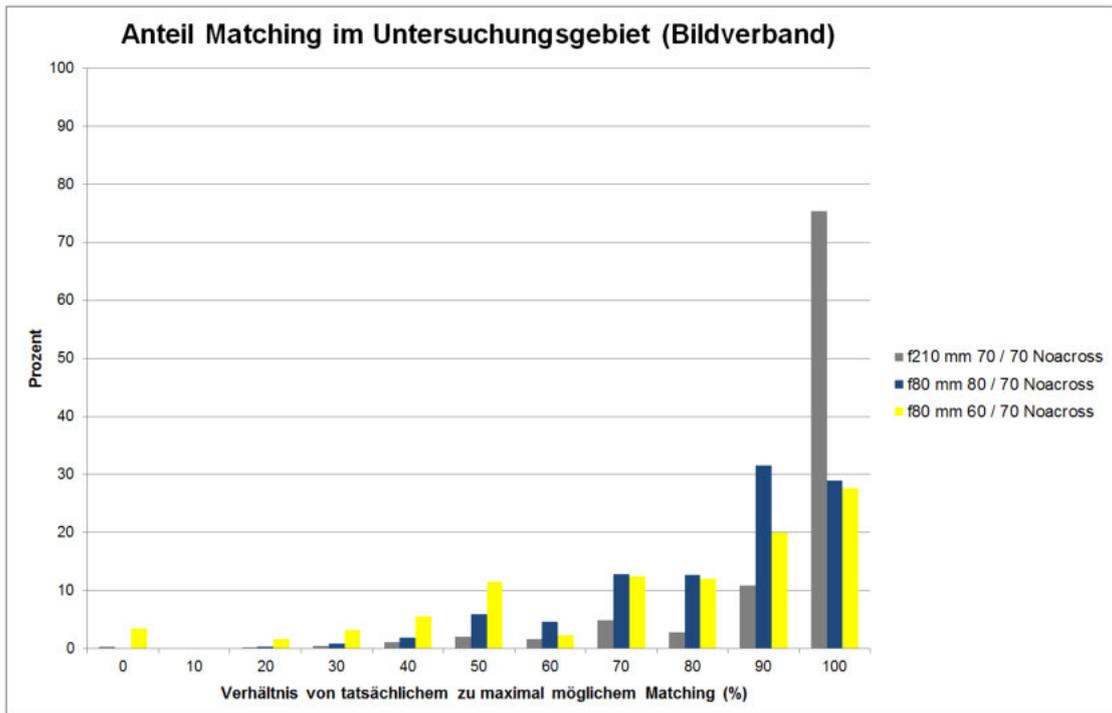


Abb. 4.19: Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichem Matchings für den Bildverband des Untersuchungsgebietes Gleisdorf ohne Quermatching

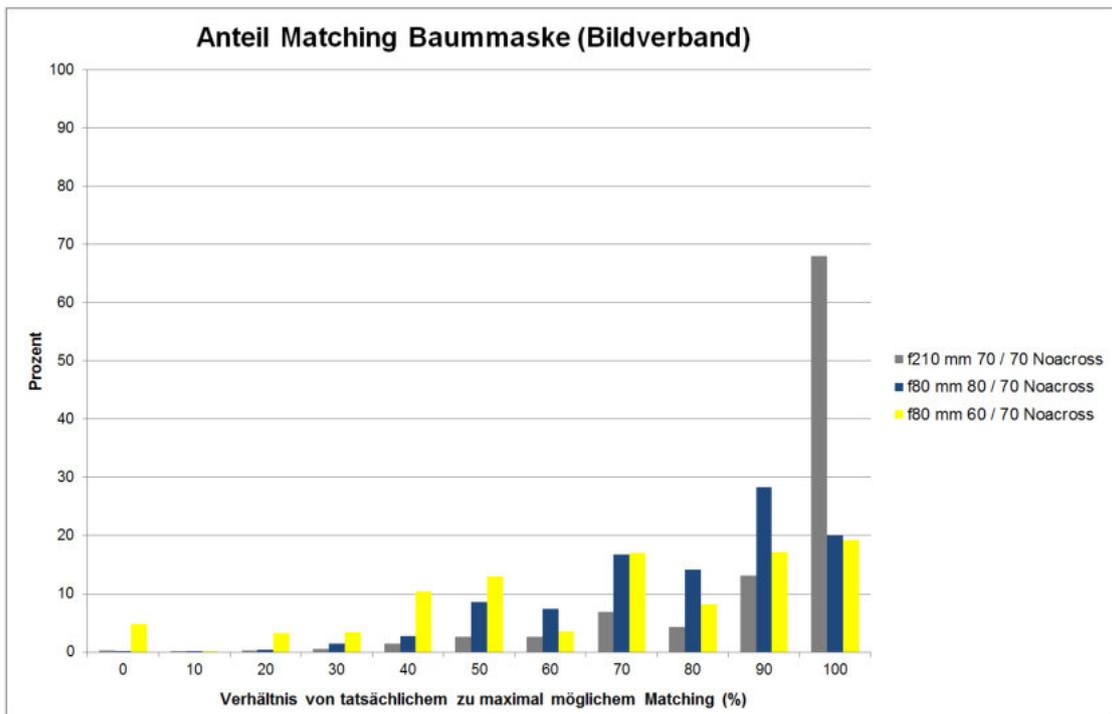


Abb. 4.20: Anteil des tatsächlichen zu maximal möglichem Matchings für den Bildverband der Baummaske des Untersuchungsgebietes Gleisdorf ohne Quermatching

Zusammenfassung der Ergebnisse für die Analyse der Brennweite

Die Analyse des Einflusses der Brennweite auf die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen verdeutlicht, dass eine längere Brennweite zu besseren Ergebnissen beim Matching von Bäumen führt. Die längere Brennweite führt einerseits zu einem kleineren Einschneidewinkel und ermöglicht andererseits eine größere Flughöhe für dieselbe Bodenauflösung im Vergleich zu einer kürzeren Brennweite (siehe Abb. 4.21). Aufgrund des Habitus von Bäumen führt ein Einschneidewinkel von ca. 5 Grad zu den besten Matchingergebnissen. Dieser ist bei einer kurzen Brennweite nur mit einer sehr hohen Längsüberlappung erreichbar. Dies führt wiederum zu einem erhöhten Datenvolumen sowie einer aufwändigeren photogrammetrischen Verarbeitung der Bilder. Die Analyse der unterschiedlichen Brennweiten verdeutlicht, dass bei gleicher GSD die geringere perspektivische Verzerrung (siehe Abb. 2.14) zu besseren Ergebnissen bei der Ableitung der Digitalen Oberflächenmodelle führt. Dies betrifft vor allem die Bildrandbereiche, in denen mit einer längeren Brennweite deutlich dichtere und zuverlässigere Matchingergebnisse für Bäume erreicht werden.

Durch das bei hoher Längsüberlappung und geringerem Öffnungswinkel zuverlässigere Matching vor allem in den Bildrandbereichen, ermöglicht eine längere Brennweite eine Reduzierung der Querüberlappung. Dies liegt vor allem darin begründet, dass die DOM Generierung innerhalb der Einzelstreifen (ohne Querüberlappung) bereits zu sehr guten Ergebnissen führt und die Qualität der DOM nur geringfügig zu den Bildrändern hin nachlässt. Dadurch verringern sich der Flugaufwand und damit die Kosten der Befliegung.

Neben der Reduzierung des Sichtschattens auf den Bäumen ermöglicht eine längere Brennweite in Waldgebieten auch eine bessere Ableitung von Bodenpunkten für die Generierung eines Digitalen Geländemodelles, da die Verdeckungen von Schneisen durch andere Bäume minimiert werden.

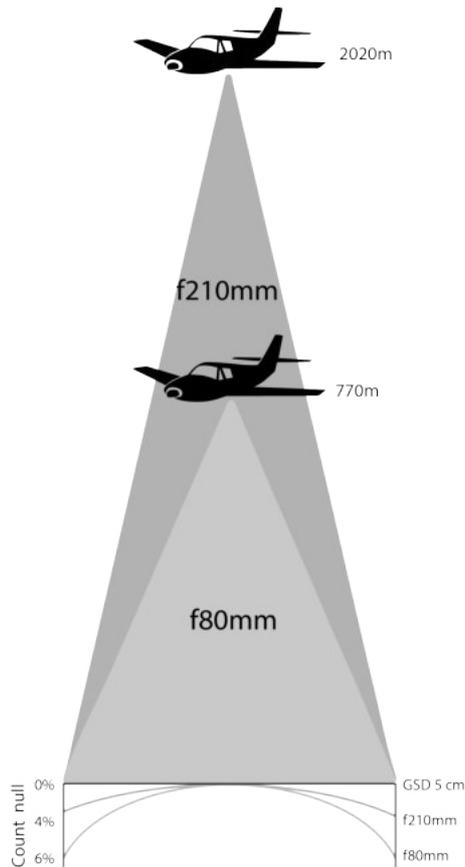


Abb. 4.21: Einfluss der Brennweite auf die Flughöhe und das Matching am Bildrand bei gleicher Bodenauflösung (5 cm)

4.1.5 Einfluss der Flugrichtung

Ziel des Kapitels ist eine systematische Auswertung des Einflusses der Flugrichtung auf die Prozessierung von Digitalen Oberflächenmodellen. Dafür wird die Kreuzbefliegung in Murnau mit der MACS-Hale verwendet, da für diese Befliegung bei einer zeitnahen Aufnahmezeit, einer gleichen Bodenauflösung und Überlappung der Einzelbilder eine Nord-Süd-gerichtete und eine Ost-West-gerichtete Auswertung möglich ist. Die Auswertung erfolgt anhand einzelner Flugstreifen mit einer Längsüberlappung der Einzelbilder von 90, 80, 70 und 60 Prozent.

Auswertung des Einschneidewinkels

Bei einer Brennweite von 51,7 mm liegt für die MACS-Hale der ideale Einschneidewinkel von 5 Grad bei 81 Prozent Längsüberlappung. Für die prozessierten Längsüberlappungen werden folgende Einschneidewinkel erreicht (siehe Abb. 4.22):

- 90 Prozent Längsüberlappung: 2,4 Grad
- 80 Prozent Längsüberlappung: 5,3 Grad
- 70 Prozent Längsüberlappung: 7,9 Grad
- 60 Prozent Längsüberlappung: 10,5 Grad

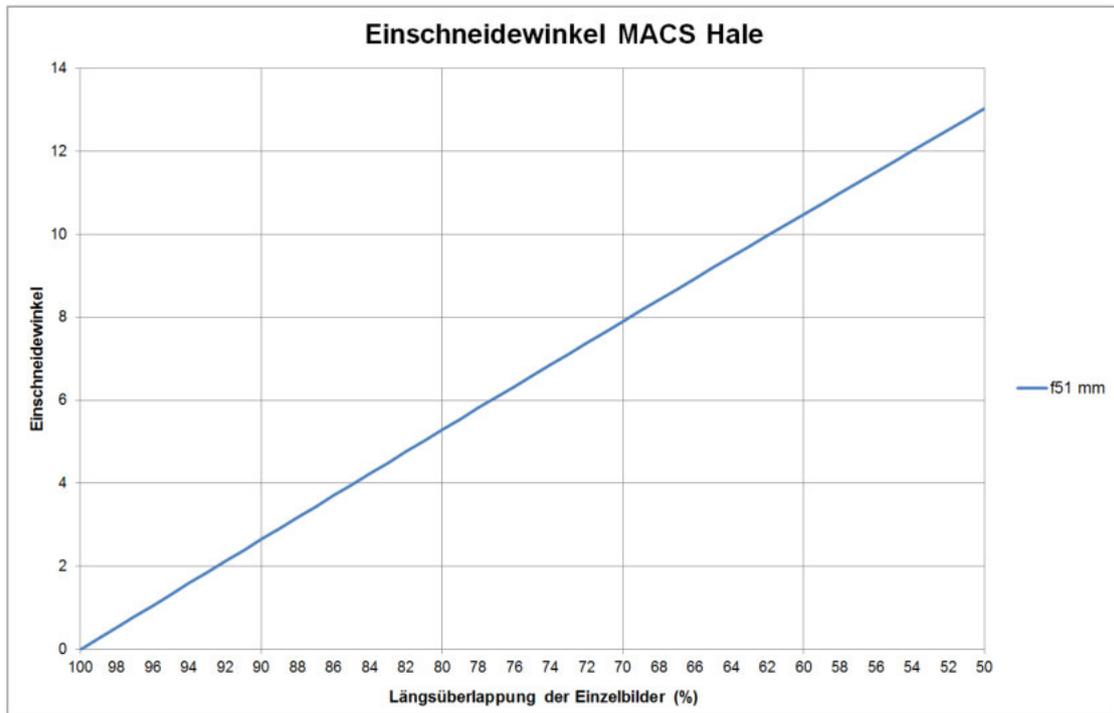
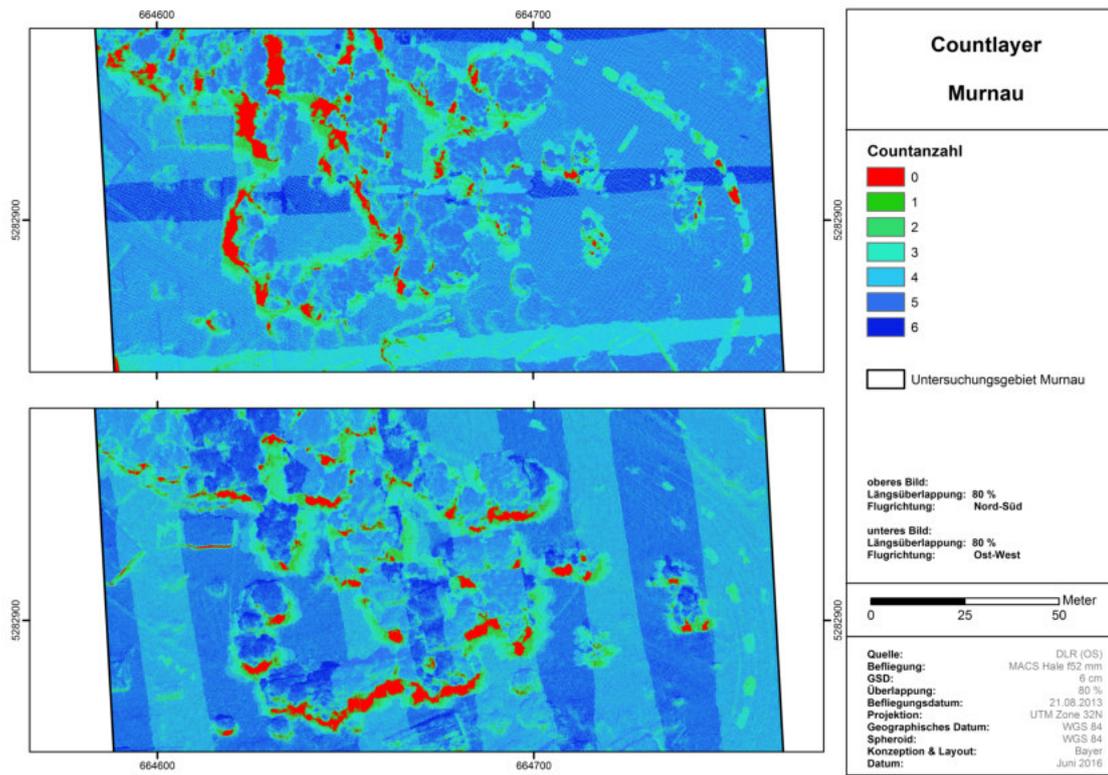


Abb. 4.22: Einschneidewinkel für die MACS Hale mit 51 mm Brennweite

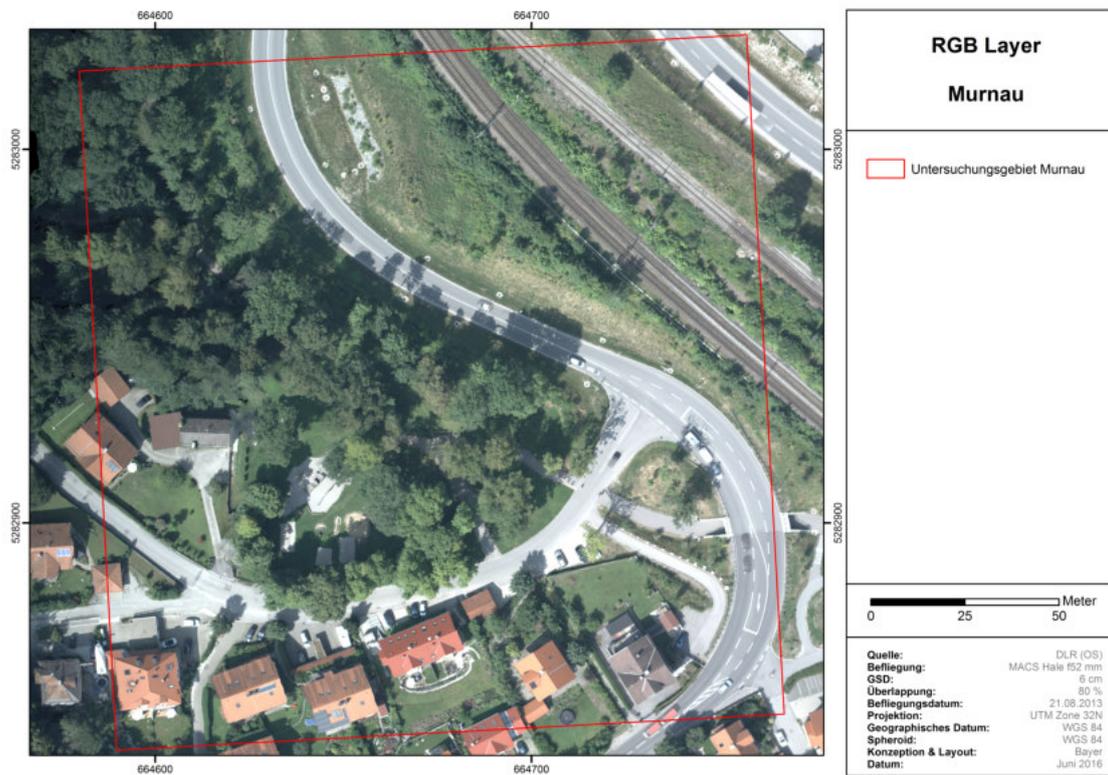
Auswertung der Flugrichtung

Die Flugrichtung einer Luftbildaufnahme bestimmt wesentlich die Lage der Sichtschatten und nicht gematchten Bereiche. Abbildung 4.23 zeigt für die Befliegungen mit einer 90-prozentigen Längsüberlappung die Bereiche der nicht gematchten Bereiche mit einem Count von null (rot). In beiden Befliegungen werden vor allem die Bereiche quer zur Flugrichtung schlechter gematcht. Dieser Effekt lässt sich für alle Kamerasysteme beobachten, bei denen der maximal Öffnungswinkel quer zur Flugrichtung größer ist als der maximale Öffnungswinkel in Flugrichtung (Rechteckigkeit des CCDs). Folglich ist auch der Einschneidewinkel quer zur Flugrichtung größer als in Flugrichtung, was wiederum den Anteil der Sichtschatten erhöht und das Matching reduziert.

Betrachtet man die absoluten Countwerte bzw. den Anteil der jeweiligen Counts an den Gesamtcounts im Untersuchungsgebiet (siehe Tab. 4.9) wird deutlich, dass die Flugrichtung keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität des Oberflächenmodelles hat. Für beide Befliegungsrichtungen sind für alle untersuchten Längsüberlappungen die Anteile der nicht gematchten Bereiche mit einem Count von null mit einem Unterschied von maximal 0,9 Prozent gleich. Diese Ergebnisse bestätigen sich auch bei der Analyse der Counts für die Baummaske (siehe Tab. 4.10). Auch hier sind keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Flugrichtung feststellbar.



(a) Countlayer für die Nord-Süd-Befliegung (oben) und die Ost-West-Befliegung (unten)



(b) RGB Layer von Murnau

Abb. 4.23

Den nicht gegebenen Einfluss der Flugrichtung auf die Ableitung von DOM verdeutlicht auch Abbildung 4.24. Betrachtet man die nicht gematchten Bereiche mit einem Count von Null werden einerseits die Ergebnisse der Analyse der Längsüberlappung (siehe Kap. 4.1.3) bestätigt. Andererseits bestätigt der annähernd parallele Verlauf der Linien für die nicht gematchten Bereiche für das gesamte Untersuchungsgebiet und die Baummaske für beide Flugrichtungen, dass die Flugrichtung in der untersuchten Befliegung keinen Einfluss auf die Qualität der Digitalen Oberflächenmodelle hat.

Tab. 4.9: Countanteil für die Nord-Süd- und Ost-West-Befliegung für das Untersuchungsgebiet Murnau

Countwert	<i>Nord-Süd</i> 90 %	<i>Ost-West</i> 90 %	<i>Nord-Süd</i> 80 %	<i>Ost-West</i> 80 %	<i>Nord-Süd</i> 70 %	<i>Ost-West</i> 70 %	<i>Nord-Süd</i> 60 %	<i>Ost-West</i> 60 %
	Countanteil (%)							
0	0,90	0,51	2,39	1,63	5,65	4,74	10,38	10,02
1	0,69	0,53	1,77	1,86	5,13	8,30	11,20	15,38
2	0,95	0,82	4,74	5,64	22,94	29,38	50,79	43,53
3	1,31	1,39	11,74	14,80	57,27	45,46	27,62	31,07
4	1,95	2,48	28,17	29,71	9,01	12,13		
5	3,31	4,86	45,30	34,21				
6	6,22	9,73	5,88	12,15				
7	12,50	17,39						
8	23,67	24,31						
9	32,29	23,29						
10	16,21	12,70						
11	0,01	1,98						

Tab. 4.10: Countanteil für die Nord-Süd- und Ost-West-Befliegung für die Baummaske des Untersuchungsgebietes Murnau

Countwert	<i>Nord-Süd</i> 90 %	<i>Ost-West</i> 90 %	<i>Nord-Süd</i> 80 %	<i>Ost-West</i> 80 %	<i>Nord-Süd</i> 70 %	<i>Ost-West</i> 70 %	<i>Nord-Süd</i> 60 %	<i>Ost-West</i> 60 %
	Countanteil (%)							
0	1,59	2,03	4,70	5,27	11,56	11,44	22,35	23,08
1	1,13	1,87	3,31	4,23	7,49	10,66	12,81	18,00
2	1,78	2,45	8,93	9,62	26,55	27,98	49,71	42,28
3	2,79	3,55	16,10	17,01	45,43	36,41	15,13	16,64
4	4,18	5,07	27,09	26,08	8,97	13,51		
5	6,14	7,26	37,99	27,87				
6	8,71	10,45	1,87	9,91				
7	12,89	14,87						
8	20,01	19,07						
9	26,70	19,17						
10	14,08	12,25						
11	0,01	1,96						

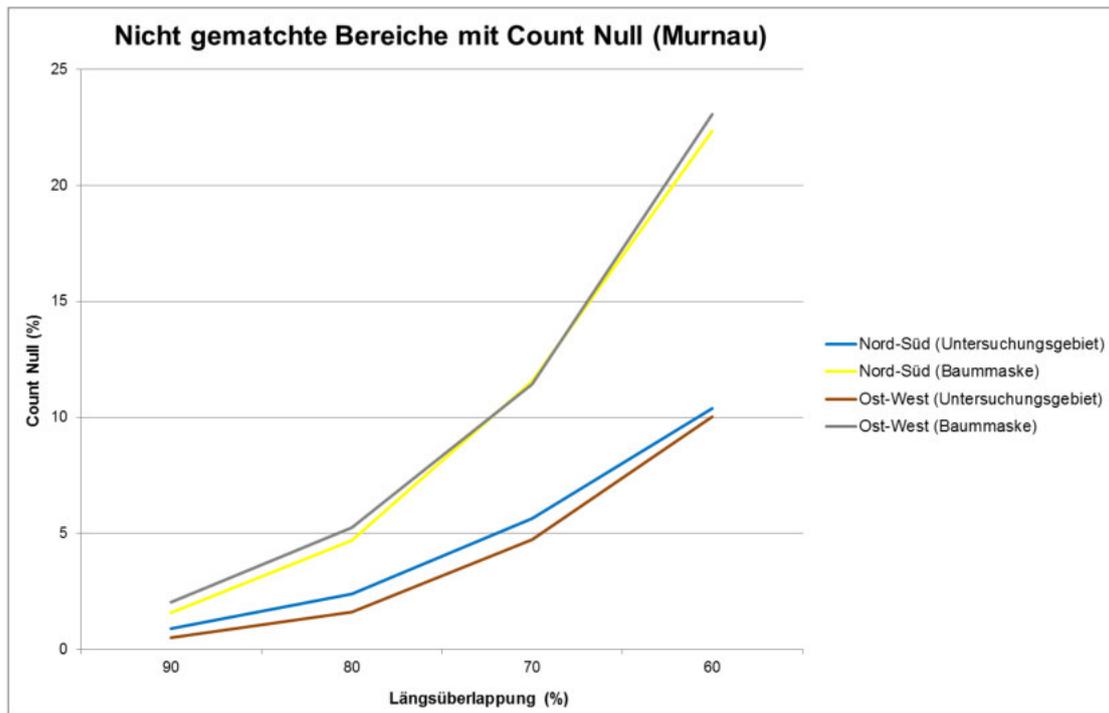


Abb. 4.24: Verlauf des Anteils der Countwerte mit Null in Abhängigkeit von der Längsüberlappung und Flugrichtung

Zusammenfassung der Ergebnisse für die Analyse der Flugrichtung

Hinsichtlich der Flugrichtung konnte kein signifikanter Einfluss auf die Qualität des gesamten Digitalen Oberflächenmodelles festgestellt werden. Ein Vergleich der Matchingergebnisse zeigt lediglich räumliche Unterschiede der Bereiche, welche bei einer Flugrichtung schlechter gematcht werden als bei einer anderen Flugrichtung. Da es sich bei Bäumen aber um Objekte handelt, die von allen Seiten einen gleichen Habitus haben, kann keine spezielle Flugrichtung empfohlen werden. Die Flugplanung sollte sich entsprechend an den Hauptachsen (Schneisen und Forstwege) des jeweiligen Waldgebietes orientieren.

Quer zur Flugrichtung entstehende Sichtschatten können mit Informationen aus Nachbarstreifen aufgefüllt werden (siehe Kap. 4.1.3). Für die vollständige Reduzierung von Sichtschatten ist die Durchführung einer Kreuzbefliegung, bei der sowohl in Nord-Süd als auch in Ost-West Richtung geflogen wird, sinnvoll. Damit sind jedoch ein doppelt so hoher Flugaufwand und entsprechende Kosten für die Befliegung und Prozessierung der Daten verbunden.

Bei der vorliegenden Befliegung ist aufgrund des hohen Sonnenstandes sowie der hohen radiometrischen Auflösung des Kamerasystems der Einfluss von echten Schatten sehr gering. Bei einem niedrigen Sonnenstand und/oder einer schlechteren radiometrischen Auflösung der Kamera nimmt auch der Einfluss der Beleuchtung und damit der Flugrichtung zu. In diesen Fällen kann es zu einer

Erhöhung von nicht matchbaren Bereichen kommen, da sich Sichtschatten und echte Schatten überlagern können. Daher wird für die Befliegung von Waldgebieten ein hoher Sonnenstand mit kurzen Schatten und ein Kamerasystem mit einer hohen radiometrischen Auflösung empfohlen.

4.2 Einfluss der Prozessierungsparameter auf die Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen

Neben den Parametern für die Befliegung beeinflussen auch die Einstellungen während der Prozessierung der Digitalen Oberflächenmodelle die Qualität der Ergebnisse maßgeblich. Da alle im Rahmen der Arbeit abgeleiteten Oberflächenmodelle mit dem SGM des DLR prozessiert wurden, beziehen sich die Ergebnisse auch ausschließlich auf den Semi Global Matching Algorithmus nach Hirschmüller (siehe Kap. 2.3.1). Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 4.1 lassen sich für das Matching folgende Parameter bestimmen, welche die Qualität der DOM beeinflussen:

- Downscale
 - Die Funktion Downscale ermöglicht eine Reduzierung der ursprünglichen Auflösung. Downscale 1 bedeutet, dass die Daten in der Originalauflösung gematcht werden. Bei Downscale 2 erfolgt eine Reduzierung der Auflösung um das Zweifache, bei Downscale drei entsprechend um das Dreifache.
- Across und Noacross
 - Die Funktion Across bezieht beim Matching die Nachbarstreifen mit ein. Das heißt, es erfolgt ein Quermatching. Bei der Funktion Noacross erfolgt das Matching ausschließlich innerhalb eines Flugstreifens. Ein Quermatching wird nicht durchgeführt.
- Inflight
 - Die Funktion Inflight ermöglicht einzustellen, wie viele Bilder innerhalb eines Flugstreifens gematcht werden. Inflight 1 bedeutet, dass für ein Bild jeweils das direkt davor sowie das direkt danach aufgenommene Bild in das Matching einbezogen werden. Bei Inflight 2 werden dementsprechend die beiden davor und danach aufgenommenen Bilder für das Matching verwendet.

4.2.1 Einfluss des Downscalles

Wie die Ergebnisse aus Kapitel 4.1.2 verdeutlicht haben, hat die Bodenauflösung einen großen Einfluss auf die Qualität der DOM. Eine zu hohe Auflösung verringert die Qualität der DOM erheblich. Mit dem im DLR verwendeten SGM nach Hirschmüller (2005, 2008) ist kein pyramidales Matching möglich. Die Funktion Downscale ermöglicht jedoch eine Reduzierung der Auflösung, welche bei zu hohen Auflösungen für das Matching von Bäumen angewendet werden sollte. Da die Befliegung von Gleisdorf die höchste Bodenauflösung hat, wird der Einfluss der Downscale-Funktion exemplarisch an Gleisdorf aufgezeigt. Die Ergebnisse haben jedoch Gültigkeit für alle untersuchten Kamerasysteme.

Mit der Reduzierung der Auflösung während des Matchingprozesses lassen sich die Bereiche, in denen kein Matching möglich ist verringern. Tabelle 4.11 zeigt, dass unabhängig vom jeweiligen

Einschneidewinkel über eine Reduzierung der Matchingauflösung die nicht matchbaren Bereiche deutlich reduziert werden können. Dieser Einfluss steigt mit zunehmendem Einschneidewinkel an. So konnte für die 80 mm Brennweite mit einer Längsüberlappung von 60 Prozent und einem Einschneidewinkel von 18,8 Grad der Anteil der nicht gematchten Bereiche für die Baummaske von 17,6 Prozent bei Downscale 1 auf 4,8 Prozent bei Downscale 3 reduziert werden.

Auch wenn mit einem Downscale die Auflösung reduziert wird, was mit einer schlechteren Höhengenaugigkeit in Folge des Resamplings verbunden ist, so ermöglicht die Auflösungsreduzierung in Bereichen, in denen bei Originalauflösung kein Matching möglich ist, die Ableitung von echten Höhenwerten. Für die Ableitung der DOM wird daher empfohlen, alle DOM mit einem Downscale von 1 sowie zusätzlich 2 und/oder 3 zu prozessieren. Aus den Prozessierungen von Downscale 1 werden dabei alle gematchten Bereiche verwendet. Die nicht gematchten Bereiche werden mit Werten aus dem Downscale 2 und/oder 3 aufgefüllt.

Tab. 4.11: Anteil mit Count Null für Downscale 1, 2 und 3

Befliegung (Längsüberlappung / Querüberlappung in %)	Countanteil in Prozent für Countwert 0	
	Untersuchungsgebiet	Baummaske
f80 mm 80 / 70 Noacross (Downscale 1)	1,11	1,42
f80 mm 80 / 70 Noacross (Downscale 2)	0,30	0,21
f80 mm 80 / 70 Noacross (Downscale 3)	0,14	0,08
f80 mm 60 / 70 Noacross (Downscale 1)	11,24	17,57
f80 mm 60 / 70 Noacross (Downscale 2)	5,53	8,15
f80 mm 60 / 70 Noacross (Downscale 3)	3,46	4,78
f210 mm 70 / 70 Noacross (Downscale 1)	2,54	4,78
f210 mm 70 / 70 Noacross (Downscale 2)	0,72	0,85
f210 mm 70 / 70 Noacross (Downscale 3)	0,41	0,27

4.2.2 Einfluss des Quermatchings

Der Einfluss des Quermatching wurde bereits in den Kapitel 4.1.3 sowie 4.1.4 umfassend dargestellt. Wie die Tabellen 4.3, 4.4 und 4.8 zeigen, hat das Quermatching bei rechtwinkligen CCDs unabhängig vom verwendeten Kamerasystem nur einen sehr geringen Einfluss auf die Qualität der DOM. Aufgrund des oftmals gegebenen größeren Einschneidewinkels quer zur Flugrichtung im Vergleich zum Einschneidewinkel in Flugrichtung führt ein Quermatching zu keiner signifikanten Verbesserung der Matchingergebnisse. Lediglich bei einem großen Einschneidewinkel in Flugrichtung führt ein Quermatching zu einer leichten Reduzierung der nicht matchbaren Bereiche.

Für die Prozessierung der Digitalen Oberflächenmodelle mit SGM ist daher die Durchführung eines Quermatchings nicht notwendig. Es wird die Prozessierung mit Noacross empfohlen.

4.2.3 Einfluss der Anzahl der gematchten Bilder

Der Einfluss der Anzahl der gematchten Bilder innerhalb eines Flugstreifens wurde exemplarisch an der Befliegung von München untersucht und kann auf alle verwendeten Kamerasysteme übertragen werden. Aufgrund des großen Einflusses des Einschneidewinkels zeigt sich, dass für die Ableitung von DOM ein Matching mit zwei Bildern vor und nach dem zu matchenden Ausgangsbild (Inflight 2) nicht sinnvoll ist. Der Einfluss des größeren Einschneidewinkels führt sogar zu einer leichten Erhöhung des Anteils der Bereiche, die nicht gematcht werden können (siehe Tab. 4.12).

Für die Prozessierung von DOM mit dem DLR SGM wird daher empfohlen für das Matching in Flugrichtung jeweils nur das direkt davor und danach aufgenommene Bild (Inflight 1) zu verwenden.

Tab. 4.12: Anteil mit Count Null für Inflight 1 und Inflight 2

Befliegung	Countanteil in Prozent für Countwert 0	
	Untersuchungsgebiet	Baummaske
Onestrip 80 % Inflight 1	18,92	28,56
Onestrip 80 % Inflight 2	20,27	32,30

4.2.4 Zusammenfassung des Einflusses der Prozessierungsparameter für die Einzelbaumableitung

Mit den Prozessierungsparametern können für die Ableitung von Einzelbäumen ungenügende Flugparameter teilweise ausgeglichen werden. Allerdings sind die Möglichkeiten dabei begrenzt, weshalb eine auf die forstlichen Fragestellungen ausgerichtete Flugplanung unabdingbar ist.

Dies trifft vor allem auf die Bodenauflösung zu. Eine zu geringe Bodenauflösung kann durch eine geometrische Transformation (Resampling) ausgeglichen werden. Dadurch können auch bei einer geringen GSD nicht matchbare Bereiche durch die Reduzierung der GSD noch gematcht und echte Höhenwerte abgeleitet werden. Damit ist aber auch ein Informationsverlust verbunden, da die Anzahl der echten Höhenwerte entsprechend der Auflösungsreduzierung verringert wird.

Darüber hinaus können durch die Einbeziehung von Nachbarstreifen in das Matching bei großen Einschneidewinkeln in Längsrichtung teilweise innerhalb eines Bildstreifens nicht gematchte Bereiche durch ein Quermatching gematcht und mit echten Höheninformationen aufgefüllt werden.

4.3 Einfluss des Bilateral-Filters auf die Ableitung von Einzelbäumen

Zur Glättung der Oberfläche der Digitalen Oberflächenmodelle wurde ein Bilateralfilter verwendet. Dieser glättet die Oberfläche und erhält dabei die Kanten (siehe Kap. 3.1). Die Art der Glättung und Kantenerhaltung wird dabei von folgenden zwei Parametern bestimmt:

- Sigmagröße,
- Filtergröße.

Die Sigmagröße regelt die Kantenerhaltung und die Filtergröße beeinflusst die Glättung ebener Regionen. Die Filtereinstellungen werden von der Pixelgröße des Eingangsbildes bestimmt. Abbildung 4.25 sowie Abbildung 4.26 zeigen den Einfluss des Bilateralfilters anhand eines Einzelbaumes. Mit zunehmender Sigmagröße werden die Kanten weichgezeichnet, d.h. bei einer kleinen Sigmagröße werden kleinere Kanten nicht erhalten, während größere Kanten mit einem größeren Valueunterschied erhalten bleiben. Für Bäume ist die Sigmagröße von hoher Bedeutung, da die Kanten für die Ableitung der Baumkronen erhalten bleiben sollen. Mit zunehmender Filtergröße werden die ebenen Regionen stärker geglättet, bzw. weichgezeichnet. Das heißt die Filtergröße bestimmt die Matrixgröße in deren Bereich die Pixel geglättet werden. Je größer der Filter gewählt wird, desto größer ist die Matrix für die Glättung.

Abbildung 4.25 verdeutlicht an zwei Höhenprofilen desselben Baumes die Oberflächenglättung bei gleichzeitiger Kantenerhaltung. Das linke Höhenprofil wurde aus dem ungefilterten DOM abgeleitet, während das rechte Höhenprofil aus einem mit dem Bilateralfilter bearbeiteten DOM mit einer Sigmagröße von 10 und einer Filtergröße von 49 abgeleitet wurde. Wird eine kleine Sigmagröße gewählt, bleiben die dominanten Kanten des Baumes erhalten, während kleinere Kanten weichgezeichnet werden. Der Einfluss der Filtergröße zeigt sich sehr gut anhand der Baumspitze sowie den ebenen Bereichen neben der Baumspitze. Diese werden durch den Bilateralfilter geglättet.

Durch die Glättung eignen sich die gefilterten DOM vor allem für die Berechnung von Neigung und Ausrichtung (siehe Abb. 4.27 und 4.28), da diese mit einem reduzierten Oberflächenrauschen genauer berechnet werden können. Für die Berechnung der Baumspitzen werden aufgrund der Glättung der Spitzen die originalen DOM verwendet.

Zur Bestimmung der geeignetsten Einstellungen wurden verschiedene Parametereinstellungen berechnet und ausgewertet. Dabei wurde neben der Glättung der Oberfläche auch die Rechenzeit berücksichtigt. Aufgrund der Vorgabe der Kantenerhaltung wurde für die Analysen eine Sigmagröße von 10 gewählt. Bei dieser bleiben dominante Kanten mit einem großen Valueunterschied erhalten. Kleinere Kanten, welche durch die raue Oberfläche entstehen, werden geglättet.

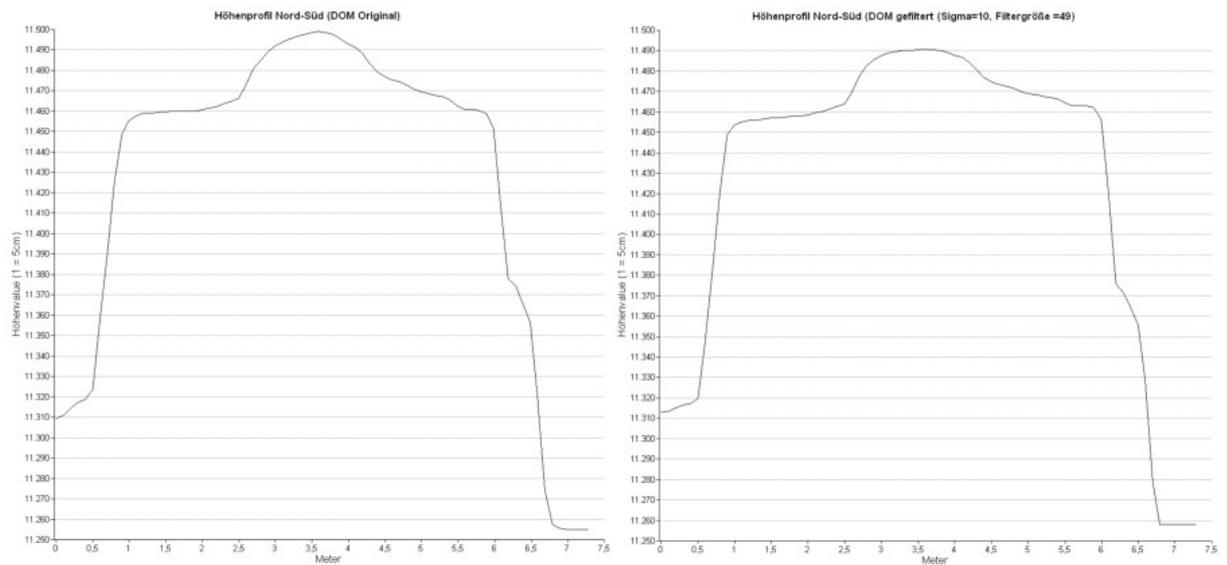


Abb. 4.25: Höhenprofil eines Baumes mit und ohne Bilateralfilter

Bedingt durch den hohen linearen Rechenaufwand wurde als maximale Filtergröße 49 bestimmt. Für die Berechnung von Neigung und Ausrichtung kann auch eine größere Filtergröße gewählt werden, allerdings steigt dadurch der der Rechenaufwand exponentiell an. Zur Bestimmung des Rechenaufwandes wurden daher für ein DOM mit 1000*1000 Pixeln mit einer konstanten Sigmagröße von 10 verschiedene Filtergrößen berechnet. Die Rechenzeit für einen Intel(R) Core(TM) i7-4750HG Prozessor mit acht Kernen betrug:

Filtergröße	Rechenzeit
9	3 Sekunden
29	39 Sekunden
49	2 Minuten
99	6 Minuten
149	14 Minuten
199	25 Minuten
249	40 Minuten

digitales
Oberflächenmodell

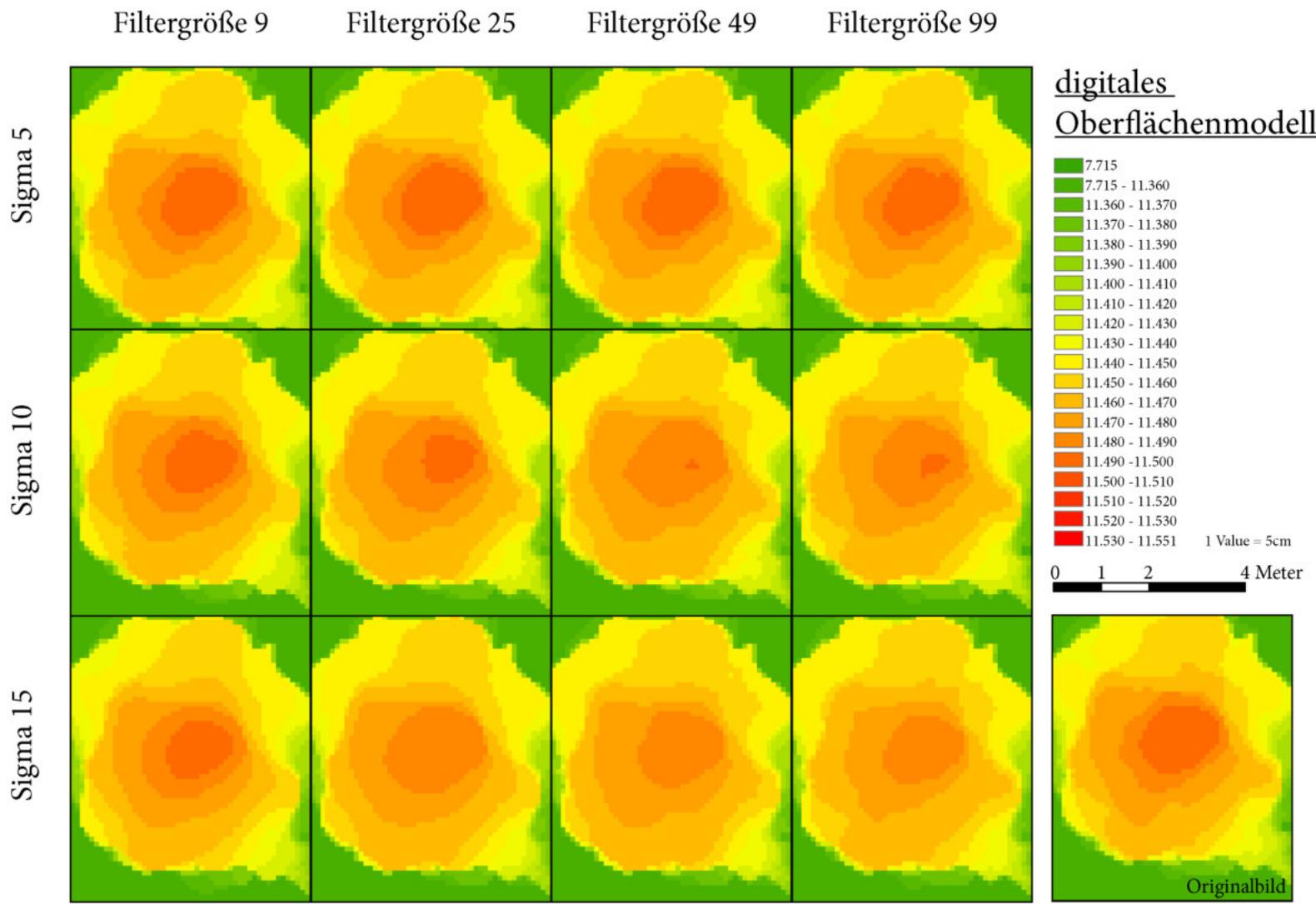
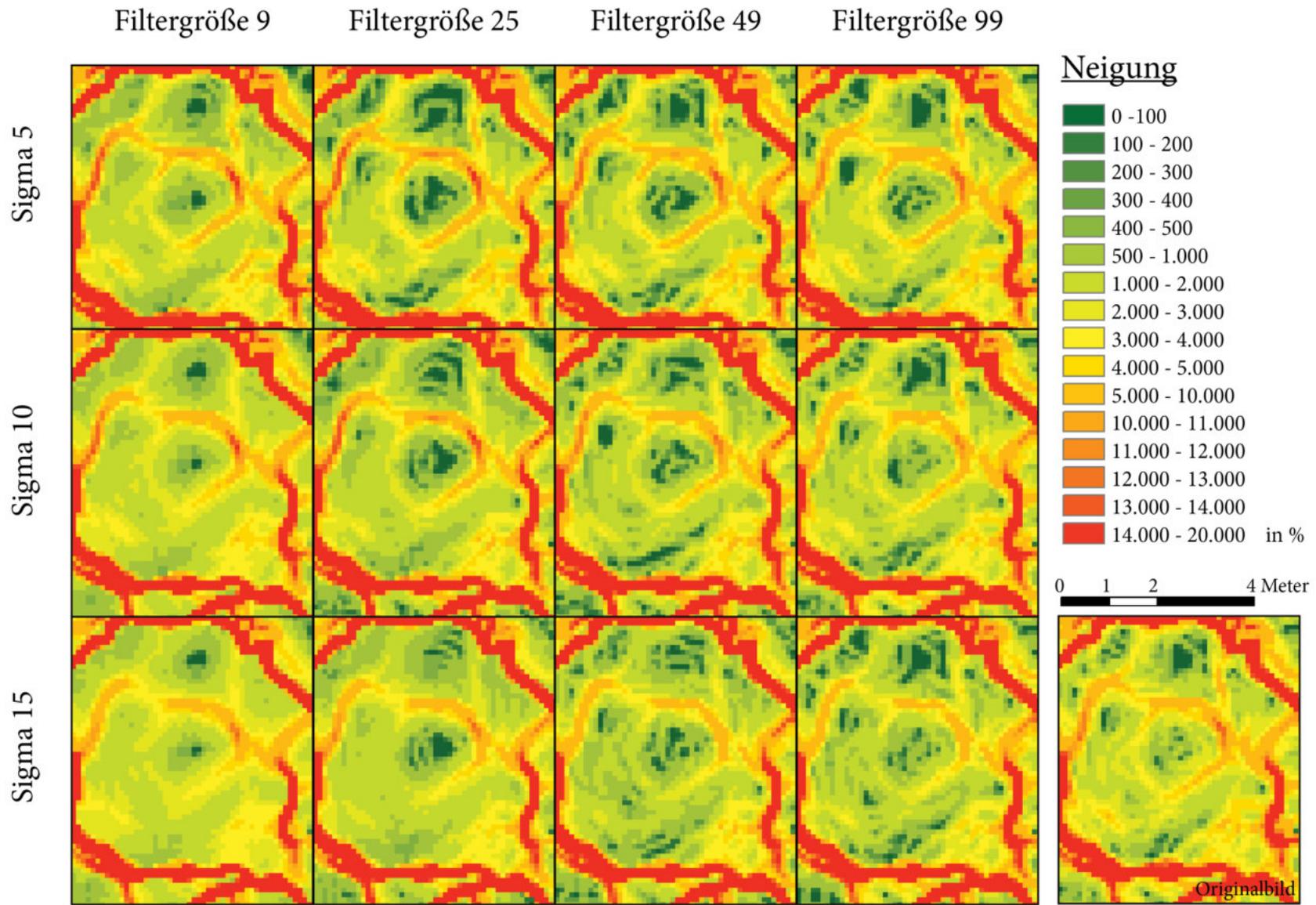


Abb. 4.26: Einfluss von Sigma und Filtergröße auf die Glättung des DOM

Abb. 4.27: Einfluss von Sigma und Filtergröße auf die Berechnung der Neigung



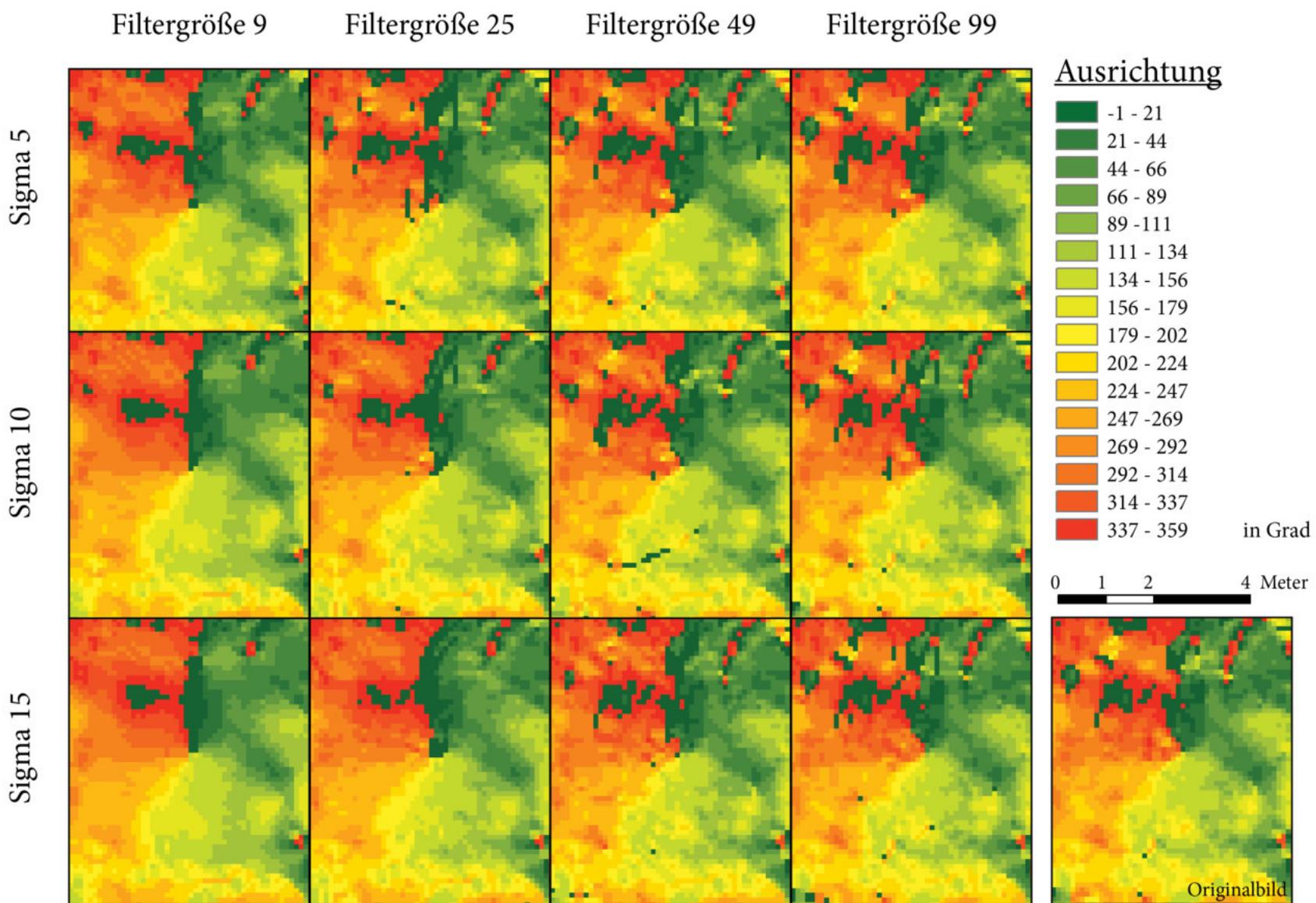


Abb. 4.28: Einfluss von Sigma und Filtergröße auf die Berechnung der Ausrichtung

4.4 Genauigkeitsanalyse der Baummasken

Die Baummasken (siehe Kap. 3.3.1) bildet die Grundlage für die Genauigkeitsanalyse. Nur innerhalb der Baummaske können die Baumspitzen und Baumkronen abgeleitet werden. Daher hat die Genauigkeit der Baummaske einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Einzelbaumextraktion. Ziel dieses Kapitels ist eine Genauigkeitsbestimmung der verwendeten Baummasken für jedes Untersuchungsgebiet anhand einer Fehlermatrix (siehe Kap. 3.4.2).

4.4.1 Baummaske Habichtswald

Die untersuchte Baummaske des Untersuchungsgebietes Habichtswald hat eine Fläche von 15 Hektar. Insgesamt wurden 100 zufällige Punkte für die Bestimmung der Genauigkeit gesetzt. Davon wurden aufgrund des dichten Baumbestandes 94 Punkte innerhalb der Waldmaske (Wald) gesetzt und 6 außerhalb der Waldmaske (nicht Wald). Das Verhältnis von richtig bestimmten Waldbereichen zu falsch bestimmten Waldbereichen ist Tabelle 4.13 zu entnehmen.

Die Gesamtgenauigkeit liegt bei 100 Prozent. Demzufolge liegen auch die Produzentengenauigkeit sowie die Nutzergenauigkeit für beide Klassen bei 100 Prozent. Der Kappa Koeffizient für beide Klassen sowie für die Gesamtgenauigkeit beträgt 1,0. Dies ist nach Monserud & Leemanns (1992) ein perfektes Ergebnis. Anhand der perfekten Genauigkeit der Waldmaske für das Untersuchungsgebiet kann so ohne Einschränkungen die Vollständigkeit und Korrektheit der Einzelbaumextraktion untersucht werden.

Tab. 4.13: Fehlermatrix Baummaske Habichtswald

Klassen		Referenz	
		<i>Wald</i>	<i>nicht Wald</i>
Klassifikations- ergebnis	<i>Wald</i>	94	0
	<i>nicht Wald</i>	0	6

4.4.2 Baummaske Baruth

Für die Berechnung der Genauigkeit der Baummaske von Baruth wurden insgesamt 150 zufällige Punkte gesetzt. 29 Punkte wurden innerhalb der Klasse *Wald* gesetzt und 121 Punkte innerhalb der Klasse *nicht Wald*.

Die Gesamtgenauigkeit der Baummaske für Baruth beträgt 97,3 Prozent mit einer Produzentengenauigkeit von 89,7 Prozent und einer Nutzergenauigkeit von 96,3 Prozent für die Klasse *Wald* (siehe Tab. 4.14). Für die Klasse *nicht Wald* beträgt die Produzentengenauigkeit 99,2 Prozent und die Nutzergenauigkeit 97,6 Prozent. Der Kappa Koeffizient für die Gesamtgenauigkeit beträgt 0,91. Der Kappa Koeffizient für die Waldklasse liegt bei 0,95.

Tab. 4.14: Fehlermatrix Baummaske Baruth

Klassen		Referenz	
		<i>Wald</i>	<i>nicht Wald</i>
Klassifikations- ergebnis	<i>Wald</i>	26	1
	<i>nicht Wald</i>	3	120

4.4.3 Baummaske München

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Baummaske des Untersuchungsgebiets München wurden 150 zufällige Punkte gesetzt. Davon wurden 46 Punkte innerhalb der Klasse Wald sowie 104 Punkte in der Klasse nicht Wald gesetzt. Die Fläche der Baummaske München beträgt 8,4 Hektar.

Die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse sind in Tabelle 4.15 dargestellt. Die Gesamtgenauigkeit für die Waldmaske München liegt bei 92,67 Prozent. Für die Waldklasse liegen die Produzentengenauigkeit bei 80,43 Prozent und die Nutzergenauigkeit bei 94,87 Prozent. Für die Klasse nicht Wald beträgt die Produzentengenauigkeit 98,08 Prozent und die Nutzergenauigkeit 91,89 Prozent. Das entspricht einem Kappa Koeffizienten für das Gesamtergebnis von 0,82 sowie einem Kappa Koeffizienten für die Waldklasse von 0,93. Damit ist das Gesamtergebnis nach Monserud & Leemanns (1992) als sehr gut und das Ergebnis der Waldmaske als exzellent anzusehen.

Tab. 4.15: Fehlermatrix Baummaske München

Klassen		Referenz	
		<i>Wald</i>	<i>nicht Wald</i>
Klassifikations- ergebnis	<i>Wald</i>	37	2
	<i>nicht Wald</i>	9	102

4.4.4 Baummaske Gleisdorf

Im städtischen Untersuchungsgebiet von Gleisdorf wurden insgesamt 150 zufällige Punkte für die Genauigkeitsbestimmung gesetzt. Aufgrund der städtischen Struktur wurden 11 Punkte in der Klasse Wald gesetzt und 139 Punkte in der Klasse nicht Wald.

Die Gesamtgenauigkeit der städtischen Waldmaske von Gleisdorf beträgt 96 Prozent. Die Produzentengenauigkeit der Klasse Wald lag bei 45,5 Prozent, während die Nutzergenauigkeit bei 100 Prozent lag. Die Produzentengenauigkeit der Klasse nicht Wald lag bei 100 Prozent und die Nutzergenauigkeit bei 95,9 Prozent. Daraus folgt ein Kappa Koeffizient für die Gesamtgenauigkeit von 0,61.

Tab. 4.16: Fehlermatrix Baummaske Gleisdorf

Klassen		Referenz	
		<i>Wald</i>	<i>nicht Wald</i>
Klassifikations- ergebnis	<i>Wald</i>	5	0
	<i>nicht Wald</i>	6	139

4.4.5 Baummaske Murnau

Die Baummaske von Murnau umfasst eine Fläche von 0,32 Hektar. Daher wurden insgesamt 50 zufällige Punkte für die Bestimmung der Genauigkeit gesetzt. 20 Punkte wurden innerhalb der Klasse Wald und 30 Punkte innerhalb der Klasse nicht Wald gesetzt. Die Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung sind in Tabelle 4.17 dargestellt.

Die Gesamtgenauigkeit für die Waldmaske von Murnau liegt bei 90,0 Prozent. Die Produzentengenauigkeit für die Klasse Wald liegt bei 75,0 Prozent und die Nutzergenauigkeit bei 100 Prozent. Für die Klasse nicht Wald liegt die Produzentengenauigkeit bei 100 Prozent und die Nutzergenauigkeit bei 85,7 Prozent. Der Kappa Koeffizient der Gesamtgenauigkeit beträgt 0,78 und hat damit nach Monserud & Leemanns (1992) eine Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung von sehr gut. Der Kappa Koeffizient für die Waldmaske ist mit 1,0 perfekt.

Tab. 4.17: Fehlermatrix Baummaske Murnau

Klassen		Referenz	
		<i>Wald</i>	<i>nicht Wald</i>
Klassifikations- ergebnis	<i>Wald</i>	15	0
	<i>nicht Wald</i>	5	30

4.4.6 Zusammenfassung der Genauigkeit der Baummasken

Wie die Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung gezeigt haben, lassen sich die Baummasken, welche mit den unterschiedlichen Datengrundlagen der verschiedenen Untersuchungsgebiete erstellt wurden, mit sehr hohen Genauigkeiten ableiten. Dementsprechend können die Baummasken auch für die Eingrenzung des Extraktionsgebietes für die Einzelbaumableitung verwendet werden. Dies reduziert teilweise deutlich den Rechenaufwand für die Extraktion der Einzelbäume und reduziert gleichzeitig auch Fehlableitungen von Einzelbäumen.

4.5 Ergebnisse Einzelbaumextraktion

4.5.1 Ergebnisse der Focal Statistics Analyse

Die Baumspitzen wurden mit Hilfe der Focal Statistics Analyse für alle prozessierten Digitalen Oberflächenmodelle berechnet. Aufbauend auf den Analysen zur Qualität der DOM (siehe Kap. 4.1 und 4.2) war es das Ziel der vorliegenden Untersuchung den Einfluss des DOM auf die Genauigkeit der Extraktionsergebnisse zu bestimmen. Die Analyse der Genauigkeit erfolgt über die Berechnung der Vollständigkeit und Korrektheit der extrahierten Baumspitzen (siehe Kap. 3.4.2). Diese wurden für alle Untersuchungsgebiete und DOM berechnet. Die visuellen Ergebnisse der Einzelbaumextraktion für jedes DOM sind im Anhang abgebildet.

Genauigkeitsanalyse Habichtswald

Anhand des Untersuchungsgebietes Habichtswald konnten aufgrund des terrestrischen Laser-scanning (TLS) für drei Waldtypen sehr genaue Vollständigkeiten und Korrektheiten bestimmt werden (siehe Tab. 4.18).

Bei der Untersuchung des Nadelwaldes zeigt sich, dass, wie auch bei anderen Einzelbaummethoden, für Nadelwaldbereiche die höchsten Vollständigkeiten und Korrektheiten erreicht werden. Im Nadelwald wurde eine 90-prozentige Vollständigkeit bei einer Korrektheit von 98,3 Prozent erreicht (siehe Abb. 4.29).

Tab. 4.18: Vollständigkeiten und Korrektheiten der Einzelbaumextraktion für den Habichtswald

Waldtyp	Vollständigkeit (%)	Korrektheit (%)
Nadelwald	90,00	98,32
Laubwald Altbestand	80,78	84,74
Laubwald Jungbestand	81,95	79,22

Aufgrund der Morphologie von Laubbäumen ist die Ableitung im Verhältnis zu Nadelbäumen nur mit einer verringerten Vollständigkeit und Korrektheit möglich. Durch die Verwendung der Focal Statistics Analyse wurde im Altbestand des Laubwaldes eine Vollständigkeit von annähernd 81 Prozent erreicht. Die Korrektheit des Ergebnisses lag bei 84,7 Prozent (siehe Abb. 4.30).

Neben der Morphologie der Laubbäume spielen bei der Ableitung von jungen Laubbäumen auch der Abstand der Bäume zueinander sowie die annähernd gleiche Baumhöhe eine große Bedeutung für die Extraktion dieser Bäume. Einerseits verringert die Modellannahme einer Mindestbaumhöhe von drei Metern eine größere Vollständigkeit und andererseits sind die lokalen Maxima in jungen Laubbaumgebieten nicht sehr ausgeprägt (siehe Abb. 4.31).

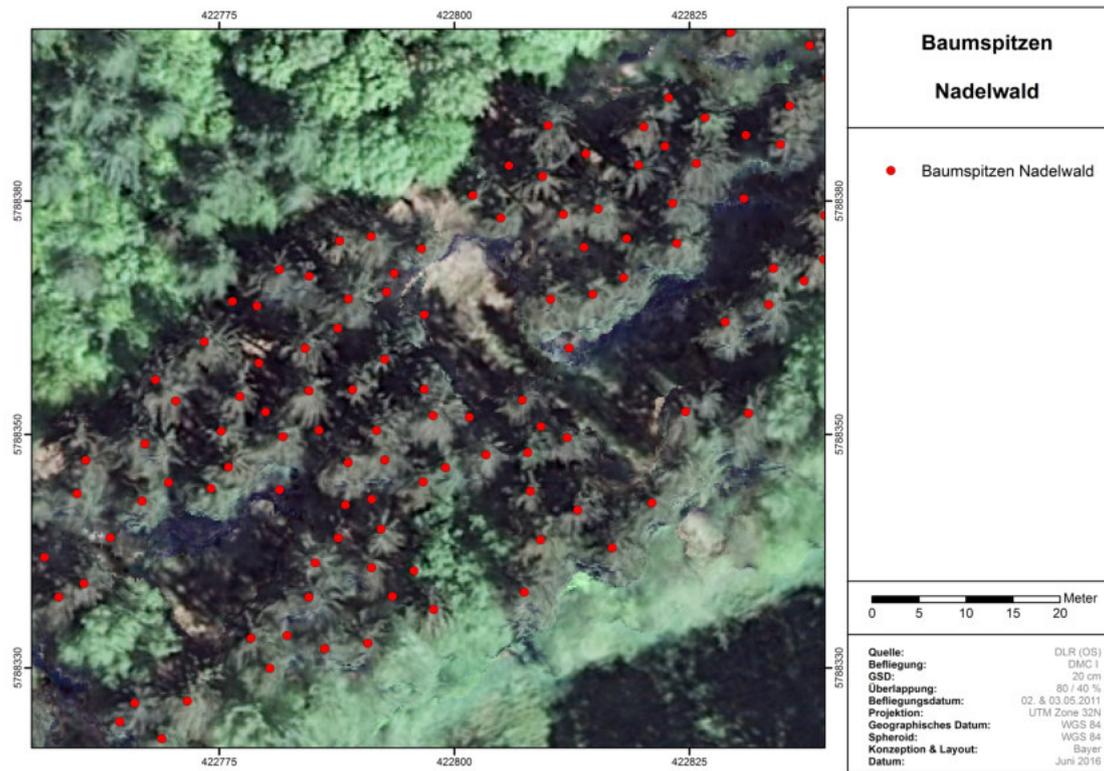


Abb. 4.29: Ergebnisse der automatischen Einzelbaumextraktion im Nadelwald

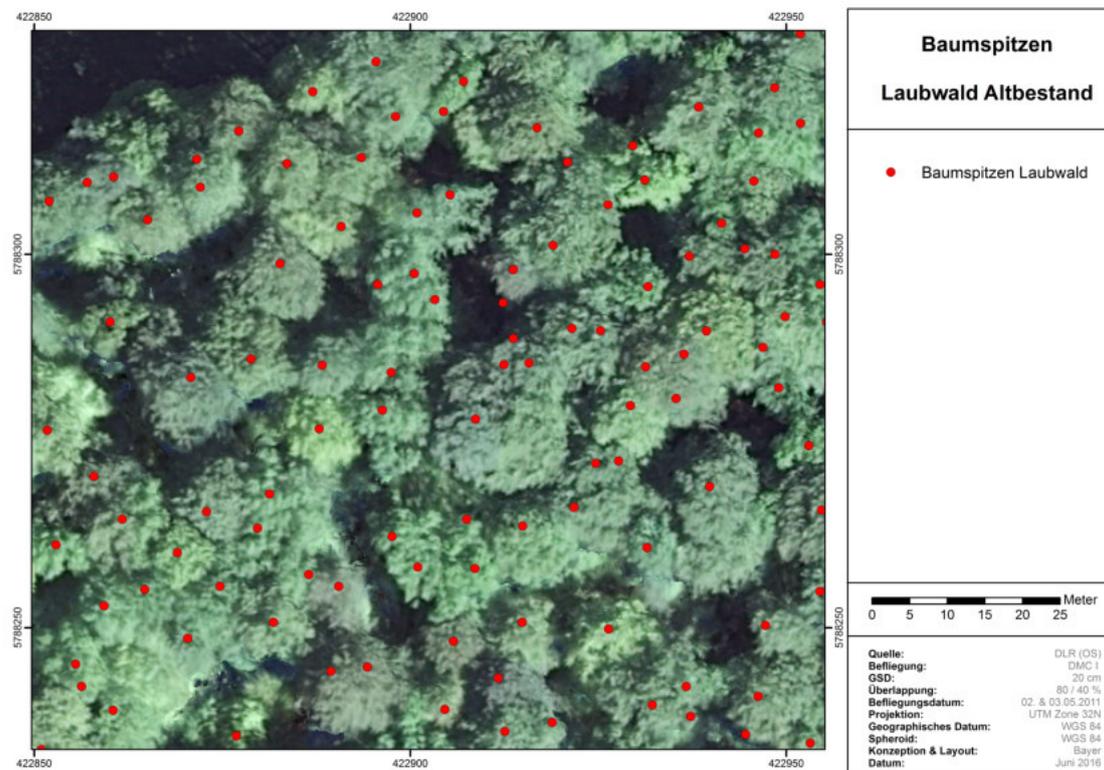


Abb. 4.30: Ergebnisse der automatischen Einzelbaumextraktion im Laubwald (Altbestand)

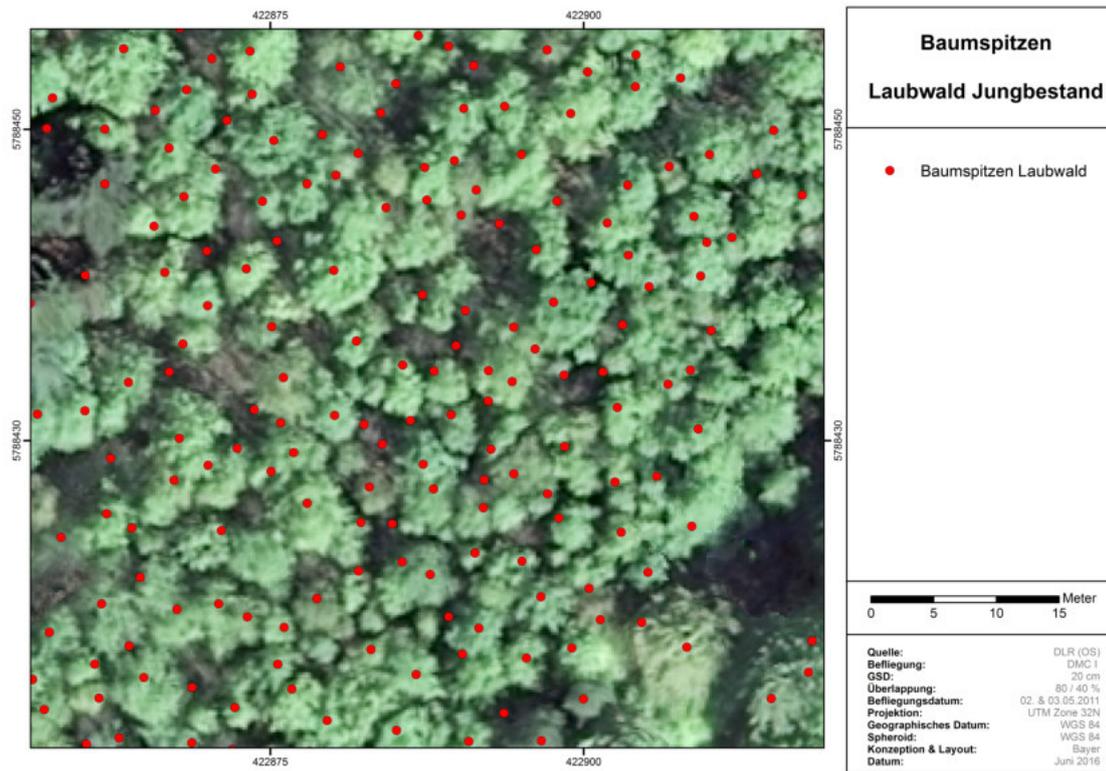


Abb. 4.31: Ergebnisse der automatischen Einzelbaumextraktion im Laubwald (Jungbestand)

Zusammenfassung der Ergebnisse der Ableitung der Baumspitzen

Die Auswertung des Untersuchungsgebietes Habichtswald verdeutlicht, dass Nadelbäume mit sehr hohen Vollständigkeits und Korrektheiten von über 90 Prozent automatisch abgeleitet werden können. Für Laubbäume ist die automatische Einzelbaumextraktion mit einer verringerten Vollständigkeit und Korrektheit von über 80 Prozent möglich. Die Gründe für die Genauigkeitsunterschiede sind vor allem in der Morphologie von Nadel- und Laubbäumen begründet. Nadelbäume zeigen aufgrund ihres Habitus eine eindeutigere und ausgeprägtere Spitze im DOM und können daher einfacher extrahiert und voneinander unterschieden werden. Laubbäume sind durch eine ovalere Form charakterisiert. Diese zeigt oftmals keine eindeutige Baumspitze sowie viele weitere Nebenspitzen. Zudem ist die Neigung der Baumkrone von Laubbäumen weniger steil als bei Nadelbäumen (siehe Abb. 4.32). Dies beeinträchtigt zusätzlich die Trennung von im Bestand stehenden Baumindividuen. Einzel stehende Laubbäume können daher mit deutlich höheren Vollständigkeits und Korrektheiten extrahiert werden als im Bestand stehende Laubbäume. Bei der Betrachtung von Laubbaumbeständen werden die geringsten Genauigkeiten aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit im DOM in monostrukturierten Baumgesellschaften erreicht. Bei Baumgesellschaften mit unterschiedlichem Baumalter und unterschiedlicher Baumgröße können auch Laubbäume mit höheren Vollständigkeits abgeleitet werden.



Abb. 4.32: Habitus von Laub- (links) und Nadelbäumen (rechts)

Die Genauigkeit der Focal Statistics Analyse ist darüber hinaus durch die verwendeten optischen Bilddaten begrenzt. Mit True Orthophoto Mosaiken und photogrammetrisch abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodellen können nur Informationen an der Baumoberfläche extrahiert werden. Unter der Baumkrone wachsende Bäume können mit optischen Daten nicht abgeleitet werden. Diese aus den Eingangsdaten kommende Einschränkung ist auch für Genauigkeit im Untersuchungsgebiet Habichtswald von Relevanz. Aufgrund der heterogenen Altersstruktur der Bäume wuchsen während der Durchführung des TLS im Untersuchungsgebiet viele kleiner Bäume, welche das Kronendach noch nicht erreicht hatten und daher durch die Focal Statistics Analyse nicht extrahiert werden konnten. Diese wurde jedoch im Rahmen der Kontrolldatenerhebung mit vermessen und teilweise aufgrund der Annahme eines Mindestdurchmessers als Kontrollbäume verwendet, da eine Auswertung der Frage, welcher Baum die Oberfläche erreicht hatte, anhand des TLS nicht möglich ist.

Darüber hinaus ist anhand der aus dem normalisierten DOM abgeleiteten Objekthöhe auch keine Unterscheidung zwischen Bäumen und größeren Büschen möglich. Auch können Bäume mit sich stark verzweigenden Baumstämmen oftmals nicht als Einzelbäume extrahiert werden. Da diese Bäume mehrere charakteristische Spitzen ausbilden, werden die Spitzen als Einzelbäume detektiert, was die Korrektheit des Ergebnisses verringert.

Genauigkeitsanalyse Baruth

Mit der Focal Statistics Analyse wurden für das Untersuchungsgebiet Baruth für fast alle untersuchten DOM sehr hohe Vollständigkeiten von über 85 Prozent erreicht. Abbildung 4.33 zeigt die Vollständigkeit der Extraktionsergebnisse in Abhängigkeit von der Bodenauflösung und dem Einschneidewinkel (Längsüberlappung). Alle Baumspitzen wurden in der jeweiligen Originalauflösung abgeleitet. Dabei zeigt sich, dass bei einer GSD von 9 cm mit zunehmend kleinerem Einschneidewinkel die Vollständigkeit stark zunimmt. Beträgt bei einem Einschneidewinkel von 10,5 Grad (60 Prozent Längsüberlappung) die Vollständigkeit nur 81,3 Prozent, steigt sie bei einem Einschneidewinkel von 7,9 Grad (70 Prozent Längsüberlappung) auf 90,5 Prozent an. Bei einer 90-prozentigen Längsüberlappung beträgt die Vollständigkeit 94,4 Prozent und hat damit den höchsten Wert aller berechneten DOM.

Bei einer GSD von 20 cm verhält sich diese Entwicklung umgekehrt. Bei 60 und 70 Prozent Längsüberlappung werden mit über 90 Prozent Vollständigkeit die höchsten Werte erreicht. Bei 90 Prozent Längsüberlappung beträgt die Vollständigkeit leicht verringert 86,6 Prozent. Die Analyse bestätigt die Ergebnisse der Qualitätsuntersuchung der DOM. Bei der höchstauflösenden Datengrundlage von 9 cm ist auch ein kleiner Einschneidewinkel für eine Einzelbaumextraktion mit hohen Vollständigkeiten erforderlich. Die nicht gematchten Bereiche im DOM, wie sie durch einen großen Einschneidewinkel entstehen, können durch die Analyse nicht ausgeglichen werden.

Neben der Vollständigkeit spielt auch die Korrektheit der Ergebnisse bei der Beurteilung der Genauigkeit eine entscheidende Rolle. Abbildung 4.34 zeigt die hohen Korrektheiten aller extrahierten Spitzen. So liegt die geringste Korrektheit aller Ergebnisse bei 98,8 Prozent. Das heißt, fast alle automatisch abgeleiteten Baumspitzen wurden richtig extrahiert. Die genauen Vollständigkeiten und Korrektheiten sind in Tabelle 4.19 dargestellt. Die Ergebnisse aller Befliegungen sind in Anhang 4 abgebildet.

Wird eine Befliegung mit einer Bodenauflösung von 10 cm oder besser geplant ist ein Einschneidewinkel in Flugrichtung von 8 Grad oder kleiner erforderlich. Größere Einschneidewinkel führen zu einer Zunahme der nicht gematchten Bereiche und damit auch zu geringeren Vollständigkeiten. Bei Bodenauflösungen von 15 cm oder 20 cm werden auch mit einem Einschneidewinkel von 10 Grad noch hohe Vollständigkeiten erreicht. Dementsprechend kann mit einer geringeren Längsüberlappung geflogen werden.

Tab. 4.19: Vollständigkeiten und Korrektheiten der Einzelbaumextraktion für Baruth

Längs- überlappung (%)	GSD 9 cm		GSD 15 cm		GSD 20 cm	
	Vollständigkeit (%)	Korrektheit (%)	Vollständigkeit (%)	Korrektheit (%)	Vollständigkeit (%)	Korrektheit (%)
60	81,31	98,75	93,24	99,36	90,16	99,31
70	90,55	98,91	93,30	99,58	90,35	99,53
80	92,18	99,32	92,91	99,33	88,86	99,59
90	94,37	99,75	92,48	99,64	86,64	99,47

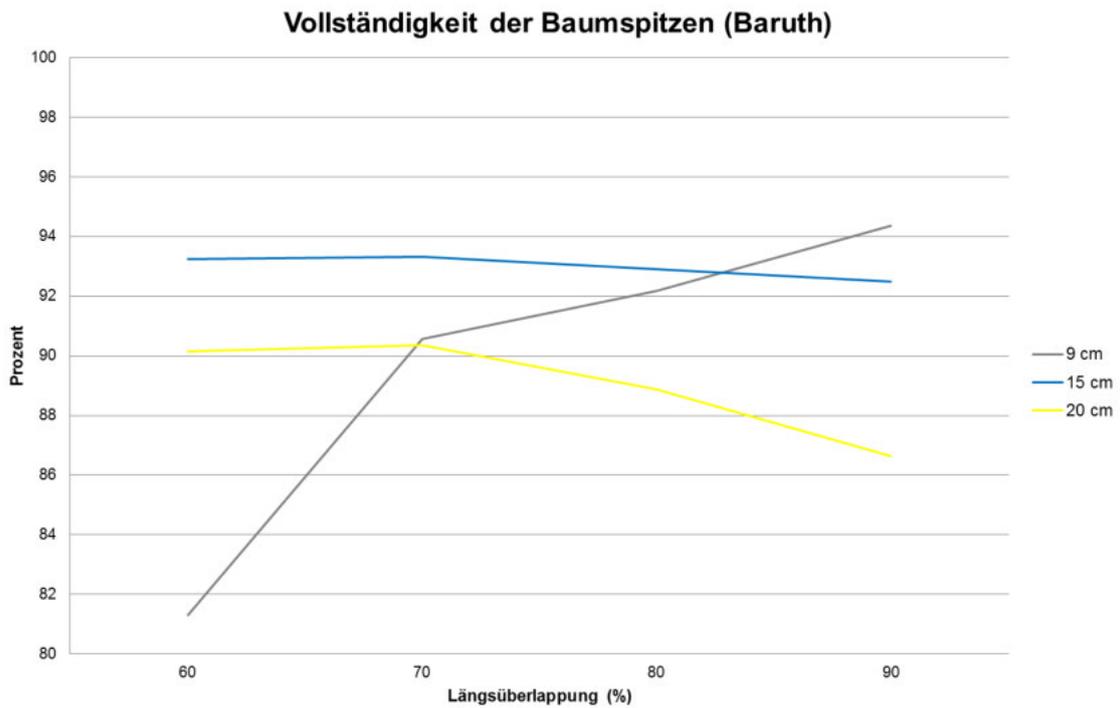


Abb. 4.33: Vollständigkeit der Baumspitzenextraktion im Untersuchungsgebiet Baruth

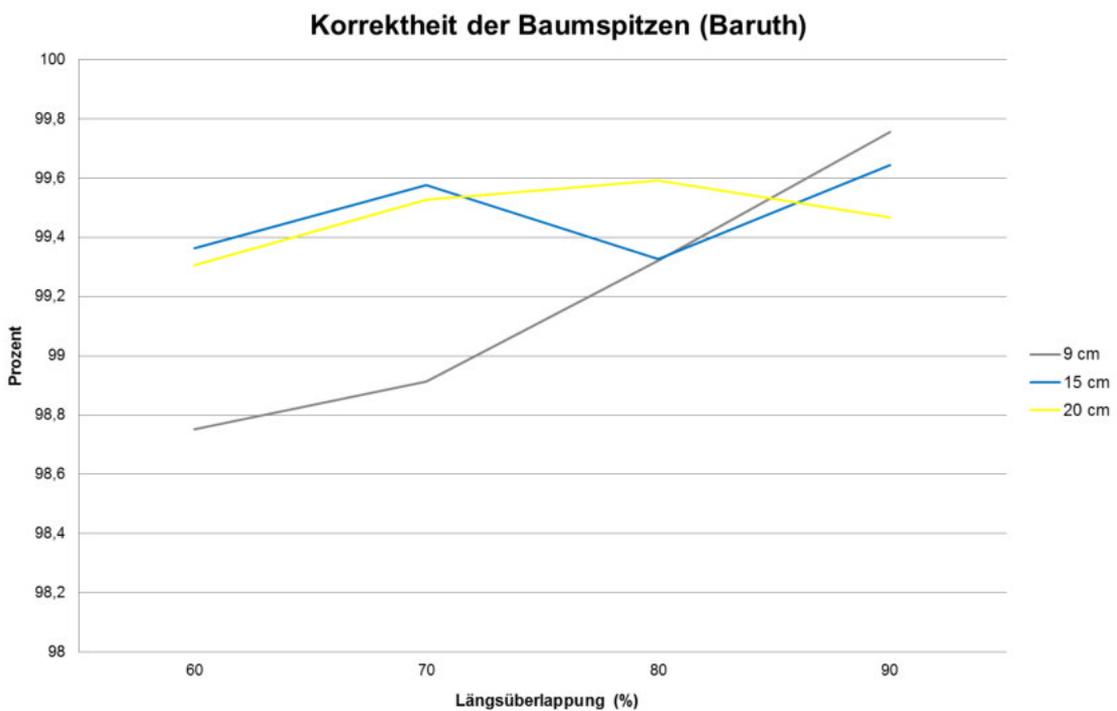


Abb. 4.34: Korrektheit der Baumspitzenextraktion im Untersuchungsgebiet Baruth

Genauigkeitsanalyse München

Auch die Genauigkeitsanalyse der Baumspitzenextraktion von München bestätigt die Ergebnisse der Qualitätsanalyse der Digitalen Oberflächenmodelle. Betrachtet man die verschiedenen Querüberlappungen (80, 60 und 40 Prozent) für die DOM mit einer 80-prozentigen Längsüberlappung zeigt sich auch bei der Genauigkeitsanalyse für die Baumspitzen der geringe Einfluss der Querüberlappung. Für alle drei untersuchten Querüberlappungen wurden sowohl bei den Vollständigkeits, als auch bei den Korrektheiten annähernd gleiche Werte erreicht. Für die Prozessierungen mit einem Downscale von 1 lag dabei die Vollständigkeit ca. zwei bis drei Prozent über den Vollständigkeits der DOM, welche mit Downscale 2 prozessiert wurden. Allerdings zeigen die DOM mit Downscale 2 eine um vier Prozent höhere Korrektheit der extrahierten Baumspitzen (siehe Abb. 4.35).

Abbildung 4.35 zeigt auch den starken Rückgang der Vollständigkeit bei einer Reduzierung der Längsüberlappung auf 60 Prozent und einer Erhöhung des Einschneidewinkels auf 19 Grad. Entsprechend der schlechteren Qualität des DOM sind auch die Vollständigkeits und Korrektheits durch deutlich schlechtere Werte charakterisiert. So fällt die Vollständigkeit für die 60-prozentige Längsüberlappung auf unter 30 Prozent für die DOM mit einem Downscale von 1 und sowie 78 und 71 Prozent für die DOM mit einem Downscale von 2. Auch reduziert sich die Korrektheit der Ergebnisse auf Werte zwischen 70 und 80 Prozent. Die Ergebnisse alle Einzelbaumextraktionen für München sind im Anhang 5 dargestellt.

Die hohen Werte für die Korrektheit für alle untersuchten DOM zeigen die Genauigkeit der Focal Statistics Analyse. Baumspitzen, welche abgeleitet werden, werden überwiegend richtig bestimmt. Die Vollständigkeit hängt hingegen direkt von der Qualität des verwendeten DOM ab und kann durch Focal Statistics Analyse nicht ausgeglichen werden. Für die Bestimmung der Baumspitzen anhand eines Oberflächenmodelles ist die Qualität des DOM entscheidend. Bereiche, in denen kein Matching möglich ist, werden interpoliert. Da jedoch keine Interpolationsmethode die Oberfläche eines Baumes modellieren kann, kommt es in diesen Bereichen zu Verfälschungen der Höhenwerte. Dementsprechend können auch die Baumspitzen in den Bereichen mit Interpolation nicht extrahiert werden.

Für die Bestimmung der Baumspitzen von hochauflösenden Eingangsdaten ist vor allem ein kleiner Einschneidewinkel in Längsrichtung erforderlich, da dieser die großflächige Ableitung von echten Höhenwerten auch auf Bäumen ermöglicht. Eine hohe Querüberlappung und die damit verbundene geringfügig Verbesserung der Qualität des DOM führen bei der Extraktion der Baumspitzen zu keiner signifikanten Erhöhung der Vollständigkeit und Korrektheit der Extraktionsergebnisse. Bezogen auf die Prozessierung der DOM hat eine Einbeziehung eines Quermatchings keinen Einfluss auf die Vollständigkeits und Korrektheits der Ergebnisse der Einzelbaumextraktion. Die Werte für die DOM mit (Across) und ohne (No-across) Quermatching sind annähernd gleich.

Aus Sicht der Längsüberlappung wird daher ein Einschneidewinkel in Längsrichtung von mindestens 10 Grad oder kleiner empfohlen. Bei entsprechender Längsüberlappung ist keine hohe Querüberlappung notwendig. Bezogen auf die DMC II wird daher eine 90- bis 80-prozentige Längsüberlappung sowie eine 40-prozentige Querüberlappung empfohlen.

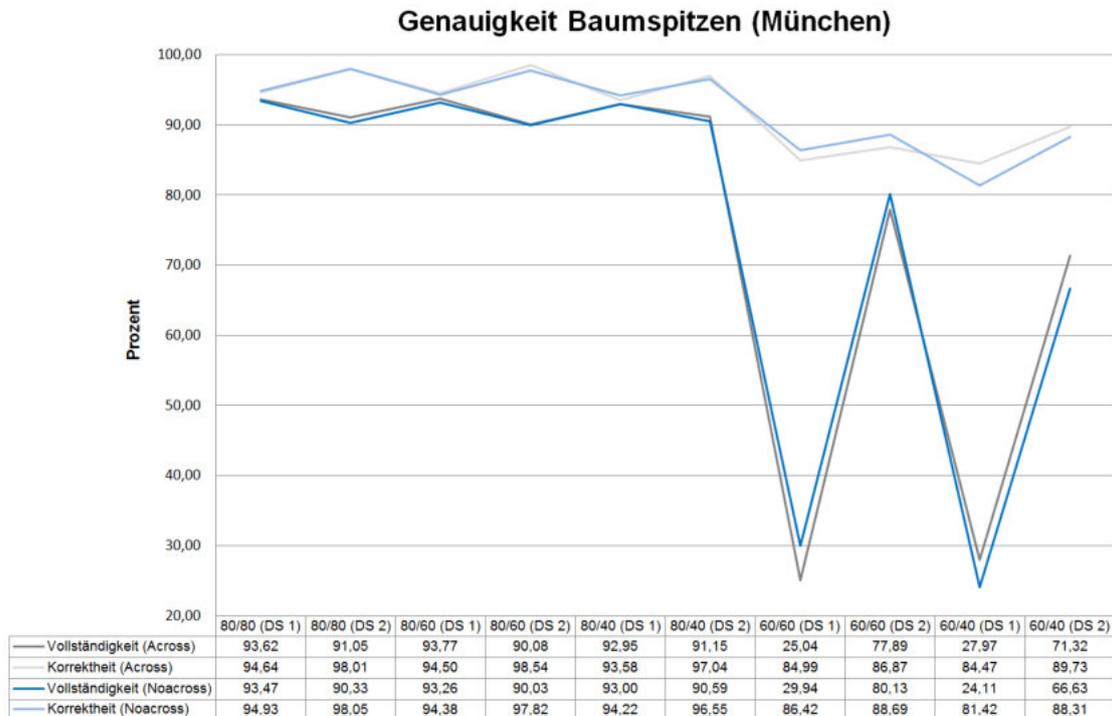


Abb. 4.35: Vollständigkeiten und Korrektheiten der Einzelbaumextraktion für München (ds1 = Downscale 1, ds2 = Downscale 2)

Genauigkeitsanalyse Gleisdorf

Wie auch für Baruth und München, bestätigen sich auch für das Untersuchungsgebiet Gleisdorf, welches mit zwei unterschiedlichen Brennweiten geflogen wurde, die Ergebnisse aus der Untersuchung der Qualität der DOM. Für die DOM, welche aus den Luftbildern mit 210 mm Brennweite prozessiert wurden, ergeben sich die höchsten Werte der Vollständigkeit. Der 5,5 Grad große Einschneidewinkel der 210 mm Befliegung führt zu um ein bis drei Prozentpunkte höheren Vollständigkeitswerten, als der 9,7 Grad große Einschneidewinkel der Befliegung mit 80 mm Brennweite und 80 Prozent Längsüberlappung. Die höchste Vollständigkeit aller DOM wird mit 91,9 Prozent für die 210 mm Brennweite mit einem Downscale von eins erreicht. Die Korrektheit der Extraktionsergebnisse ist für alle untersuchten DOM mit Werten zwischen 88,8 und 94,2 Prozent sehr gut und bestätigt auch für Gleisdorf die Funktionsfähigkeit der Focal Statistics Analyse (siehe Abb. 4.36). Vergleicht man den Einfluss des Downscale auf die Vollständigkeit, zeigt sich für alle DOM eine konstante Abnahme der Vollständigkeit von Downscale eins zu Downscale drei. Alle Ergebnisse der Ableitung der Baumspitzen sind in Anhang 6 dargestellt.

Wie auch bei der Untersuchung der DOM-Qualität sind die Ergebnisse der Befliegung mit 80 mm Brennweite und 60 Prozent Längsüberlappung leicht schlechter als für die 80-prozentige Längsüberlappung. Die nicht matchbaren Bereiche, welche im DOM interpoliert wurden, führen zu einer leichten Reduzierung der Vollständigkeit für den Downscale eins.

Da bei der Einzelbaumableitung die Befliegung mit 210 mm Brennweite zu höheren Vollständigkeitswerten führt, wird auch aus Extraktionssicht eine längere Brennweite empfohlen. Auch für Gleisdorf mit seiner hohen Auflösung bestätigt sich ein optimaler Einschneidewinkel zwischen 5 und 10 Grad.

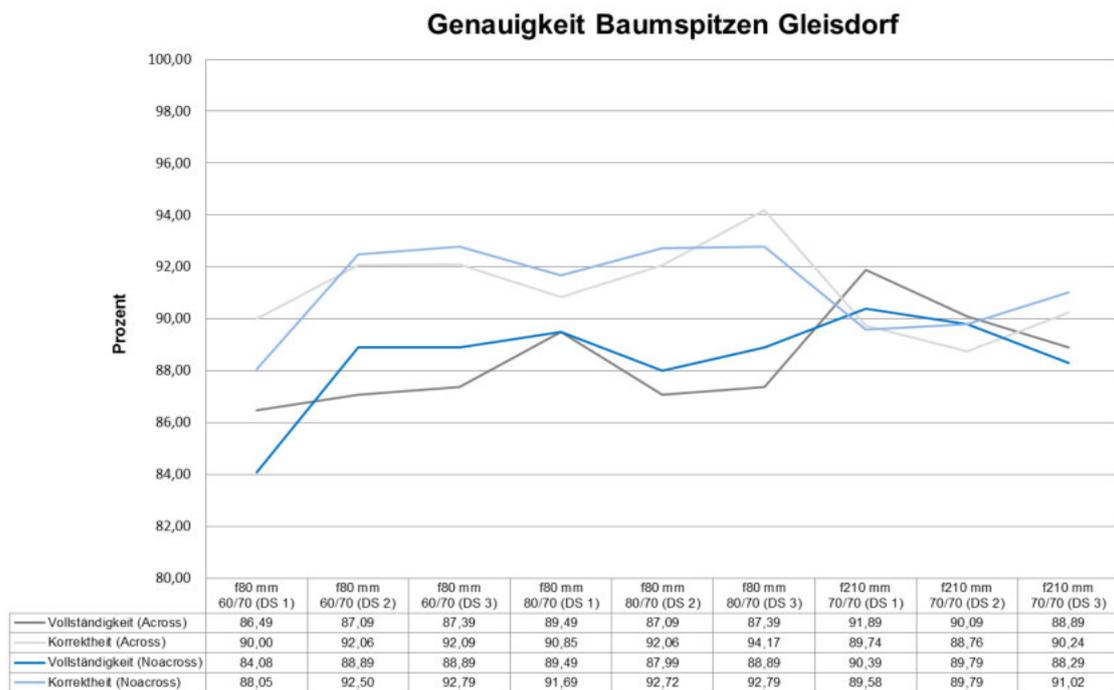


Abb. 4.36: Vollständigkeits- und Korrektheitswerte der Einzelbaumextraktion für Gleisdorf (ds1 = Downscale 1, ds2 = Downscale 2, ds3 = Downscale 3)

Genauigkeitsanalyse Murnau

Anhand des Untersuchungsgebietes Murnau wurde der Einfluss der Flugrichtung auf die Qualität der DOM sowie der Extraktionsergebnisse untersucht. Tabelle 4.20 verdeutlicht, dass es für das Untersuchungsgebiet Murnau keine signifikante Abhängigkeit der Vollständigkeit und Korrektheit der Ergebnisse der Baumspitzenextraktion von der Flugrichtung gibt.

Der in Kapitel 4.1.3 herausgestellte geringe Einfluss der Beleuchtung auf die Qualität der DOM wirkt sich auch auf die Ableitung der Baumspitzen aus. Baumspitzen stellen die höchsten Punkte eines Baumes dar. Aus diesem Grund ist der Einfluss des Sonnenstandes sowie der Flugrichtung auf die Ableitung von Baumspitzen sehr gering und nicht systematisch auswertbar. Die Ergebnisse aller Einzelbaumableitungen für Murnau sind in Anhang 7 abgebildet.

Beeinflusst werden die Ergebnisse aber von der geringen Zahl an Kontrollpunkten. Jeder Kontrollpunkt geht mit 2,1 Prozent in die Vollständigkeit und Korrektheit ein. Dies beeinflusst die statistische Auswertung der Extraktionsergebnisse.

Tab. 4.20: Vollständigkeiten und Korrektheiten der Einzelbaumextraktion für Murnau

Befliegung (Längsüberlappung)	Downscale 3		Downscale 2		Downscale 1	
	<i>Vollständigkeit</i>	<i>Korrektheit</i>	<i>Vollständigkeit</i>	<i>Korrektheit</i>	<i>Vollständigkeit</i>	<i>Korrektheit</i>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Ost-West (90 %)	85,42	89,13	87,50	82,35	97,92	77,05
Nord-Süd (90 %)	91,67	89,80	91,67	84,62	91,67	77,19
Ost-West (80 %)	89,58	86,00	93,75	80,36	89,58	72,88
Nord-Süd (80 %)	89,58	77,23	87,50	79,25	89,58	78,18
Ost-West (70 %)	79,17	84,44	85,42	89,13	89,58	78,18
Nord-Süd (70 %)	81,25	79,59	85,42	68,33	91,67	80,00
Ost-West (60 %)	81,25	84,78	83,33	76,92	91,67	74,58
Nord-Süd (60 %)	91,67	86,27	91,67	81,48	87,50	89,36

4.5.2 Ergebnisse des Region Growing

Die Beurteilung der Genauigkeit der Ergebnisse des Region Growing für Bäume ist nur mit großen Einschränkungen möglich (siehe Kap. 3.4.2). Da die Baumspitzen als Ausgangspunkte für das Region Growing Verfahren verwendet werden, ist die Vollständigkeit der Ergebnisse identisch mit den Ergebnissen der Baumspitzenableitung. Nahezu unmöglich ist die Bestimmung der Korrektheit der extrahierten Baumkronensegmente. Eine Kartierung von Baumkronen auf Basis der verwendeten True Orthophoto Mosaik ist nur für einzeln stehende Bäume möglich. Für im Bestand stehende Bäume können mittels einer Kartierung keine Baumsegmente bestimmt werden, da der überwiegende Teil der Baumkronen von im Bestand stehenden Bäumen ineinander verwachsen sind. Aufgrund der Einschränkung der optischen Bilddaten können die Baumkronen daher nicht visuell im Luftbild voneinander unterschieden werden. Diese Unterscheidung ist nur mit Full Waveform Laserscanning Airborne Aufnahmen und sehr aufwendigen terrestrischen Messungen der einzelnen Baumkronen möglich. Aufgrund der Verschattung der für die Vermessung verwendeten GPS-Geräte weisen die Messungen von Baumkronen jedoch oftmals große Ungenauigkeiten hinsichtlich der absoluten Lage auf und können daher nicht für die Bestimmung der Korrektheit verwendet werden. Zu den optischen Bilddaten zeitgleich aufgenommene Full Waveform Laserscanning Aufnahmen standen im Rahmen der Arbeit nicht zur Verfügung. Eine visuelle Bestimmung der Korrektheit jedes Baumsegmentes ist bei der Beachtung von wissenschaftlichen Standards für die Genauigkeitsbestimmung nicht möglich. Dies liegt einerseits an den optischen Bilddaten selbst und andererseits an der Interpretationsfreiheit bei der Bestimmung von richtigen und falschen Segmenten. Im Rahmen der Arbeit wird daher auf die Angabe der Korrektheit der Baumsegmente verzichtet.

Zielsetzung des Kapitels ist daher die Untersuchung des Einflusses der geometrischen und spektralen Informationen auf die Funktionsweise des verwendeten Region Growing Algorithmus. Demzufolge werden entsprechend des vorgestellten Baummodelles verschiedene Parameter des Baummodelles miteinander kombiniert und verglichen. Für alle Laubbäume wird dabei ein maximaler Kronendurchmesser von 14 Metern angenommen. Für Nadelbäume beträgt der maximale Kronendurchmesser 6 Meter. Die maximalen Durchmesser wurden empirisch bestimmt.

Abbildung 4.37 zeigt die Ergebnisse des Region Growing für den Laubwald des Untersuchungsgebietes Habichtswald unter der ausschließlichen Verwendung von spektralen Informationen. Die geometrischen Informationen der Neigung und Ausrichtung wurden dabei während des Regionenwachstums nicht mit einbezogen. Die Baumkronen konnten nur innerhalb bestimmter spektraler Werte des NDVI wachsen. Dies wurde jeweils durch die absolute Differenz zum vorherigen Pixel bestimmt. Ein Hineinwachsen in Schattenbereiche wurde anhand der berechneten Helligkeitswerte verhindert.

Für die Berechnung der Baumkronen von Abbildung 4.38 wurden die Neigung während des Regionenwachstums hinzugefügt. Aufgrund der rauen und relativ flachen Oberfläche von Laubbäumen wurde als Abbruchkriterium eine Neigung von größer als 60 Grad angenommen. Diese Oberflächeneigenschaften führen bei der Verwendung der Ausrichtung zu einer Verschlechterung des Ergebnisses, weshalb die Ausrichtung für das Region Growing bei Laubbäumen nicht verwendet wurde. Abbildung 4.38 verdeutlicht sehr gut den Einfluss der zusätzlichen geometrischen Informationen auf das Region Growing. Die Einbeziehung der Neigung ermöglicht eine genauere Abgrenzung der Baumkronen, da diese bei gleichen Baumarten oftmals sehr ähnliche Spektralwerte aufweisen und anhand dieser nicht trennbar sind.

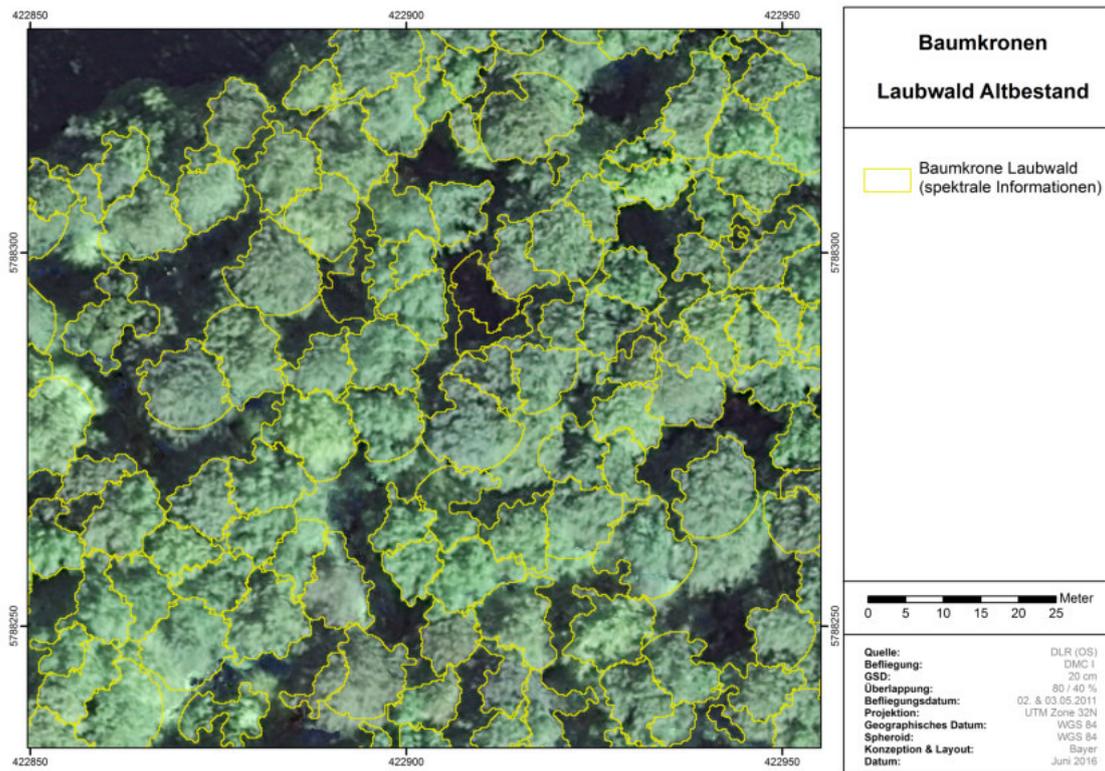


Abb. 4.37: Ergebnisse des Region Growing für den Laubwald Altbestand unter Berücksichtigung von spektralen Informationen

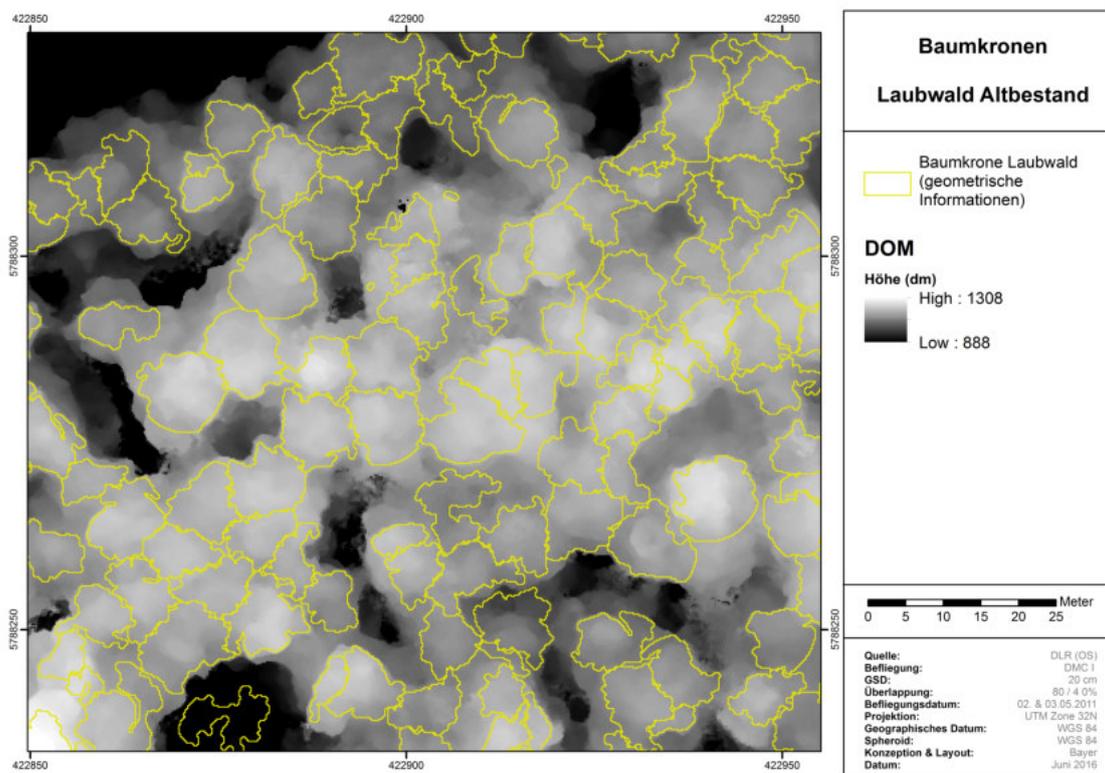


Abb. 4.38: Ergebnisse des Region Growing für den Laubwald Altbestand unter Berücksichtigung von geometrischen Informationen

Abbildung 4.39 zeigt die Ergebnisse des Region Growing für den Nadelwaldbereich des Hachtswaldes unter ausschließlicher Berücksichtigung von spektralen Informationen. Auch für den Nadelwald lassen sich mit dem verwendeten Region Growing Verfahren Baumkronen bestimmen. Abbildung 4.39 zeigt allerdings auch, dass die ausschließliche Verwendung der spektralen Informationen in einigen Fällen nicht ausreichend ist. So wachsen einige Baumsegmente über die eigentliche Baumkrone hinaus weiter, bis sie an die Grenze des maximalen Durchmessers stoßen und ein kreisförmiges Baumsegment bilden. Die Abbildungen 4.40 und 4.41 verdeutlichen anhand eines Baumes den Unterschied zwischen der Verwendung von ausschließlich spektralen Informationen und zusätzlichen geometrischen Informationen. Berücksichtigt man nur die spektralen Informationen wächst das Segment über die Krone hinaus und teilweise in andere Bäume hinein. Erweitert man das Region Growing um die Neigung, bricht das Region Growing am Kronenrand ab (siehe Abb. 4.40). Ebenso verhält es sich bei Hinzunahme der Ausrichtung der jeweiligen Neigung. So führt eine Änderung der Ausrichtung bei Erreichen eines Nachbarbaumes oder ebener Fläche zum Abbruch des Region Growing (siehe Abb. 4.41).

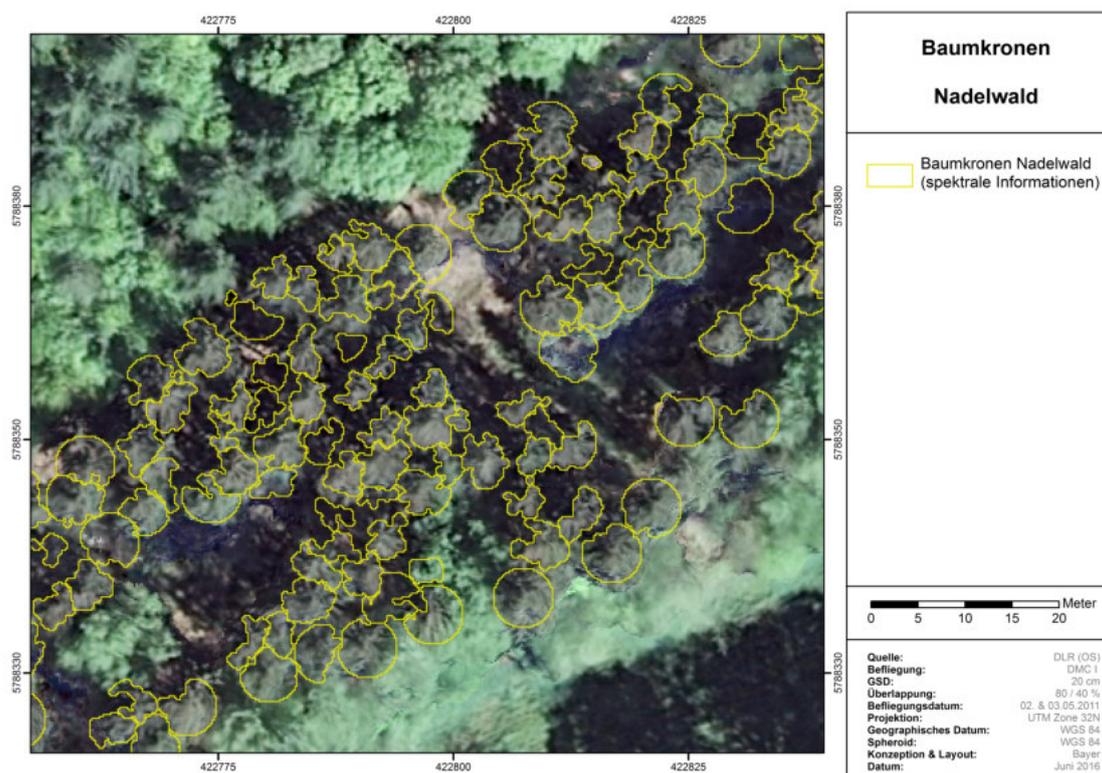


Abb. 4.39: Ergebnisse des Region Growing für den Nadelwald unter Berücksichtigung von spektralen Informationen

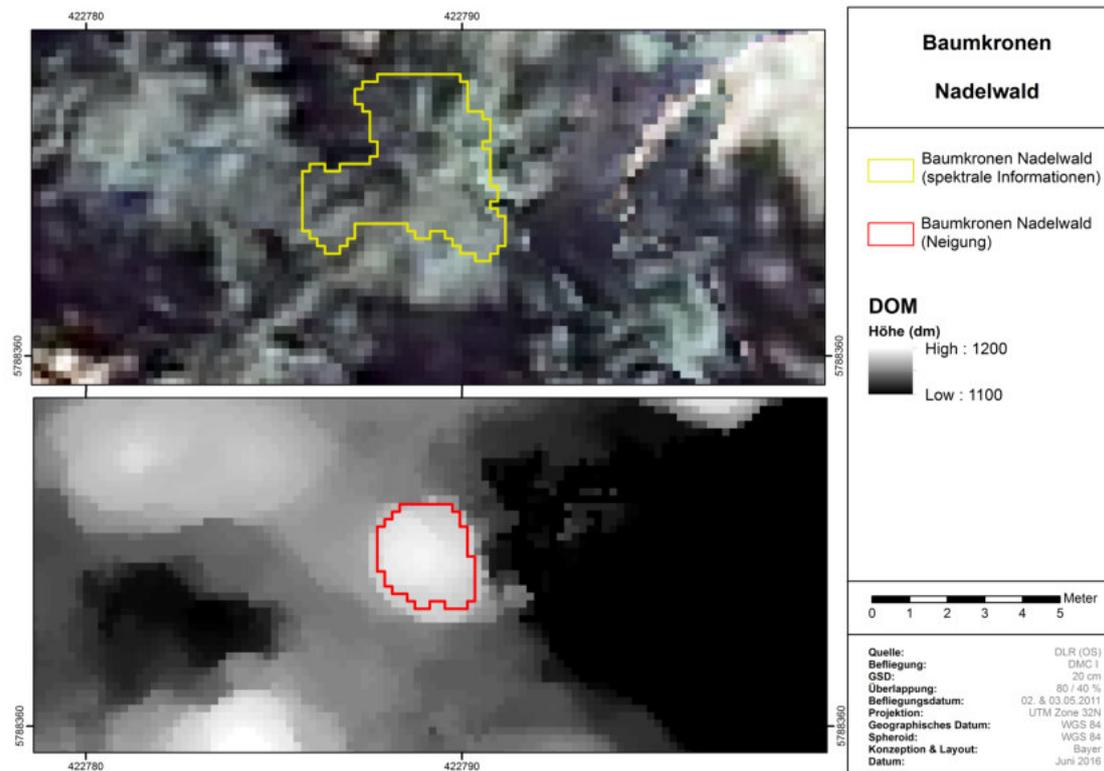


Abb. 4.40: Region Growing für Nadelbäume auf Basis von spektralen Informationen (oben) und Neigung (unten)

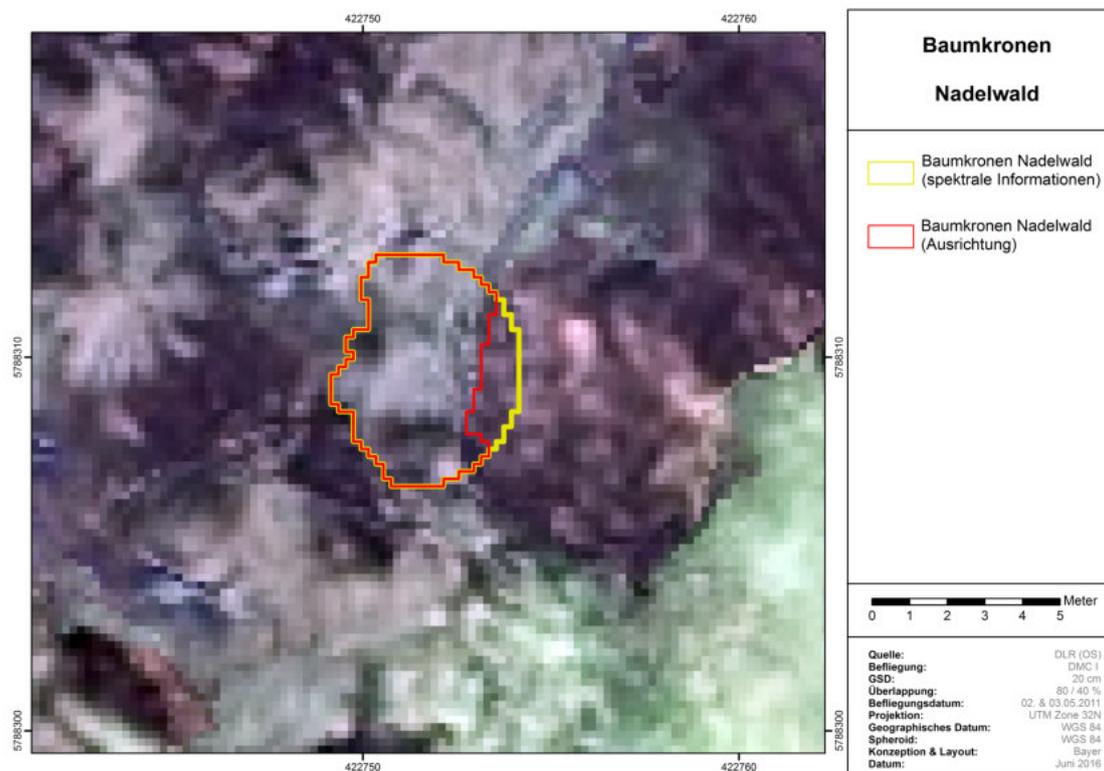


Abb. 4.41: Region Growing für Nadelbäume auf Basis von spektralen Informationen und Ausrichtung

4.5.3 Übertragung der Einzelbaummethode auf weitere Kamerasysteme und Regionen

Ziel der Arbeit war unter anderem die Entwicklung einer Methode, welche für verschiedene Regionen in Mitteleuropa und unterschiedliche Kamerasysteme verwendbar ist. Daher wurden im Rahmen der Arbeit sechs Kamerasysteme hinsichtlich ihrer Eignung für die Einzelbaumextraktion systematisch untersucht. Für alle Kamerasysteme konnte die Eignung für die Ableitung von Einzelbäumen nachgewiesen werden. Ziel dieses Kapitels ist die Untersuchung der Eignung der vorgestellten Methode für weitere Kamerasysteme und Regionen. Dafür wurde mit der UltraCamX ein weiteres weit verbreitetes großformatiges Kamerasystem sowie mit der MACS-TumbleCam (Brauchle et al. 2014) ein Kamerasystem für unbemannte Fluggeräte (UAV) ausgewählt.

Abbildung 4.42 und 4.43 zeigen die Ergebnisse einer UltraCamX-Befliegung von Berlin aus dem Jahr 2010 für städtische Laubbäume. Die Einzelbaumextraktion der Stadtbäume wurde ebenfalls mit der Focal Statistics Analyse sowie einem Region Growing durchgeführt und die Genauigkeiten im Rahmen der Veröffentlichung von Poznanska, Bayer und Bucher (2013) erhoben.

Auch für die UltraCamX-Befliegung können hohe bis sehr hohe Genauigkeiten mit der im Rahmen der Arbeit vorgestellten Methode zur Ableitung von Einzelbäumen erreicht werden. Die Ergebnisse für den städtischen Bereich von Berlin decken sich mit den Ergebnissen des Waldgebietes Habichtswald. Straßenbäume lassen sich dabei mit leicht höheren Vollständigkeits- und Korrektheitswerten ableiten. Die Gründe hierfür liegen vor allem am Standort der Bäume in der Stadt. Straßenbäume stehen häufig als Einzelbäume und nicht so häufig im geschlossenen Bestand wie Waldbäume. Aufgrund der dadurch eindeutigeren spektralen und geometrischen Abgrenzbarkeit von einzeln stehenden Stadtbäumen, können diese mit höheren Genauigkeiten abgeleitet werden (siehe Abb. 4.43).



Abb. 4.42: Genauigkeiten der Einzelbaumextraktion für ältere Straßenbäume

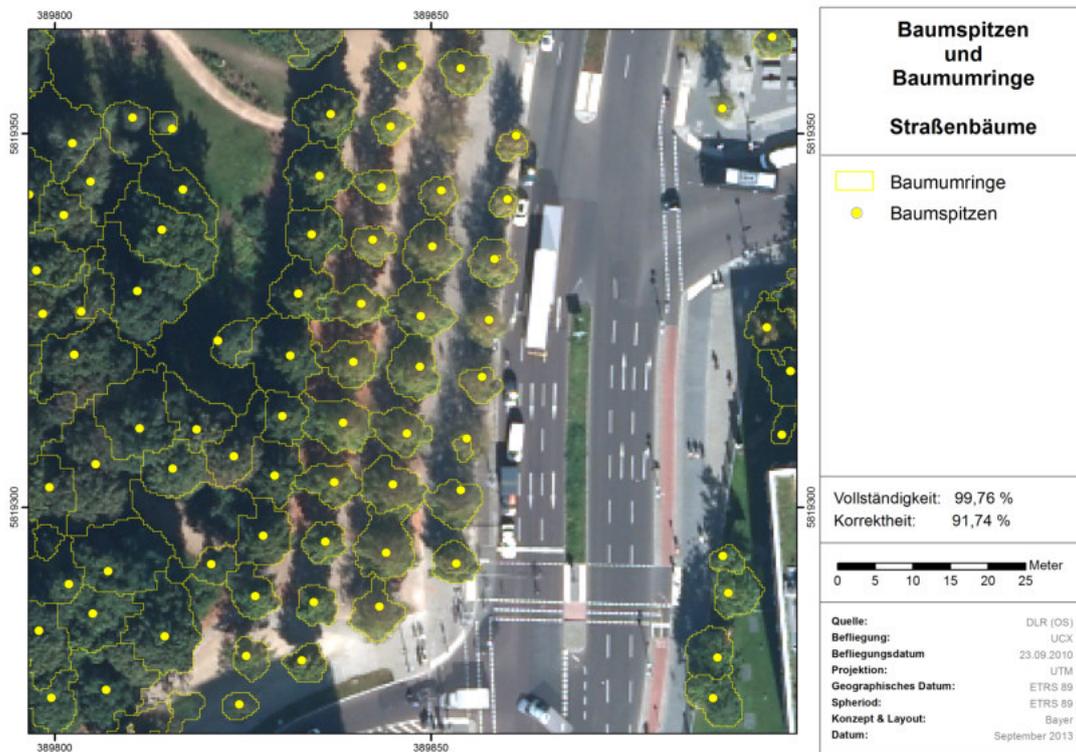


Abb. 4.43: Genauigkeiten der Einzelbaumextraktion für jüngere Straßenbäume

In der jüngeren Vergangenheit werden Luftbilder zunehmend auch mit unbemannten Fluggeräten (UAV) und dafür passenden Kameras erhoben. Mit unbemannten Flächenfliegern können effektiv kleinere Waldgebiete befliegen werden. Daher wird mit der MACS-TumbleCam eine Messbildkamera für unbemannte Flächenflieger hinsichtlich ihrer Eignung für die Ableitung von Einzelbäumen untersucht. Dabei handelt es sich um eine Befliegung aus dem April 2010 mit einer Auflösung von 3 cm. Im Rahmen der Befliegung wurden Nadelbäume und unbelaubte Laubbäume aufgenommen.

Wie die Abbildungen 4.44 und 4.45 verdeutlichen, können auch aus Luftbildern, welche mit einem UAV aufgenommen wurden, Digitale Oberflächenmodelle und True Orthophoto Mosaiken abgeleitet werden und für die Extraktion von Einzelbäumen verwendet werden. Die Ergebnisse hinsichtlich der Genauigkeit der extrahierten Einzelbäume sind mit den Genauigkeiten von bemannten Bildflügen vergleichbar. Auch für Befliegungen mit einem UAV können Nadelbäume mit sehr hohen Vollständigkeits- und Korrektheitsraten abgeleitet werden. Die Genauigkeit der Laubbäume liegt auch für UAV-Aufnahmen unter der Genauigkeit von Nadelbäumen. Abbildung 4.45 zeigt darüber hinaus auch, dass aufgrund der starken Ausrichtung des verwendeten Baummodells auf die geometrischen Eigenschaften von Bäumen auch unbelaubte Laubbäume extrahiert werden können.

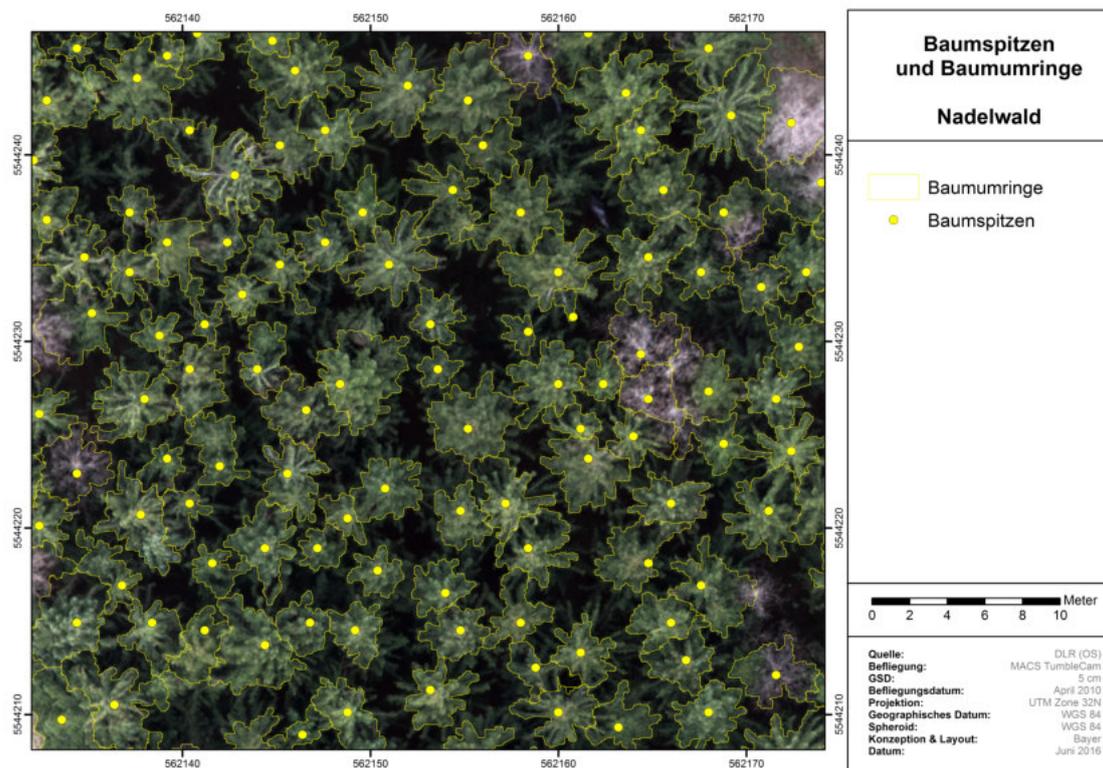


Abb. 4.44: Baumspitzen und Baumumringe von Nadelbäumen (Datengrundlage: MACS-TumbleCam)

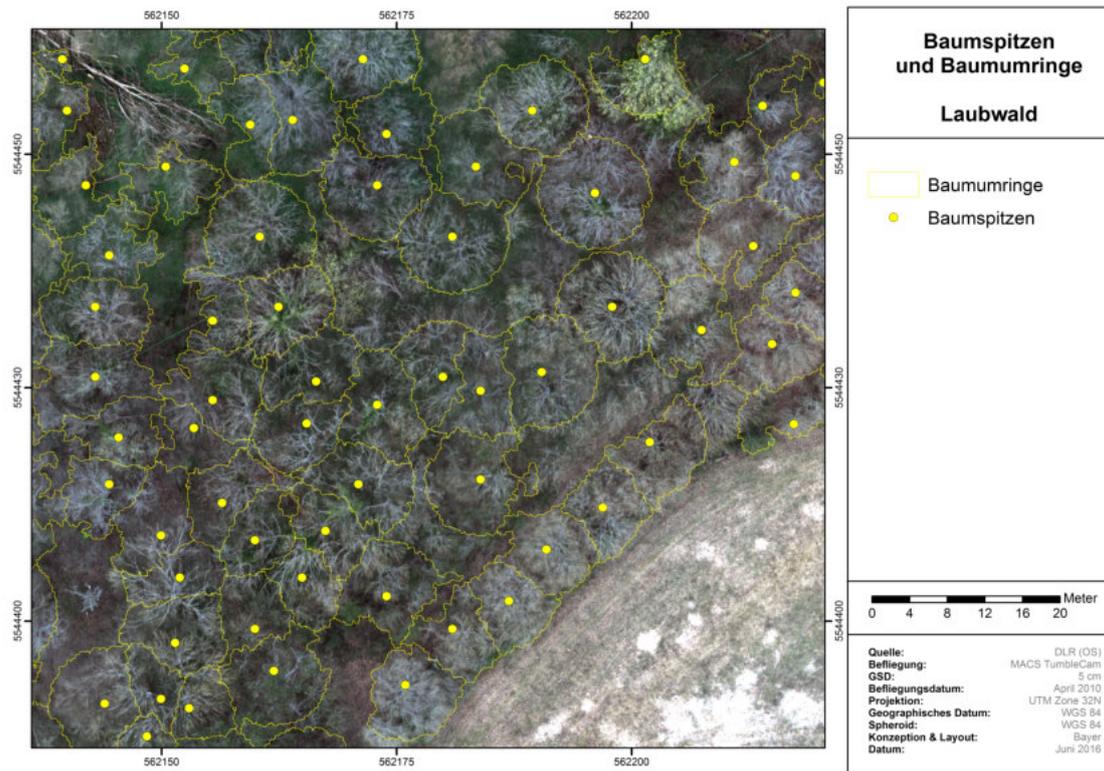


Abb. 4.45: Baumspitzen und Baumumringe von unbelaubten Laubbäumen (Datengrundlage: MACS-TumbleCam)

5 Schlussfolgerung / Konklusion

5.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Ziel der Arbeit war die Verifizierung oder Falsifizierung der eingangs gestellten Forschungshypothese, wonach die Genauigkeit einer Einzelbaumextraktion aus photogrammetrisch abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodellen und hochauflösenden True Orthophoto Mosaiken sowohl von der Qualität der Eingangsdaten als auch von der Funktionsfähigkeit des Extraktionsalgorithmus bestimmt werden. Zur Überprüfung der Forschungshypothese wurden eine Reihe von erkenntnisleitenden Forschungsfragen gestellt, welche im Rahmen der Arbeit mit Hilfe der umfassenden Literatur sowie den eigenen empirischen Untersuchungen beantwortet wurden. Zur Überprüfung der Forschungshypothese werden im Folgenden zunächst die einzelnen erkenntnisleitenden Fragestellungen erneut aufgegriffen und zusammenfassend beantwortet.

Forschungsfrage 1:

Sind hochauflösende TOM und photogrammetrisch abgeleitete DOM für die automatische Extraktion von Einzelbäumen geeignet?

Passive optische Luftbildsysteme messen die an der Erdoberfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung der Sonne. Somit können mit Luftbildern und aus den von ihnen abgeleiteten DOM die reflektierte Energie sowie bei entsprechender Überlappung der Einzelbilder die geometrische Oberfläche von Bäumen gemessen und extrahiert werden. Ein Großteil der in Kapitel 2.4 vorgestellten Ansätze zur Einzelbaumextraktion lässt sich auf Luftbilder und photogrammetrisch abgeleitete DOM übertragen bzw. verwendet diese bereits als Datengrundlage. Die Ergebnisse der vielfältigen Ansätze verdeutlichen, dass Luftbilder und DOM eine sinnvolle Datengrundlage für die Einzelbaumextraktion darstellen. Darüber hinaus haben auch die empirischen Untersuchungen im Rahmen der Arbeit aufgezeigt, dass durch die Verwendung photogrammetrisch abgeleiteter DOM und von True Orthophoto Mosaiken Einzelbäume mit sehr hohen Genauigkeiten extrahiert werden können.

Allerdings ist die Extraktion auf die Oberfläche und damit die obersten Blattorgane beschränkt. Aufgrund der physikalischen Einschränkungen von optischen Bilddaten können keine Informationen über den Unterbau abgeleitet werden. Unterhalb der obersten Blattoberfläche wachsende Bäume können mit passiven optischen Fernerkundungsdaten nicht gemessen und extrahiert werden (siehe Kap. 2.2.1 & 4.5.1).

Da geschlossene Waldbestände oftmals durch kleinere Bäume im Unterwuchs charakterisiert sind, ist bei Verwendung von Luftbildern und photogrammetrisch abgeleiteten DOM keine 100-prozentige Vollständigkeit der Ergebnisse möglich.

Forschungsfragen 2 und 3:

Welche Flug- und Kameraparameter haben in welchem Umfang Einfluss auf die Qualität der prozessierten TOM und DOM?

Welche Mindestanforderungen hinsichtlich der Flug- und Kameraparameter müssen bei einer Luftbildbefliegung erfüllt sein, damit die prozessierten TOM und DOM für die Einzelbaumextraktion verwendet werden können?

Wie die theoretischen Ausarbeitungen (siehe Kap. 2.2) und empirischen Untersuchungen (siehe Kap. 4) gezeigt haben, gibt es eine Reihe von Parametern, welche die Datenqualität beeinflussen und sich gegenseitig bedingen. Einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der DOM hat der Einschneidewinkel. Dieser hängt direkt von der Brennweite und der Überlappung der Einzelbilder ab und kann unabhängig von der Flughöhe für jedes Kamerasystem berechnet werden. Die empirischen Untersuchungen in allen Untersuchungsgebieten haben gezeigt, dass der optimale Einschneidewinkel für das Matching von Bäumen bei 5 Grad liegt. Ein Einschneidewinkel bis maximal 10 Grad führt bei der DOM-Generierung in Waldgebieten zu guten Ergebnissen, allerdings nehmen mit zunehmendem Einschneidewinkel die sichttoten Räume zu, was wiederum zu nicht matchbaren Bereichen auf der Baumoberfläche führt.

Die Brennweite und der daraus folgende maximale Öffnungswinkel des verwendeten Luftbildkamerasystems beeinflussen mit zwei Eigenschaften die Qualität der prozessierten DOM maßgeblich. Eine kurze Brennweite und ein großer Öffnungswinkel führen zu einer zunehmenden perspektivischen Verzerrung von erhöhten Objekten zum Bildrand hin. Dies hat zur Folge, dass vor allem an den Bildrändern erhöhte Objekte zum Rand hin verkippen und sichttote Räume entstehen. Da in sichttoten Räumen kein Matching möglich ist, können in diesen Bereichen keine Höheninformation gemessen und dementsprechend keine DOM abgeleitet werden. In diesen Regionen können infolgedessen auch keine Einzelbäume extrahiert werden, da diese Bereiche je nach Prozessierungsmethode gar keine Höheninformationen oder interpolierte Höhenwerte enthalten. Da keine Interpolationsmethode in der Lage ist, die Höheninformationen von Bäumen zu rekonstruieren, sind diese Höhenwerte im Bereich von Bäumen aufgrund der völlig unterschiedlichen Morphologie der Bäume sehr fehlerhaft und beeinflussen damit direkt das Extraktionsergebnis.

Neben der Brennweite wird der Einschneidewinkel von der Überlappung der Einzelbilder bestimmt. Die Mindestüberlappung in Längsrichtung wird von der verwendeten Brennweite bestimmt. Bei kurzen Brennweiten kommerzieller Kamerasystem von 80 mm bis 100 mm ist für einen kleinen Einschneidewinkel zwischen 5 und 10 Grad eine hohe Längsüberlappung von 80 bis 90 Prozent erforderlich, während bei längeren Brennweiten von über 210 mm

eine Längsüberlappung von 60 bis 70 Prozent ausreichend für das Matching von Bäumen ist. Neben der Längsüberlappung beeinflusst auch die Querüberlappung das Matchingergebnis, da durch benachbarte Flugstreifen nicht gematchte Bereiche aufgefüllt und NoData Bereiche im DOM reduziert werden. Die Querüberlappung einer Befliegung sollte sich daher am Einschneidewinkel in Flugrichtung orientieren.

Ein weiterer Flugparameter, der die Qualität der Digitalen Oberflächenmodelle für Bäume und Waldbereiche entscheidend beeinflusst, ist die Bodenauflösung. Während für erhöhte, künstliche Objekte und ebene Flächen eine hohe Bodenauflösung meist zu einer besseren Qualität der DOM führt, verhält sich dies für Bäume tendenziell umgekehrt. Aufgrund der Mikrosichtschatten, Blickwinkeleffekten sowie der Bewegung der Blätter und Äste im Wind reduziert sich mit zunehmender Bodenauflösung die DOM-Qualität im Bereich von Bäumen. Eine Bodenauflösung von 10 cm und höher aufgelöst ist für ein Matching in Originalauflösung ungeeignet. Wie die empirischen Analysen zur Bodenauflösung anhand des Untersuchungsgebietes Baruth verdeutlicht haben, liegt die beste Bodenauflösung für das Matching von Bäumen zwischen 15 cm und 20 cm.

Einen geringen Einfluss auf die Prozessierung von DOM hat die Flugrichtung. Dies gilt vor allem für Befliegungen mit einem hohen Sonnenstand und Kamerasysteme mit einer hohen radiometrischen Auflösung. Bei niedrigen Sonnenständen und stärkeren echten Schatten nimmt der Einfluss der Flugrichtung zu, da sich echte Schatten und Sichtschatten überlagern können. Für die Ableitung von DOM in Waldgebieten ist daher eine Befliegung zur Mittagszeit mit dem höchsten Sonnenstand sowie die Verwendung eines modernen Kamerasystems mit einer hohen radiometrischen Auflösung notwendig.

Forschungsfrage 4:

Was ist die beste Kombination von Flugparametern für eine automatische Extraktion von Laub- und Nadelbäumen mit einer großen Vollständigkeit und Korrektheit der Extraktionsergebnisse?

Zusammenfassend lässt sich aus den empirischen Untersuchungen folgende Kombination von Flugparametern empfehlen:

- Ein Einschneidewinkel von 5 Grad, da dieser ein vollständiges Matching bei ausreichender Höhengenaugigkeit ermöglicht.
- Eine lange Brennweite (aufgrund der perspektivischen Verzerrung und des Einschneidewinkels).
- Bei kommerziellen Kamerasystemen eine vom Einschneidewinkel abhängige hohe Längsüberlappung.
- Je größer der Einschneidewinkel, desto größer sollte die Querüberlappung sein. Jedoch gilt: fehlende Matchings aus der Längsüberlappung können durch Nachbarstreifen und ein Quermatching nur bedingt ausgeglichen werden.

- Eine Bodenauflösung von 15 cm bis 20 cm, da mit zunehmender Bodenauflösung der Anteil der nicht matchbaren Bereiche zunimmt. Höhere Bodenauflösungen erfordern einen sehr kleinen Einschneidewinkel.

Forschungsfragen 5 und 6:

In welchem Umfang beeinflusst die verwendete Prozessierungsmethode die Qualität der DOM?

Was sind die geeignetsten Prozessierungsparameter hinsichtlich einer großen Extraktionsgenauigkeit von Einzelbäumen?

Neben den Befliegungsparametern beeinflusst auch die Prozessierungsmethode die Qualität der Digitalen Oberflächenmodelle. Den größten Einfluss hat die Art der Prozessierung bei der Bodenauflösung. Luftbilder mit einer Bodenauflösung höher als 10 cm können in ihrer Originalauflösung im Bereich von Bäumen oftmals nicht vollständig gematcht werden. Durch die Verwendung eines pyramidalen Matchings oder des Downscale beim SGM des DLRs können einerseits auch sehr hochauflösende Luftbilder für die Prozessierung verwendet werden. Andererseits führt die Verwendung eines Downscale von zwei oder drei zu einer Reduzierung der Auflösung des DOM um das Zwei- bzw. Dreifache. Diese Auflösungsreduzierung verringert zwar die Qualität des DOM, ermöglicht aber die Ableitung von echten Höheninformationen in Bereichen, in denen vorher kein Matching möglich war. Für die Prozessierung der DOM im Bereich von Bäumen bedeutet dies, dass die Prozessierung in mehreren Downscalestufen erfolgen sollte.

Mit Downscale 3 oder 4 sollte in einem ersten Schritt das gesamte Gebiet gematcht werden. Anschließend sollten Downscale 2 und 1 berechnet werden. Die nicht gematchten Bereiche sollten mit Informationen aus den vorangegangenen Downscalen aufgefüllt werden. In Bezug auf die automatische Ableitung von Einzelbäumen hat die Anwendung des Downscals sowie die damit verbundene Reduzierung der Auflösung jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit des Extraktionsergebnisses.

Einen nur sehr geringen Einfluss hat die Anwendung eines Quermatchings, bei welchem quer zur Flugrichtung Bildpaare aus benachbarten Bildstreifen miteinander gematcht werden. Aufgrund des oftmals sehr großen Einschneidewinkels quer zur Flugrichtung hat das Quermatching keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität des DOM. Für die Prozessierung mit SGM ist daher meist ein ausschließliches Matching in Flugrichtung (Noacross) sinnvoll.

Neben dem Quermatching hat auch die Anzahl der miteinander innerhalb eines Flugstreifens gematchten Bilder überwiegend keinen positiven Einfluss auf die Qualität der DOM. Die Berücksichtigung von übernächsten Nachbarbildern ist daher nur bei Befliegungen mit einer hohen Längsüberlappung und dadurch bedingten sehr kleinen Einschneidewinkeln sinnvoll. Bei DOM Prozessierung mit SGM sollte daher in der Regel ein Inflightparameter von eins angewendet werden.

Die Analysen zum Einfluss der Prozessierungsparameter haben gezeigt, dass im Rahmen der Prozessierung der Digitalen Oberflächenmodelle nur geringfügige Qualitätsverbesserungen erzielt werden konnten. Daher müssen bei der Planung einer Luftbildbefliegung die Flugparameter im Vordergrund stehen. Qualitätseinbußen, welche durch die gewählten Flugparameter entstehen, können im Rahmen der Prozessierung nicht ausgeglichen werden.

Forschungsfragen 7 und 8:

Welche Eingangsdaten sind für eine lagegenaue Einzelbaumextraktion mindestens notwendig?

Mit welchen Eingangsdaten kann die Extraktionsgenauigkeit verbessert werden?

Die bereits entwickelten Einzelbaumextraktionsmethoden verwenden teilweise sehr unterschiedliche Eingangsdaten für die Ableitung der Einzelbäume. Die besten Ergebnisse wurden jedoch immer durch die Verwendung eines Digitalen Oberflächenmodellen erzielt, Dabei haben sich auch photogrammetrisch abgeleitete DOM als geeignete Datengrundlage erwiesen.

Die ausschließliche Verwendung von spektralen Informationen aus Luftbildern führt hingegen zu einer schlechteren Genauigkeit der Extraktionsergebnisse. Die Ursache hierfür liegt in den im theoretischen Teil der Arbeit ausführlich dargestellten Reflexionseigenschaften der Blattorgane. Die Reflexionseigenschaften von Bäumen sind von einer Vielzahl sich gegenseitig beeinflussender Faktoren abhängig, die nur mit sehr großem Aufwand modelliert werden können. Daher beschränken sich alle Extraktionsansätze im Bereich der Einzelbaumextraktion auf die Identifikation von lokalen Helligkeitsmaxima oder lokalen Helligkeitsminima.

Die empirischen Untersuchungen im Rahmen der Arbeit haben die Ergebnisse bereits veröffentlichter Extraktionsmethoden bestätigt. Die Verwendung eines DOM ist eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Einzelbaumextraktion mit hohen bis sehr hohen Genauigkeiten. Dies gilt insbesondere für Laubbäume. Dabei muss jedoch eine ausreichende Qualität des DOM gegeben sein, da sonst die Fehler im DOM zu nicht ausgleichbaren Fehlern bei der Einzelbaumextraktion führen.

Die ergänzende Nutzung der spektralen Informationen aus den optischen Bilddaten führt jedoch zu einer signifikanten Verbesserung der Vollständigkeit und Korrektheit der Ergebnisse. Daher sind für eine lagegenaue Einzelbaumextraktion sowohl die geometrischen als auch die spektralen Informationen notwendig.

Forschungsfragen 9, 10 und 11:

Ist die Aufstellung eines Baummodelles erforderlich?

Welches ist das geeignetste Baummodell, d.h., welche Baumeigenschaften müssen während des Extraktionsprozesses untersucht und für die Ableitung verwendet werden?

Welches ist die geeignetste Extraktionsstrategie für Laub- und Nadelbäume?

Für die Extraktion von Einzelbäumen ist die Aufstellung eines Objekt-, Bild- und Extraktionsmodelles zwingend notwendig. Die Eigenschaften eines Baumes sind zu komplex, um sie alle erfassen zu können. Daher ist eine Abstraktion der Eigenschaften eines Baumes auf die für die Extraktion notwendigen Eigenschaften unabdingbar.

Wie bereits bei der Beantwortung der Forschungsfragen sieben und acht verdeutlicht wurde, unterliegen die spektralen Informationen in Luftbildern vielen Faktoren, welche die gemessenen Spektralwerte beeinflussen. Dieser Effekt hat jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Ableitung der Digitalen Oberflächenmodelle, weshalb die Qualität dieser nur sehr bedingt von den Spektralwerten abhängig ist. Lediglich bei einer Sättigung des Sensors im oberen Bereich sowie nicht messbaren Information in dunklen Schatten wird die Qualität des DOM herabgesetzt. Dies ist bei modernen Kamerasystemen sowie einer entsprechenden Flugplanung nahezu ausgeschlossen.

Aus diesen Gründen ist es erforderlich, dass sich das Objektmodell verstärkt auf die geometrischen Eigenschaften stützt. Die Beschreibung der geometrischen Form der zu extrahierenden Bäume bildet daher die Grundlage des zu erstellenden Bildmodelles. Dazu gehört die Lage und Beschreibung der Baumspitze, die Baumhöhe, der Kronendurchmesser sowie die Neigung und Ausrichtung der Baumkrone. Diese können im Extraktionsmodell einfach abgeleitet und für die Extraktion der Einzelbäume genutzt werden.

Die spektralen Eigenschaften müssen ergänzend dem Objekt- und Bildmodell hinzugefügt werden, da anhand dieser eine einfache Trennung zwischen Bäumen und erhöhter Nichtvegetation im Extraktionsmodell möglich ist. Für das Extraktionsmodell ist dabei die Verwendung von Vegetationsindizes anstellen von absoluten Spektralwerten notwendig, da diese von Helligkeitsunterschieden bereinigt sind und so eine Vergleichbarkeit der spektralen Informationen ermöglichen.

Aufgrund der Komplexität von hochauflösenden Luftbildern sowie des zu extrahierenden Objektes Baum, empfiehlt sich eine datengetriebene oder hybride Extraktionsstrategie für die Einzelbaumextraktion. Eine Kombination aus datengetriebener und modellgetriebener (hybrider) Extraktionsstrategie wurde auch im Rahmen der Arbeit angewendet. Mit Hilfe der erstellten Baummasken wurde zunächst mit den Methoden der objektbasierten Bildanalyse die Komplexität der hochauflösenden Luftbilder aufgelöst und alle Bereiche, welche nicht Bäumen entsprechen, wurden aus der Einzelbaumextraktion ausgeschlossen. Auf der Waldmaske wurde das erstellte Bildmodell angewendet und die Einzelbäume abgeleitet.

Forschungsfragen 12 und 13:

Gibt es bei der Ableitung von Einzelbäumen Unterschiede in den Modellannahmen und der Extraktionsstrategie zwischen Nadel- und Laubbäumen?

Können Nadel- und Laubbäume mit den gleichen Genauigkeiten abgeleitet werden?

Hinsichtlich der Extraktionsstrategie gibt es keine Unterscheidung zwischen Nadel- und Laubbäumen. Aufgrund des unterschiedlichen Habitus (geometrische Form) sind jedoch unterschiedliche Annahmen im Objekt-, Bild- und Extraktionsmodell notwendig. Werden die Modellannahmen von Laubbäumen bei der Extraktion von Nadelbäumen angewendet, kommt es zu einer deutlichen Reduzierung der Vollständigkeit. Für Laubbäume verhält sich dies umgekehrt. Werden die Modellannahmen von Nadelbäumen angewendet kommt es zu einer nahezu vollständigen Extraktion der Laubbäume, allerdings werden für einen Laubbaum oftmals viele Baumspitzen abgeleitet, was die Korrektheit der Ergebnisse reduziert.

Daher ist bei Mischgebieten mit Nadel- und Laubbäumen eine Erweiterung der Waldmaske notwendig. Mit Hilfe des nahen Infrarot sowie der Vegetationsindizes ist auch für multispektrale Luftbilder eine Unterscheidung zwischen Nadel- und Laubbäumen möglich. Dies kann auf die Baummaske angewendet werden und so eine Baummaske für Nadel- und Laubbäume ausgegeben werden, auf welcher die Einzelbaumextraktion durchgeführt wird.

Nadelbäume sind im Allgemeinen durch eine eindeutige Baumspitze und einen steilen Abfall der Baumkrone zum Kronenrand hin gekennzeichnet. Darüber hinaus haben Nadelbäume einen kleinen Kronenumfang und eine geringe Schwankung des Kronenumfangs zwischen benachbarten Bäumen einer Art an einem Standort. Diese Eigenschaften müssen bei der Ableitung von Nadelbäumen berücksichtigt werden. Wie die empirischen Untersuchungen als auch die Ergebnisse der bereits veröffentlichten Ansätze aufgezeigt haben, lassen sich Nadelbäume aus den genannten Gründen mit höheren Vollständigkeits- und Korrektheitswerten ableiten. Aufgrund der eindeutigen Spitzen sowie des steilen Abfalls der Baumkronen lassen sich Nadelbäume in Digitalen Oberflächenmodellen und hochauflösenden Luftbildern leichter extrahieren und voneinander trennen. Daher können Nadelbäume mit den verschiedensten Extraktionsmethoden mit hohen bis sehr hohen Genauigkeiten abgeleitet werden.

Die Extraktion von Laubbäumen stellt dahingegen eine hohe Herausforderung für alle bisher entwickelten Extraktionsmethoden dar. Die Gründe hierfür liegen einerseits im Habitus und andererseits in der Vergesellschaftung und der Artenvielfalt von belaubter Vegetation. Betrachtet man den Habitus von Laubbäumen, so ist die dieser in der Regel durch eine ovale Form mit einem flachen Abfall der Baumkrone zum Kronenrand hin gekennzeichnet. Daher haben Laubbäume auch oftmals keine eindeutige Spitze, sondern viele kleinere Spitzen, was die Extraktion einer eindeutigen Baumspitze erschwert und somit auch einen Einfluss auf die Extraktionsgenauigkeit hat. Die ovale Form und flache Neigung der Kronenoberfläche von Laubbäumen sowie der oftmals unterschiedlich große Kronendurchmesser von benachbarten Bäumen führen auch zu Problemen bei der Trennung der Laubbäume.

Eine weitere Schwierigkeit stellt die Unterscheidung zwischen Bäumen und Sträuchern dar. Das Hauptunterscheidungsmerkmal von Bäumen und Sträuchern ist die dominante Sprossachse bei Bäumen, welche durch ein sekundäres Dickenwachstum gekennzeichnet ist. Dieses Unterscheidungsmerkmal ist bedingt durch die Eigenschaften von Luftbildern in das Extraktionsmodell nicht übertragbar und dementsprechend nicht für die Einzelbaumextraktion verwendbar. Da

die meisten Sträucher belaubt sind und oftmals auch eine Größe von über drei Metern sowie einen ausgeprägten Umfang erreichen, kann aus Luftbildern nicht zwischen Bäumen und Sträuchern unterschieden werden. Auch können sich am Boden verzweigende Stämme nicht voneinander getrennt werden. Aus diesen Gründen liegt die Vollständigkeit und Korrektheit der Einzelbaumextraktion von Laubbäumen unter den Genauigkeiten von Nadelbäumen.

Forschungsfrage 14:

Lassen sich das erstellte Baummodell und die vorgestellte Methode der Einzelbaumextraktion auf unterschiedliche Kamerasysteme übertragen?

Im Rahmen der Arbeit wurden acht verschiedene Kamerasysteme von bemannten und unbemannten Trägern ausgewertet. Dabei wurden mit der UltraCam Eagle mit 80 mm und 210 mm Brennweite mit der UltraCamX sowie der DMC I und DMC II fünf kommerzielle großformatige Kamerasysteme hinsichtlich ihrer Eignung für die Einzelbaumextraktion untersucht, welche weltweit in einer großen Anzahl eingesetzt werden. Darüber hinaus wurden zusätzlich drei Kamerasysteme aus der DLR MACS-Kamerafamilie betrachtet.

Die Ergebnisse der Einzelbaumextraktion zeigen, dass für alle untersuchten TOM und DOM Nadel- und Laubbäume mit hohen Vollständigkeits- und Korrektheitswerten abgeleitet werden können. Der im Rahmen der Arbeit vorgestellte Ansatz zur Ableitung von Einzelbäumen ist daher auf unterschiedliche Kamerasysteme übertragbar.

5.2 Überprüfung der Forschungshypothese

Wie die vielfältigen empirischen Untersuchungen zum Einfluss der Qualität der verwendeten Datengrundlage gezeigt haben, hat die Datengrundlage einen großen Einfluss auf die Genauigkeit des Extraktionsergebnisses. Damit kann der erste Teil der Forschungshypothese, wonach die Qualität der Eingangsdaten die Genauigkeit der Ergebnisse der Einzelbaumextraktion bestimmt, **verifiziert** werden.

Die Qualität der Eingangsdaten bestimmt in entscheidendem Maße auch die Vollständigkeit und Korrektheit des Extraktionsergebnisses. Fehler in der Datengrundlage können durch den Extraktionsalgorithmus nicht ausgeglichen werden. Daher ist bei der Verwendung von Luftbildern und photogrammetrisch abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodellen eine auf die Einzelbaumextraktion ausgerichtete Flugplanung erforderlich.

Analysiert man sowohl die Funktionsfähigkeit der verschiedenen Algorithmen zur Einzelbaumextraktion, als auch die im Rahmen der Arbeit vorgestellte Methode zur Einzelbaumextraktion, so lässt sich auch der zweite Teil der Forschungshypothese, wonach auch die Funktionsfähigkeit des Extraktionsalgorithmus die Genauigkeit bestimmt, **verifizieren**.

Neben den Eingangsdaten bestimmt auch der eingesetzte Extraktionsalgorithmus das Ergebnis der Einzelbaumextraktion entscheidend. Daher muss bei der Durchführung einer Einzelbaum-

extraktion auch eine geeignete Methode entwickelt oder gewählt werden. Die höchsten Genauigkeiten werden dabei mit Algorithmen erzielt, welche ein Digitales Oberflächenmodell als Datengrundlage verwenden. Durch die Verwendung von geometrischen und spektralen Informationen lässt sich die Genauigkeit der Extraktionsergebnisses weiter steigern.

Allen Extraktionsalgorithmen ist jedoch eine Grenze hinsichtlich der Genauigkeit gesetzt. Eine hundertprozentige Vollständigkeit und Korrektheit ist nicht möglich. Dies liegt einerseits an der Vielfältigkeit und Abgrenzung des Extraktionsobjektes Baum und andererseits auch an den Grenzen der verwendeten Datengrundlagen.

5.3 Bewertung der Forschungsergebnisse und Anwendbarkeit für die Forstfernerkundung

Volkswirtschaftlich hat die Forstwirtschaft mit der Produktion des Heiz-, Roh- und Baustoffes Holz eine große gesellschaftliche Relevanz. Dementsprechend kommt der Bemessung des Baum- und Holzbestandes auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene eine große Bedeutung zu. Die Bestimmung von Forstparametern, wie beispielsweise des Holzbestandes, ist eine elementare Aufgabe der Forstfernerkundung. Zur Bewältigung dieser Aufgabe werden auch verschiedene Extraktionsmethoden für die Bestimmung von Einzelbäumen angewendet, mit denen der Baumbestand eines Gebiets ermittelt werden kann.

Anhand der gesellschaftlichen Relevanz der Bestimmung des Holzbestandes lässt sich auch die Bedeutung der vorliegenden Arbeit bewerten. Diese trägt mit ihren vielfältigen Analysen zur Erhöhung der Genauigkeit bei der Ableitung von Einzelbäumen bei. Die Erhöhung von Vollständigkeit und Korrektheit der Extraktionsergebnisse war dabei das Hauptziel und das grundsätzliche Anliegen der Arbeit.

Zur Erhöhung der Genauigkeit der Extraktionsergebnisse wurde eine zweigeteilte Strategie verfolgt. Zum einen wurde der Einfluss der Eingangsdaten auf die Genauigkeit systematisch untersucht und zum anderen wurde eine für unterschiedliche Kamerasysteme, Laub- und Nadelbäume anwendbare sowie leicht umsetzbare Methode der Einzelbaumextraktion entwickelt und vorgestellt.

Wie die Verifizierung der ersten Forschungshypothese gezeigt hat, haben die Eingangsdaten auf die Genauigkeit der Extraktionsergebnisse einen entscheidenden Einfluss. Eine systematische Untersuchung und statistische Auswertung des Einflusses der Qualität der Eingangsdaten wurde bisher noch nicht durchgeführt. Insofern trägt die Arbeit wesentlich zur Wissenserhöhung auf dem Gebiet der Einzelbaumextraktion und Forstfernerkundung bei. Die Betrachtung von Eingangsdaten ermöglicht zugleich eine Vergleichbarkeit und Bewertung von verschiedenen Methoden zur Einzelbaumextraktion, die auf Basis von Luftbildern und photogrammetrisch abgeleiteten DOM erfolgen.

Die erarbeiteten Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses von Flug- und Prozessierungsparametern sowie die Empfehlungen von optimalen Parametern können in zukünftige Luftbildbefliegungen

von Waldgebieten einfließen und somit zu einer elementaren Qualitätssteigerung der Eingangsdaten sowie der Einzelbaumextraktion und anderen forstwirtschaftlichen Analysen führen. Mit einem oftmals geringen Mehraufwand hinsichtlich der Befliegung können so wesentliche Genauigkeitssteigerungen bei der Ableitung von Einzelbäumen erreicht werden.

Neben der Qualität der Eingangsdaten lag ein zweiter Schwerpunkt auf der Methodenentwicklung. Dabei standen die breite Anwendbarkeit, eine leichte Nachvollziehbarkeit und eine Anwendung für Nadel- und Laubbäume im Vordergrund der Arbeit. In der Vergangenheit wurde eine Reihe unterschiedlicher Methoden der Einzelbaumextraktion entwickelt. Vor allem in der jüngeren Vergangenheit waren diese Ansätze sehr komplex und für den Anwender im Forstbereich wenig nachvollziehbar. Ältere Ansätze, welche leicht nachvollziehbar und umsetzbar sind, erreichen dahingegen nicht die notwendigen Genauigkeiten.

Ein weiterer Nachteil vieler Ansätze ist die Beschränkung dieser auf die Ableitung von Nadelbäumen. Die Extraktion von Laubbäumen, welche in der Forstwirtschaft eine große Bedeutung haben, ist mit dem Großteil der Ansätze nur mit geringen Genauigkeiten durchführbar. Daher war es das Ziel der Arbeit, eine Methode zu entwickeln, mit welcher Nadel- und Laubbäume mit hohen Genauigkeiten abgeleitet werden können. Aufgrund der angestrebten Nachvollziehbarkeit und guten Umsetzbarkeit wurde ausschließlich auf allgemein zugängliche Ansätze der Objektextraktion zurückgegriffen sowie ein einfaches Baummodell entwickelt. Wie die Ergebnisse der Arbeit zeigen, lassen sich mit dem vorgestellten Ansatz auch Laubbäume mit hohen Genauigkeiten ableiten. Damit verbessert sich auch die Anwendbarkeit der Einzelbaumextraktion für forstwirtschaftliche und forstwissenschaftliche Frage- und Problemstellungen.

5.4 Ansätze für weitere Verbesserungen und zukünftige Entwicklungen

Die Qualitätsanalyse der Digitalen Oberflächenmodelle innerhalb der Arbeit stützt sich auf Luftbildbefliegungen, welche zu unterschiedlichen Zeiten und für unterschiedliche Gebiete erfolgt sind. Darüber hinaus war keine Analyse der Genauigkeit der DOM möglich. Hierfür wäre für jedes Untersuchungsgebiet ein DOM, welches aus einer Laserbefliegung abgeleitet wurde, als Referenz notwendig gewesen.

Für eine noch systematischere Analyse des Einflusses der Qualität der Eingangsdaten, wären mehrere Befliegungen notwendig, welche folgende Parameter erfüllen müssten:

- Befliegungen über einem repräsentativen Mischwald mit Laubwald- und Nadelwaldbereichen unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Baumarten,
- Befliegung mit einem Kamerasystem mit unterschiedlichen Brennweiten mit einem annähernd vergleichbaren Footprint (z.B. UltraCam Eagle 80 mm und 210 mm Brennweite) bei gleicher Bodenauflösung,
- parallele Befliegung unterschiedlicher Kamerasysteme (z.B. DMC und UltraCam),

- 90 prozentige Längs- und Querüberlappung für alle Befliegungen,
- drei bis vier unterschiedliche Flughöhen (5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm) für alle Befliegungen,
- Kreuzbefliegung für alle Befliegungen,
- Befliegung zu verschiedenen Zeitpunkten (10:00 Uhr, 12:00 Uhr, 14:00 Uhr, 16:00 Uhr)
- sowie eine hochauflösende Befliegung mit einem Laserscanner.

Anhand dieser Befliegungen ließen sich die Einflüsse der einzelnen Parameter noch zielgerichteter untersuchen und weitere Schlussfolgerungen für die Befliegung von Waldgebieten ableiten.

Für die Genauigkeitsbestimmung der Einzelbaumextraktion sind darüber hinaus ein terrestrisches Laserscanning sowie die Vermessung der Baumkronendurchmesser und Kartierung der Kronensegmente innerhalb des Untersuchungsgebietes erforderlich. Nur anhand dieser Daten ist die Berechnung der Vollständigkeit und Korrektheit des Extraktionsergebnisses möglich.

Die Durchführung der notwendigen Befliegungen, die Datenprozessierung und die Erhebung der Kontrolldaten sind mit einem finanziellen Aufwand in Höhe mehrerer Hunderttausend Euro verbunden. Dieser finanzielle Aufwand war im Rahmen der Arbeit nicht zu leisten, weshalb auf einzelne schon existierende Befliegungen zurückgegriffen wurde, die für die wissenschaftlichen Analysen kostenfrei zur Verfügung gestellt wurden.

Die im Rahmen der Arbeit vorgestellte Methode stützt sich sehr stark auf die geometrischen Eigenschaften von Bäumen und nutzt die spektralen Informationen nur ergänzend. Wie die Analysen sowie die Betrachtung bereits veröffentlichter Ansätze zur Einzelbaumextraktion gezeigt haben, führt die Kombination von geometrischen und spektralen Informationen zu den höchsten Genauigkeiten.

Für weiterführende Untersuchungen bzw. eine Weiterentwicklung der vorgestellten Methode, ist daher auch eine Informationserweiterung im spektralen Bereich empfehlenswert. Dies betrifft vor allem die bisher nicht genutzten Texturinformationen. Anhand von Farbe und Textur ist eine genaue visuelle Unterscheidung von Einzelbäumen möglich. Die Texturinformationen können dem Baummodell hinzugefügt werden und für die Extraktion genutzt werden. Damit ist eine weitere Erhöhung der Genauigkeit denkbar, allerdings auch eine Komplexitätssteigerung des Modelles und eine Erhöhung des Rechenaufwandes verbunden.

Anhand der Farb- und Texturinformationen sollte auch eine grobe Differenzierung von Baumarten untersucht werden. Eine genaue Baumartenklassifikation ist mit multispektralen Luftbildern nicht möglich. Wie verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen jedoch gezeigt haben (vgl. Svobota 2000), ist eine Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelbäumen sowie bestimmten Baumarten möglich. Anhand dieser Baumartenklassifikation ist eine Modellanpassung für die jeweilige Baumart möglich, was wiederum zu einer Erhöhung der Genauigkeit führen kann.

Jeder bisher entwickelte Ansatz zur Ableitung von Einzelbäumen verfügt über Vor- und Nachteile. Für zukünftige Untersuchungen wäre daher ein systematischer Methodenvergleich

zur Untersuchung der Vor- und Nachteile in einem einheitlichen Untersuchungsgebiet sinnvoll. Eine Kombination von verschiedenen Verfahren und die Herausstellung der jeweiligen Vorteile lässt eine weitere Erhöhung der Genauigkeit erwarten. Die Herausforderung von zukünftigen Entwicklungen auf dem Gebiet der Einzelbaumextraktion liegt jedoch darin zu zeigen, dass alle neuartigen Algorithmen und Methoden einen Mehrwert gegenüber bereits entwickelten Verfahren haben. Ein Schwerpunkt muss dabei auf der Methodenentwicklung für die Ableitung von Laubbäumen liegen, da hier die größte Herausforderung und der höchste Forschungsbedarf besteht.

Literaturverzeichnis

- Adler P. 2001: Einsatz digitaler Photogrammetrie zur Beschreibung von Waldbeständen - am Beispiel der digitalen photogrammetrischen Erfassung der Level 2 Flächen Baden-Württembergs. Freiburg. Dissertation.
- Albertz J. 2009: Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Darmstadt.
- Andersen H.-E., Reutenbuch S. E., Schreuder G. F. 2001: Automated Individual Tree Measurement Through Morphological Analysis of a LIDRA-Based Canopy Surface Model. In: Precision Forestry - Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium, Seattle, S. 11-22.
- Andersen H.-E., Reutenbuch S. E., Schreuder G. F. 2002: Bayesian Object Recognition for the Analysis of Complex Forest Scenes in Airborne Laser Scanner Data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3A, Graz, S. 35-41.
- Anhuf D. 1997: Satellitenbildgestützte Vegetationsklassifikation der Cote d'Ivoire. In: Mannheimer Geographische Arbeiten, H.45, Mannheim, S. 73-87.
- Aurich V., Weule J. 1995: Non-linear gaussian filters performing edge preserving diffusion. In: Sagerer G., Posch S., Kummert F. [Hrsg.]: Mustererkennung 1995. Verstehen akustischer und visueller Informationen: Bielefeld, 13.-15.September 1995-1995, Berlin Heidelberg, S. 538-545.
- Axelsson P. 2000: DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 33, Part B4-1, Amsterdam, S. 110-117.
- Bach H. 1995: Die Bestimmung hydrologischer und landwirtschaftlicher Oberflächenparameter aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. In: Münchner Geographische Abhandlungen, Reihe B, Band 21. München.
- Bacher U. 2006: Automatische Straßenextraktion aus optischen Satellitenbildern hoher und höchster Auflösung. München. Dissertation.
- Baumgartner A. 2003: Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern. München. Dissertation.

- Bayer S., Miri M., Bucher T. 2013: Automatisierte Einzelbaumerfassung auf Basis von hochaufgelösten TrueOrtho-Mosaiken und photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodellen. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. Band 22, Potsdam, S. 26-35.
- Beucher S. 1982: Watersheds of Functions and Pictures. In: ICASSP 82, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Paris, S. 1928-1931.
- Bienert A. 2013: Automatische Extraktion von 3D-Baumparametern aus terrestrischen Laserscanndaten. Dresden. Dissertation.
- Blaschke T. 2000: Ohne Salz und Pfeffer. Objektorientierte Bildanalyse – Eine Revolution in der Fernerkundung. In: GeoBIT, Vol. 2, S. 30-32.
- Blaschke T., Strobl J. 2001: What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. In: GIS, Vol. 6, Offenbach, S. 12-17.
- Bochow M. 2009: Automatisierungspotenzial von Stadtbiotopkartierungen durch Methoden der Fernerkundung. Osnabrück. Dissertation.
- Böhner J., Selige T., Ringeler A. 2006: Image Segmentation Using Representativeness Analysis and Region Growing. In: Göttinger Geographische Abhandlungen, Vol. 115, Göttingen, S. 29-38.
- Borgefors G., Brandtberg T., Walter F. 1999: Forest parameter extraction from airborne sensors. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 32, Part 3, München, S. 151-158.
- Brauchle J., Hein D., Berger R. 2015: Detailed and Highly Accurate 3D Models of High Mountain Areas by the MACS-Himalaya Aerial Camera Platform. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 40, Part7-W3, Berlin, S. 1129-1136.
- Brandtberg T., Walter F. 1998: Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale analysis. In: Machine Vision and Applications, Volume 11, Heidelberg, S.64-73.
- Brandtberg T., Walter F. 1999: An Algorithm for Delineation of Individual Tree Crowns in High Spatial Resolution Aerial Images Using Curved Edge Segments at Multiple Scales. In: Hill D. A., Leckie D. G. [Hrsg.]: International Forum, Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, Victoria, S. 41-54.
- Brandtberg T., Warner T. A., Landenberg R. E., McGraw J. B. 2003: Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 85, S. 290-303.
- Brunn A. 2006: Methoden zur Auswertung hyperspektraler Fernerkundungsdaten für die Untersuchung von Zustandsveränderungen perennierender Pflanzen im Rahmen des Monitorings bergbaubedingter Umwelteinwirkungen. Clausthal. Dissertation.

- Bücken A., Rossmann J. 2010: On the computational complexity of a volumetric algorithm for single tree delineation. In: Proceedings of the 2010 RSPSoc and Irish Earth Observation Symposium, Cork, S. 1-8.
- Bücken A., Rossmann J. 2013: From the Volumetric Algorithm for Single-Tree Delineation Towards a Fully-Automated Process for the Generation of "Virtual Forests". In: Pouliot J., Daniel S., Hubert F., Zamyadi A. [Hrsg.]: Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences - Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Heidelberg, S. 79-99.
- Bücken A. 2014: Automatische Modellierung von Waldlandschaften für virtuelle Welten und mobile Roboter. Wiesbaden.
- Buhk R. 2000: Modellbasierte Schätzung von Kronendeckungsgrad und -transparenz aus Landsat TM5 Fernerkundungsdaten unter Berücksichtigung reliefbedingter Beleuchtungseffekte. Freiburg. Dissertation.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014: Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin.
- Buschmann C. 1993: Fernerkundung von Pflanzen – Ausbreitung, Gesundheitszustand und Produktivität. In: Naturwissenschaften, Volumen 80, Heidelberg, S. 439-453.
- Buschmann C., Nagel E. M. 1992: Reflexionsspektren von Blättern und Nadeln als Basis für die physiologische Beurteilung von Baumschäden. In: KFK-PEF Berichte, Volume 90. Karlsruhe.
- Canny J. 1986: A Computational Approach to Edge Detection. In: IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, No. 6, Cambridge, S. 679-698.
- Carson W. W., Akay A. E., Weyermann D. 2001: An Inventory of Juniper Through the Automated Interpretation of Aerial Digital Imagery. In: Precision Forestry - Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium, Seattle, S. 23-34.
- Chaudhury K. N., Sage D., Unser M. 2011: Fast $O(1)$ Bilateral Filtering Using Trigonometric Range Kernels. In: IEEE Transaction on Image Processing, Vol. 20, No. 12, S. 3376-3382.
- Chaudhury K. N. 2015: Fast and Accurate Bilateral Filtering Using Gauss-Polynomial Decomposition. In: IEEE International Conference on Image Processing.
- Chaudhury K. N., Rithwik K. 2015: Image Denoising Using Optimally Weighted Bilateral Filters: A Sure and Fast Approach. In: IEEE International Conference on Image Processing.
- Chen Q., Zhou C., Luo J., Ming D. 2004: Fast Segmentation of High-Resolution Satellite Images Using Watershed Transform Combined with an Efficient Region Merging Approach. In: Klette R., Žunić J. [Hrsg.]: Combinatorial Image Analysis, Heidelberg, S. 621-630.
- Chi Z., Yan H., Pham T. 1996: Fuzzy Algorithms: With Applications to Image Processing and Pattern Recognition. Zadeh L. [Hrsg.]: Advances in Fuzzy System - Applications and Theory, Vol. 10. Singapore.

- Colomina I. 2002: Modern Sensor Orientation Technologies And Procedures. In: Heipke C., Jacobsen K., Wegmann H. [Hrsg.] 2002: Integrated Sensor Orientation, OEEPE Official Publication, No. 43.
- Congalton R. G. 1991: A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 37, S. 35-46.
- Congalton R. G., Green K. 2008: Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. Boca Raton.
- Cramer M. 2001: Genauigkeitsuntersuchung zur GPS/INS-Integration in der Aerotriangulation. In: DGK Reihe C, Nr. 537. Stuttgart. Dissertation.
- Culvenor D.S. 2002: TIDA: an algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery. In: Computers & Geosciences, Vol. 28, S. 33-44.
- Diedershagen O., Koch B., Weinacker H. 2003a: Automatic Estimation Of Forest Inventory Parameters Based on LIDAR, Multi-Spectral and Fogis Data. S. 4-13.
- Diedershagen O., Koch B., Weinacker H., Schütt C. 2003b: Combining LIDAR- And GIS Data For The Extraction Of Forest Inventory Parameters. In: ScandLaser 2003, Umeå, S. 157-165.
- Diedershagen O., Koch B., Weinacker H. 2004: Automatic Segmentation And Characterization Of Forest Inventory Parameters Based on LIDAR, Multi-Spectral and Fogis Data. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, Part 8-W2, Freiburg, S. 208-212.
- Egenhofer M. J. 1993: A Model for Detailed Binary Topological Relationships. In: Geomatica, Vol. 47, No. 3&4, S. 261-273.
- Elmqvist M. 2000: Automatic Ground Modelling using Laser Radar Data. Linköping. Examensarbeit.
- Erikson M. 2004a: Segmentation and Classification of Individual Tree Crowns – in High Spatial Resolution Aerial Images. Uppsala. Dissertation.
- Erikson M. 2004b: Species classification of individually segmented tree crowns in high-resolution aerial images using radiometric and morphologic image measures. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 91, S. 469-477.
- Erikson M., Olofsson K. 2005: Comparison of three individual tree crown detection methods. In: Machine Vision and Applications, Volume 16, No. 4, Heidelberg, S. 258-265.
- Erikson M., Perrin G., Descombes X., Zerubia J. 2006: A Comparative Study of Three Methods for Identifying Individual Tree Crowns in Aerial Images Covering Different Types of Forests. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, Part 1B. Paris.
- Esri 2016: Funktionsweise von "Focal Statistics". Internetquelle: <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-focal-statistics-works.htm> (abgerufen am 03.03.2016).

- Essery C.I., Morse A.P. 1992: The impact of ozone and acid mist on the spectral reflectance of young Norway spruce trees. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13, No. 16, S. 3045-3054.
- Flyn P. J., Jain A. K. 1989: CAD-based Computer Vision: From CAD models to relational graphs. IN: 1989 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Proceeding, Conference Proceedings, Cambridge, S. 162-167.
- Flyn P. J., Jain A. K. 1991: CAD-based Computer Vision: From CAD Models to Relational Graphs. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 2, S. 114-132.
- Förstner W. 1993: A future of photogrammetric research. In: *NGT Geodesia*, Vol. 93, No. 8, S. 372-383.
- Friedlaender H. 2002: Die Anwendung von flugzeuggetragenen Laserscannerdaten zur Ansprache dreidimensionaler Strukturelemente von Waldbeständen. Freiburg. Dissertation.
- Fuchs H.-J. 2003: Methodische Ansätze zur Erfassung von Waldbäumen mittels digitaler Luftbilddauswertung. Göttingen. Dissertation.
- Gänsrich A. 2015: Entwicklung einer zeitoptimierten automatischen Extraktion von Wasserflächen aus hochauflösenden Luftbilddaten (True Ortho Mosaik, Digitales Oberflächenmodell) mittels objektbasierter Bildanalyse und einer Wassererwartungsmaske für die Datenreduzierung. Berlin. Masterarbeit.
- Garcia R., Patenaude G., Suárez J. 2007: Delineation of individual tree crowns for LiDAR tree and stand parameter estimation in Scottish woodlands. In: Fabrikant Sara I., Wachowicz M. [Hrsg.]: *The European Information Society - Leading the Way with Geo-Information*, S. 55-85.
- Gates D. M., Keegan H. J., Schleter J. C., Weidner V. R. 1965: Spectral Properties of Plants. In: *Applied Optics*, Vol. 4, No. 1, S. 11-20.
- Gemmell F. 1998: An Investigation of Terrain Effects on the Inversion of a Forest Reflectance Model. In: *Remote Sensing of Environment*, Vol. 65, No. 2, S. 155-169.
- Gerstl S. A. W. 1990: Physics concepts of optical and radar reflectance signatures - A summary Review. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 11, No. 7, S. 1109-1117.
- Gong P., Sheng Y., Biging G. S. 2002: 3D Model-Based Tree Measurement from High-Resolution Aerial Imagery. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 68, No. 11, S. 1203-1212.
- Gonzalez Patiño J. F. 2011: Die automatische Identifizierung und Erfassung von tropischen Bäumen an Probenflächen in Kolumbien und Ecuador anhand von digitalen Bildinformationen und Oberflächenmodellen. Düsseldorf. Dissertation.
- Gougeon F. A., Moore T. 1988: Individual Tree Classification Using MEIS-II Imagery. In: *Proceedings of IGARSSS '88 Symposium*, Edinburgh, S. 927.

- Gougeon F. A. 1995: A Crown-Following Approach to the Automatic Delineation of Individual Tree Crowns in High Spatial Resolution Aerial Images. In: The Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 21, No.3, S. 274-284.
- Gougeon F. A. 1999: Automatic Individual Tree Crown Delineation Using a Valley-Following Algorithm and a Rule-Based System. In: Hill D. A., Leckie D. G. [Hrsg.]: International Forum, Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, Victoria, S. 11-23.
- Gougeon F. A., Leckie D. G. 2001: Individual Tree Crown Image Analysis - A Step Toward Precision Forestry. In: Precision Forestry - Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium, Seattle, S. 43-49.
- Gougeon F. A., Leckie D. G. 2003: Forest information extraction from high spatial resolution images using an individual tree crown approach. In: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service Pacific, Forestry Centre Information, Report BC-X-396. Victoria.
- Gougeon F. A. 2009: The Individual Tree Crown (ITC) Approach to Forest Inventories: Satellite and Aerial Sensor Considerations. In: International Union of Forest Research Organisations (IUFRO) Div. 4, Proceedings: Extending Forest Inventory and Monitoring. Québec City.
- Gruber M., Ponticelli M., Wiechert A. 2011: UltraCam, A Brand for Continuous Developments. In: Fritsch D. [Hrsg.]: Photogrammetric Week 11, S. 103-109, Berlin, Offenbach.
- Gruber M., Ponticelli M., Bernögger S., Reitingner B., Hegenbach H., Cosic Z., Wiechert A. 2012: UltraCam Eagle, Understanding the New Sensor. In: ASPRS Annual Conference 2012. Sacramento.
- Gruber M. 2013: UltraCam and UltraMap - An Update. In: Fritsch D. [Hrsg.]: Photogrammetric Week 13, S. 37-43, Berlin, Offenbach.
- Gruber M., Wiechert A. 2015: UltraCam and UltraMap - An Update. In: Fritsch D. [Hrsg.]: Photogrammetric Week 15, S. 45-50, Berlin, Offenbach.
- Haenel S., Tränkner H., Eckstein W. 1987: Automatische Baumkronentdeckung in Luftbildern - Der Weg durch den Engpass. In: DFVLR-Statusseminar im Oberpfaffenhofen 2, Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit den Methoden der Fernerkundung, Oberpfaffenhofen, S. 53-66.
- Heinzel J. 2011: Combined use of high resolution LiDAR and multispectral data for automated extraction of single trees and tree species. Freiburg. Dissertation.
- Heinzel J. N., Weinacker H., Koch B. 2011: Prior-knowledge-based single-tree extraction. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 32, No. 17, S. 4999-5020.
- Heinzel V. 2008: Objektbasierte Klassifikation urbaner Räume - Der Einfluss von Beleuchtungsverhältnissen auf die Klassifikationsgenauigkeit von Fernerkundungsdaten urbaner Räume. Saarbrücken. Dissertation.

- Heipke C. 2003: Photogrammetrie & Fernerkundung - vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung. In: Festschrift „Am Puls von Raum und Zeit“, 50 Jahre Deutsche Geodätische Kommission, Hannover, S. 54-68.
- Heurich M., Persson A., Holmgren J., Kennel E. 2004: Detecting and Measuring Individual Trees with Laser-Scanning in Mixed Mountain Forest of Central Europe Using an Algorithm Developed for Swedish Boreal Forest Conditions. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, Part 8-W2, Freiburg, S. 307-312.
- Heurich M. 2006: Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren. München. Dissertation.
- Hildebrandt G. 1996: Fernerkundung und Luftbildmessung - für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Heidelberg.
- Hinz A., Dörstel C., Heier H. 2001: DMC - The Digital Sensor Technology of Z/I-Imaging. In: Fritsch D., Spiller R. [Hrsg.]: Photogrammetric Week 01, S. 93-103. Heidelberg.
- Hinz S. 2004: Automatische Extraktion urbaner Straßennetze aus Luftbildern. München. Dissertation.
- Hirschmüller H., Innocent P. R., Garibaldi J. M. 2002: Real-Time Correlation-Based Stereo Vision with Reduced Border Errors. In: International Journal of Computer Vision, Vol. 47, S. 229-246.
- Hirschmüller H. 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing By Semi-Global Matching and Mutual Information. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego.
- Hirschmüller H. 2008: Stereo Processing By Semiglobal Matching and Mutual Information. In: Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol. 30, No.2, S. 328-341.
- Hirschmüller H., Bucher T. 2010: Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching. Proceedings DGPF Tagung 2010. Wien.
- Hirschmüller H. 2011: Semi-Global Matching - Motivation, Developments and Applications. In: Photogrammetric Week 11, Berlin & Offenbach, S. 173-184.
- Holmgren J., Persson A. 2004: Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 90, No.4, S. 415-423.
- Holopainen M., Wang G. 1998a: The calibration of digitized aerial photographs for forest stratification. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 4, S. 677-696.
- Holopainen M., Wang G. 1998b: Accuracy of digitized aerial photographs for assessing forest habitats at plot level. In: Scandinavian Journal of Forest Research, Vol. 13, S. 499-508.
- Horn, H.S. 1971: The Adaptive Geometry of Trees. Princeton.
- Hyypä J., Inkinen M. 1999: Detecting and Estimating Attributes For Single Trees Using Laser Scanner. In: The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 16, No. 2, S. 27-42.

- Hyypä J., Schardt M., Haggrén H., Koch B., Lohr U., Scherrer H. U., Paananen R., Luukkonen H., Ziegler M., Hyypä H., Pyysalo U., Friedländer H., Uuttera J., Wagner S., Inkinen M., Wimmer A., Kukko A., Ahokas E., Karjalainen M. 2001: High-Scan: the first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data. In: *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 17, No. 2, S. 58-68.
- Hyypä J., Hyypä H., Litkey P., Yu X., Haggén H., Rönholm P., Pyysalo U., Pitkänen J., Maltamo M. 2004: Algorithms and Methods of Airborne Laser Scanning for Forest Measurements. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36, Part 8-W2, Freiburg, S. 82-89.
- Hyypä J., Mielonen T., Hyypä H., Maltamo M., Yu X., Honkavaara E., Kaartinen H. 2005: Using Individual Tree Crown Approach For Forest Volume Extraction With Aerial Images and Laser Point Clouds. In: *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005"*, Enschede, S. 144-149.
- Immitzer M., Atzberger C., Koukal T. 2012: Tree Species Classification with Random Forest Using Very High Spatial Resolution 8-Band WorldView-2 Satellite Data. In: *Remote Sensing*, Vol. 4, S. 2661-2693.
- Ingenieurbüro Gilan 2013: Messbericht zum TLS im Habichtswald. Berlin.
- Jacobsen K. 2011a: Geometric Property of Large Format Digital Camera DMC II 140. In: *PFG 2011*, Vol. 2, Stuttgart, S. 71-79.
- Jacobsen K. 2011b: Untersuchung der DMC II 140. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. Band 20*, Hannover, S. 83-90.
- Jensen J. R. 2014: *Remote Sensing of the Environment - An Earth Resource Perspective*. Dorling Kindersley.
- Kaartinen H., Hyypä J., Liang X., Litkey P., Kukko A., Yu X., Hyypä H., Holopainen M. 2008: Accuracy of automatic tree extraction using airborne laser scanner data. In: *Proceeding of SilviLaser, Edinburgh*, S. 467-476.
- Kaartinen H., Hyypä J. 2008: Tree Extraction. In: *European Spatial Data Research / ISPRS Projekt, Final Report*. Amsterdam.
- Katoh M., Gougeon F. A. 2012: Improving the Precision of Tree Counting by Combining Tree Detection with Crown Delineation and Classification on Homogeneity Guided Smoothed High Resolution (50 cm) Multispectral Airborne Digital Data. In: *Remote Sensing*, Vol. 4, S. 1411-1424.
- Ke Y., Quackenbush L. J. 2009: Individual Tree Crown Detection and Delineation from High Spatial Resolution Imagery Using Active Contour and Hill-Climbing Methods. In: *Proceedings of ASPRS 2009 Annual Conference*. Baltimore.
- Kellenberger T. W. 1996: Erfassung der Waldfläche in der Schweiz mit multispektralen Satellitenbilddaten, Grundlagen, Methodenentwicklung und Anwendung. Zürich. Dissertation.

- Koch B. 1987: Quantifizierung von Schäden an Waldbeständen auf der Grundlage spektraler Rückstrahlungseigenschaften. München. Forschungsbericht.
- Koch B., Svoboda J., Adler P., Dess M. 2002: Automatische Baumartenerkennung auf der Grundlage digitalisierter CIR-Luftbilder. In: Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 173 Jahrgang, Heft 7/8, Frankfurt am Main, S. 131-140.
- Koch B., Heinzel J., Gupt S., Wang Y., Weinacker H. 2009: Extraction of forest parameter from laser data. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. Band 19, S. 345-354.
- Korpela I. 2004: Individual Tree Measurements by Means of Digital Aerial Photogrammetry. Helsinki.
- Kraus K. 1997: Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. In: VGI, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation. Vol. 85, Wien, S. 25-30.
- Kraus K. 2004: Photogrammetrie: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, Band 1. Berlin.
- Kraus K., Pfeifer N. 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. In: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 53, S. 193-203.
- Kraus K., Pfeifer N. 2001: Advanced DTM Generation from LIDAR Data. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3-W4, Annapolis, S. 23-30.
- Kraus K., Rieger W. 1999: Processing of laser scanning data for wooded areas. In: Fritsch D., Spiller R. [Hrsg.]: Photogrammetric Week '99', Heidelberg, S. 221-23.
- Kwak D.-A., Lee W.-K., Lee J.-H., Biging G. S., Gong P. 2007: Detecting of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data . In: Journal of Forest Research, Vol. 12, Issue 6, Heidelberg, S. 425-434.
- Landesamt Für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) 2012: Naturschutzgebiet Habichtswald (ST-092). In: http://www.naturschutzinformationenrw.de/nsg/de/fachinfo/gebiete/gesamt/ST_092. [Stand: 2012. S. 12-18].
- Larsen M. 1997: Crown Modelling To Find Tree Top Positions In Aerial Photographs. In: Proceedings of the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, Vol. 2, S. 428-435.
- Larsen M. 1999: Individual Tree Top Position Estimation by Template Voting. In: 21. Canadian Symposium on Remote Sensing. Ottawa.
- Larsen M., Rudemo M. 1997a: Estimation of Tree Position from Aerial Photos. In: Lindenberg [Hrsg.]: Proceedings of the 1997 Swedish Symposium in Image Analysis, S. 130-134.

- Larsen M., Rudemo M. 1997b: Using ray-traced templates to find individual trees in aerial photographs. In: Proceedings of the 10th Scandinavian Conference on Image Analysis, Lappeenranta, Vol. 2, S. 1007-1014.
- Larsen M., Rudemo M. 1998: Optimizing templates for finding trees in aerial photographs. In: Pattern Recognition Letters 19, S. 1153-1162.
- Larsen M., Eriksson M., Descombes X., Perrin G., Brandtberg T., Gougeon F. A. 2011: Comparison of six individual tree crown detection algorithms evaluated under varying forest conditions. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 32, No. 20, S. 5827-5852.
- Leckie D. G., Gougeon F. A., Walsworth N., Paradine D. 2003: Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown Analysis. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 85, S. 355-369.
- Leckie D. G., Gougeon F. A., Tinis S., Nelson T., Burnett C. N., Paradine D. 2005: Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 94, S. 311-326.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. 2015: Remote Sensing and Image Interpretation. New York.
- Lindeberg T. 1993: On Scale Selection for Differential Operators. In: Høgdra K. A., Braathen B., Heia K. [Hrsg.]: Proceedings of the 8th Scandinavian Conference on Image Analysis, Tromsø, Vol. 2, S. 857-866.
- Lindeberg T. 1994: Scale-Space Theory in Computer Vision. Boston, London, Dordrecht.
- Lindeberg T. 1996: Scale-Space: A framework for handling image structures at multiple scales. In: Proceedings of CERN School of Computing. Egmond aan Zee.
- Lindeberg T. 1998: Feature Detection with Automatic Scale Selection. In: International Journal of Computer Vision, Vol. 30, No. 2, S. 77-116.
- Linder W. 2009: Digital Photogrammetry - A Practical Course. Berlin, Heidelberg.
- Louhaichi M., Borman M.M., Johnson D.E. 2001: Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. In: Geocarto International, Vol. 16, S. 65-70.
- Marr D., Hildreth E. 1980: Theory of Edge Detection. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, Vol. 207, No. 1167, S. 187-217.
- Mayer H. 1998: Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern. München. Dissertation.
- Mayer S. 2003: Automatisierte Objekterkennung zur Interpretation hochauflösender Bilddaten in der Erdfernerkundung. Berlin. Dissertation.
- Mayr W., Mayer H., Bacher U., Ebner H. 1999: Automatic Extraction of Trees from Aerial Imagery. In: Förstner W., Liedtke C.-E., Bückner J. [Hrsg.]: Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, SMATI '99, München, S. 155-166.

- Meng X., Wang L., Silván-Cárdenasa J. L., Currit N. 2009: A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64, San Marcos, S. 117-124.
- Meng X., Currit N., Zhao K. 2010: Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. In: Remote Sensing, Vol.2, No. 3, S. 833-860.
- Miri S. M. 2016: Elevation of LIDAR and Photogrammetric Elevation Data for Feature-based Forest Analyses. Berlin. Dissertation.
- Monserud R. A., Leemans R. 1992: Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. In: Ecological Modelling, Vol. 62, S. 275-293.
- Mustafic S., Kainer A., Schardt M. 2014: Einzelbaumdetektion anhand von Ebenenschnitten. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. & Zagel, B. [Hrsg.]: Angewandte Geoinformatik 2014, Berlin/ Offenbach, S. 21-26.
- Myint S. W., Gober P., Brazel A., Grossman-Clarke S., Weng Q. 2011: Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 115, No. 5, S. 1145-1161.
- Neumann K. J. 2011: The Z/I DMC II - "Imaging Revolution. In: Fritsch D. [Hrsg.]: Photogrammetric Week 11, Berlin/ Offenbach, S. 97-101.
- Nissen V. 2007: Ausgewählte Grundlagen der Fuzzy Set Theorie. In: Bankhofer U., Nissen V., Stelzer D., Straßburger S. [Hrsg.]: Illmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik, Nr. 2007-03. Illmenau.
- Olofsson K., Wallerman J., Holmgren J., Olsson H. 2006: Tree species discrimination using Z/I DMC imagery and template matching of single trees. In: Scandinavian Journal of Forest Research, Res. 21, S. 106-110.
- Paris S., Kornprobst P., Tumblin J., Durans F. 2008: Bilateral Filtering: Theory and Applications. In: Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision Vol. 4, No. 1, S. 1-73.
- Perko R., Raggam H., Gutjahr K. H., Schardt M. 2015: Advanced DTM Generation From Very High Resolution Satellite Stereo Images. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 2.3/W4, München, S. 165-172.
- Persson A. 2001: Extraction of Individual Trees Using Laser Radar Data. Linköping. Scientific Report.
- Persson A., Holmgren J., Söderman U. 2002: Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 68, No. 9, S. 925-932.
- Pfeifer N. 2003: Oberflächenmodelle aus Laserdaten. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, Vol. 91, No. 4, Wien, S. 243-252.

- Pilz B., Bayer S., Poznanska A. M. 2016: Volume Based DTM Generation From Very High Resolution Photogrammetric DSMS. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 41, Part B3, Prag, S. 83-90.
- Pinz A. J. 1988: Ein bildverstehendes Expertensystem zur Erkennung von Bäumen auf Farb-Infrarot-Luftbildern. Wien.
- Pinz A. J. 1989: Final results of the Vision Expert System VES: Finding Trees in Aerial Photographs. In: OCG-Schriftenreihe 49, Oldenbourg, S. 90-111.
- Pinz A. J. 1999: Tree Isolation And Species Classification. In: Hill D. A., Leckie D. G. [Hrsg.]: International Forum, Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, Victoria, S. 127-140.
- Pinz A. J. 1991: A Computer Vision System for the Recognition of Trees in Aerial Photographs. In: Tilton J. [Hrsg.]: Multisource Data Integration in Remote Sensing. International Association of Pattern Recognition (IAPR TC7) Workshop, NASA Conference Publication, Vol. 3099, S. 111-124.
- Pinz A. J., Bischof H. 1990: Constructing a Neural Network for the Interpretation of the Species of Trees in Aerial Photographs. In: Proceedings of 10th International Conference on Pattern Recognition, S. 755-757.
- Pinz A. J., Bischof H. 1992: Neural network 'surgery': Transplantation of hidden units. In: Neumann B. [Hrsg.]: Proceedings of the 10th European Conference on Artificial Intelligence '92, Wiley, S. 214-215.
- Pinz A. J., Zaremba M. B., Bischof H., Gougeon F. A., Locas M. 1993: Neuromorphic methods for recognition of compact image objects. In: Machine Graphics and Vision 2(3), S. 209-229.
- Pitkänen J., Maltamo M., Hyypä J., Yu X. 2004: Adaptive Methods for Individual Tree Detection on Airborne Laser Based Canopy Height Model. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, Part 8, Freiburg, S. 187-191.
- Pollock R. J. 1994: A model-based approach to automatically locating tree crowns in high spatial resolution images. In: Image and Signal Processing for Remote Sensing, SPIE, Vol. 2315, S. 526-537.
- Pollock R. J. 1996: The Automatic Recognition Of Individual Trees In Aerial Images Of Forests Based On A Synthetic Tree Crown Image Model. Toronto. Dissertation.
- Pollock R. J. 1999: Individual Tree Recognition Based On A Synthetic Tree Crown Image Model. In: Hill D. A., Leckie D. G. [Hrsg.]: International Forum, Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, Victoria, S. 25-34.
- Pouliot D. A., King D. J., Bell F. W., Pitt D. G. 2002: Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 82, S. 322-334.

- Pouliot D. A., King D. J., Pitt D. G. 2005: Development and evaluation of an automated tree detection–delineation algorithm for monitoring regenerating coniferous forests. In: Canadian Journal of Forest Research, Vol. 35, No. 10, S. 2332-2345.
- Poznanska A. M., Bayer S., Bucher T. 2013: Derivation of urban objects and their attributes for large-scale urban areas based on very high resolution UltraCam true orthophotos and nDSM – A case study Berlin, Germany. In: Proceedings of SPIE, Band 8893, Dresden, S. 889303.1-889303.13.
- Poznanska A. M., Bayer S. 2014: Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen in Berlin. Ergebnisdokumentation Senatsprojekt. Berlin.
- Reid N. J. 1987: Remote sensing and forest damage - Detecting and monitoring stress to vegetation. In Environmental Science and Technology, Vol. 21, S. 428-429.
- Reitberger J. 2010: 3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner. München. Dissertation.
- Rieger W., Eckmüller O., Müllner H., Reiter T. 1999: Laser-scanning for the derivation of forest stand parameters. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 32, Part 3-W14. La Jolla.
- RIF E.V. 2012: Der Virtuelle Wald. Online in Internet: http://www.virtueller-wald.de/de/der_virtuelle_wald. [Stand: 2012. S. 12-18].
- Rock B. N., Hoshizaki T., Miller J. R. 1988: Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 24, S. 109-127.
- Roerdink J. B. T. M., Meijster A. 2001: The Watershed Transform: Definitions, Algorithms and Parallelization Strategies. In: Fundamenta Informaticae, Vol. 41, S. 187-228.
- Rosenfeld A. 1982: Computer image analysis: an emerging technology in the service of society. In: Computer Science Technical Reports 576, University of Maryland.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden S.C., Mercanti E.P., Becker [Hrsg.]: Third Earth Resources, Technology Satellite-1 Symposium, Vol. 1., Technical Presentation, NASA SP-351, National Aeronautics and Space Administration, Washington D C, S. 309-317.
- Saarinen N., Vastaranta M., Kankare V., Tanhuanpää T., Holopainen M., Hyypä J., Hyypä H. 2014: Urban-Tree-Attribute Update Using Multisource Single-Tree Inventory. In: Forests, Vol. 5, S. 1032-1052.
- Sabins F. F. 2007: Remote Sensing: Principles and Interpretation. Long Grove.
- Schardt M., Ziegler M., Wimmer A., Wack R., Hyypä J. 2002: Assessment Of Forest Parameters By Means Of Laser Scanning. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3A, Graz, S. 302-309.

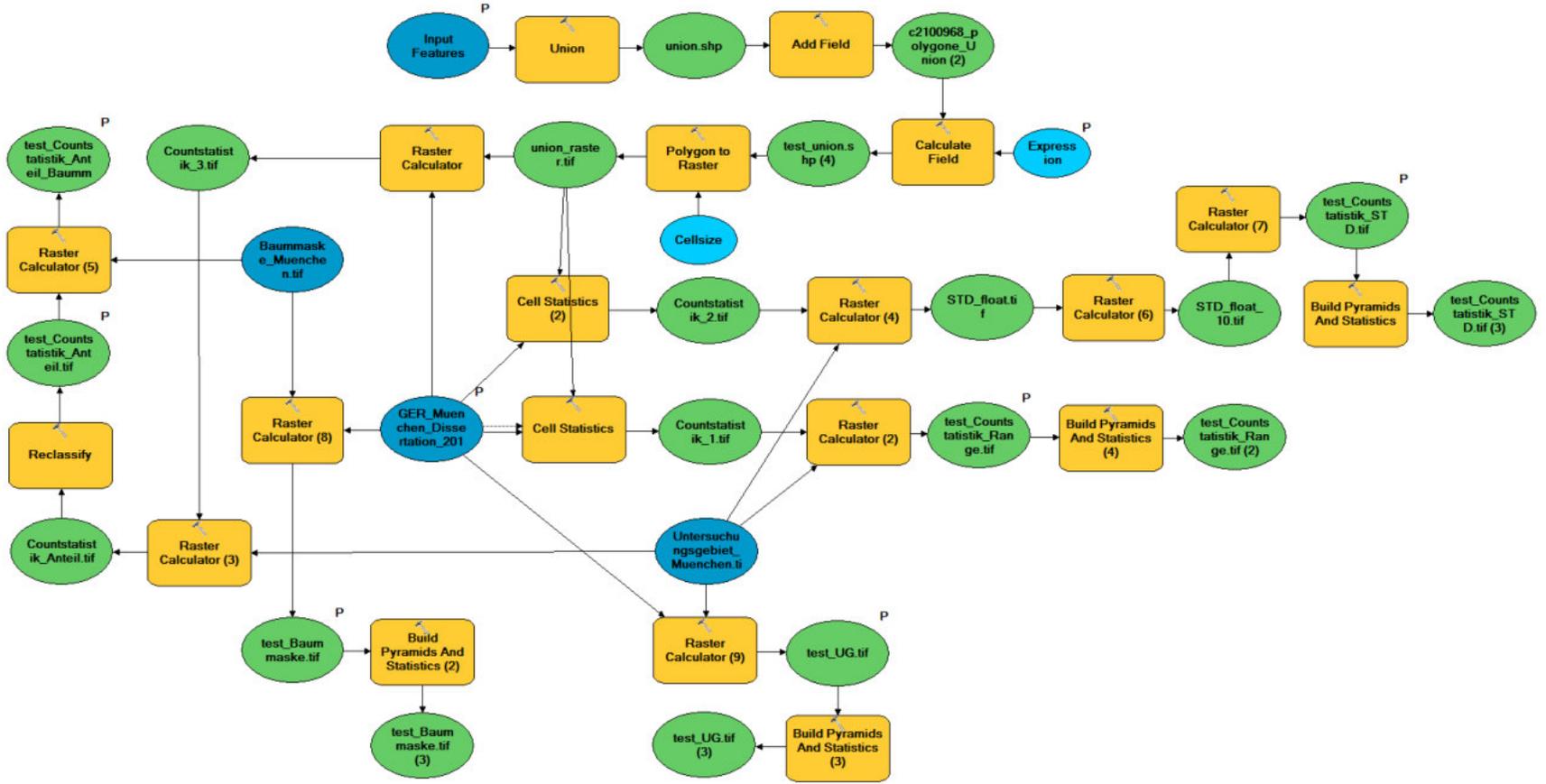
- Scharstein D., Szeliski R. 2002: A Taxonomy And Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. In: International Journal of Computer Vision, Vol. 47, No. 1, S. 7-42.
- Scherbaum P., Brauchle J., Kraft T., Pless S. 2015: MACS-Mar – A Real-Time Capable Multisensor Remote Sensing System for Maritime Applications. In: International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES), Kuta.
- Schickler W. 1992: Feature Matching for Outer Orientation of Single Images Using 3-D Wireframe Controlpoints. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 29, Part B3, Washington D.C., S. 591-598.
- Schiewe J. 2001: Ein regionen-basiertes Verfahren zur Extraktion der Geländeoberfläche aus digitalen Oberflächenmodellen. In: Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, No. 2, S. 81-90.
- Schwarz K.-P., Chapman M. E., Connon E., Gong P. 1993: An integrated INS/GPS Approach to the Georeferencing Of Remotely Sensed Data. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59, No. 11, S. 1667-1674.
- Sebari I., He D.-C. 2013: Automatic fuzzy object-based analysis of VHRS images for urban objects Extraction. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 79, S. 171-184.
- Sester M. 1995: Lernen struktureller Modelle für die Bildanalyse. Stuttgart. Dissertation.
- Sester M., Förstner W. 1989: Object Location Based On Uncertain Models. In: Burkhardt K. H., Höhne B., Neumann B. [Hrsg.]: Mustererkennung 1989, 11. DAGM Symposium, Hamburg, Band 219 der Reihe Informatik-Fachberichte, Hamburg, S. 457-464.
- Sheng Y., Gong P., Biging G. S. 2001: Model-Based Conifer-crown Surface Reconstruction from High-resolution Aerial Images. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 67, No 8, S. 957-965.
- Sheng Y., Gong P., Biging G. S. 2003: True Orthoimage Production for Forested Areas from Large-Scale Aerial Photographs. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 69, No. 3, S. 259-266.
- Shufelt J. A. 1996: Projective Geometry and Photometry For Object Detection And Delineation. Pittsburgh. Dissertation.
- Smith Stephen M., Brady J. Michael 1995: SUSAN - A New Approach to Low Level Image Processing. In: Technical Report TR95SMS1c. Farnborough.
- Smith S. M., Brady J. M. 1997: SUSAN - A New Approach to Low Level Image Processing. In: International Journal of Computer Vision, Vol. 23, No. 1, S. 45-78.
- Soille P., Vincent L. 1990: Determining Watershed in Digital Pictures via Flooding Simulations. In: Proceeding of SPIE, Vol. 1360, Visual Communications and Image Processing 90, Lausanne, S. 240-250.

- Statistisches Bundesamt 2014: Umweltnutzung und Wirtschaft. Bericht zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Wiesbaden.
- Straub B.-M., Heipke C. 2001: Automatic Extraction of Trees for 3D-City Models from Images and Height Data. In: Baltsavias E., Gruen A., van Gool L. (Hrsg.): Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). Tokio, S. 267-277.
- Straub B.-M. 2002: Investigation of the MPEG-7 Homogeneous Texture Descriptor For The Automatic Extraction Of Trees. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3A, Graz, S. 351-355.
- Straub B.-M. 2003a: Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten. Hannover. Dissertation.
- Straub B.-M. 2003b: Automatic Extraction of Trees from Aerial Images and Surface Models. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 3-W8, München, S. 157-164.
- Straub B.-M., Heipke C. 2004: Concepts for Internal and External Evaluation of Automatically Delineated Tree Tops. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 26, Freiburg, S. 62-65.
- Suetens P., Fua P., Hanson A. J. 1992: Computational Strategies for Object Recognition. In: ACM Computing Surveys, Vol. 24, No. 1, S. 5-61.
- Svoboda, J. 2000: Farb- und Texturanalyse verschiedener Baumarten und Schädigungsstufen der Fichte in digitalisierten Color-Infrarotluftbildern (Maßstab 1:5.000), Abt. Fernerkundung und LIS. Freiburg. Masterarbeit.
- Tarabalka Y., Chanussot J., Benediktsson J. A. 2010: Segmentation and Classification of Hyperspectral Images Using Watershed Transformation. In: Pattern Recognition, Vol. 43, No. 7, S. 2367-2379.
- Tempfli K., Kerle N., Huurneman G. C., Janssen L. L. F. [Hrsg.] 2009: Principles of Remote Sensing. Enschede.
- Tiede D., Hochleitner G., Blaschke T. 2005: A Full GIS-Based Workflow for Tree Identification and Tree Crown Delineation using Laser Scanning. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. 36, Part 3-W24, Wien, S. 9-14.
- Tiede D., Osberger A., Novak H. 2009: Automatisierte Baumextraktion mit höchst aufgelösten Oberflächenmodellen abgeleitet aus UltracamX-Daten. In: Strobl, J., T. Blaschke & G. Griesebner [Hrsg.]: Angewandte Geoinformatik 2009. Heidelberg, S. 55-60.
- Tomasi C., Manduchi R. 1998: Bilateral Filtering for Gray and Color Images. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Computer Vision, Bombay, S. 839-846.
- Tompalski P., Wezyk P., de Kok R., Kukawski M 2009: Determining the Number of Trees Using Airborne Laser Scanning and True Orthoimagery. In: Polish Association for Spatial Information, Annals of Geomatics 2009, Vol. 7, No. 2(32), S. 133-143.

- Truesense Imaging Inc. 2012: KAI-16070 Image Sensor – Device Performance Specification, Revision 1.0 PS-0010.
- Tucker C.J. 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 8, S. 127-50.
- US Geological Survey (USGS) 2010: Digital Aerial Sensor Certification Report for the Microsoft Vexcel UltraCamD, UltraCamX, UltraCamXp, and UltraCamXp WA Models.
- Vastaranta M., Holopainen M., Yu X., Haapanen R., Melkas T., Hyyppä J., Hyyppä H. 2011: Individual Tree Detection and Area-Based Approach in Retrieval of Forest Inventory Characteristics from Low-Pulse Airborne Laser Scanning Data. In: The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 22, No. 2, S. 1-13.
- Vauhkonen J., Ene L., Gupta S., Heinzel J., Holmgren J., Pitkänen J., Solberg S., Wang Y., Weinacker H., Hauglin M. K., Lien V., Packalèn P., Gobakken T., Koch B., Naeset E., Tokola T., Maltamo M. 2012: Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. In: Forestry, Vol. 85, No. 1, S. 27-40.
- Vincent L., Soille P. 1991: Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 6, S. 583-598.
- Vosselman G. 2000: Slope Based Filtering Of Laser Altimetry Data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. 33, Part B3-2 W33, Amsterdam, S. 678-684.
- Warner T. A., McGraw J. B., Landenberger R. 2006: Segmentation and classification of high resolution imagery for mapping individual species in a closed canopy, deciduous forest. In: Science in China: Series E Technological Sciences, Vol. 49, S. 128-139.
- Weiss B. 2006: Fast Median and Bilateral Filtering. In: ACM Transactions on Graphics (TOG), Proceedings of ACM SIGGRAPH, Vol. 25, Issue 3, New York, S. 519-526.
- Wessel B. 2006: Automatische Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten. München. Dissertation.
- Westman W. E., Price C. V. 1988: Spectral changes in conifers subjected to Air pollution and water Stress: Experimental Studies. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 26, No.1, S. 11-21.
- Wiechert A., Gruber M. 2013: News FromThe Ultracam Camera Line-Up. In: ASPRS 2013 Annual Conference. Baltimore.
- Winter S. 1996: Beobachtungsunsicherheit und topologische Relationen. In: Bill R. [Hrsg.]: Workshop Datenqualität und Metainformation in Geo-Informationssystemen, Rostock, S. 141-154.
- Wolf B.-M., Heipke C. 2007: Automatic extraction and delineation of single trees from remote sensing data. In: Machine Vision and Applications, Vol. 18, S. 317-330.

- Yang L., Wu X., Praun E., Ma X. 2009: Tree Detection from Aerial Imagery. In: Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, New York, S. 131-137.
- Zadeh L. A. 1965: Fuzzy Sets. In: Information and Control, Vol. 8, S. 338-353.
- Ziegler M., Wimmer A., Schardt M., Eckmüller O., Hofrichter J. 2001: Hochauflösende Gelände- und Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten - ein Anwendungsbeispiel aus der Forstinventur. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, Vol. 89, No. 1, S. 18-25.

Anhang 1 - GIS-Modell zur Berechnung der Matching Statistiken



Anhang 2 - GIS Modell für die Ableitung der Baumspitzen


```

* @author Dirk "jtk" Frommholz und Steven Bayer
* @date August 31, 2016
*/
class CRegionLabeler {
private:

    /**
     * The source image.
     */
    CImage* m_srcImage_p;

    /**
     * The resulting label image.
     */
    CImage* m_labelImage_p;

    /**
     * The nodata intensity.
     */
    data::sample_type m_nodata;

public:

    /**
     * The constructor. The label and class images can be single channel,
     * as only the first channel will be used.
     *
     * @param f_srcImage_p the source image
     * @param f_labelImage_p after labeling, the image holding the
     * region labels per pixel
     */
    CRegionLabeler(CImage* f_srcImage_p, CImage* f_labelImage_p):
        m_srcImage_p(f_srcImage_p), m_labelImage_p(f_labelImage_p) { }

    /**
     * LabelImage labels the source image using region growing.
     *
     * @param f_comp the comparison functor that decides whether a pixel
     * belongs to the region or not

```

```

* @param f_maxPixelsPerRegion the maximum number of pixels per
* region (defaults to std::numeric_limits<data::pos_type>::max())
* @param f_progress_p the progress indicator
* @param f_startLabel the label of the first region found
* @param f_labelIncrement the label increment (or decrement if
    negative) * if a new region is to be labeled
* @return the number of regions found
*/
template <class RegionMemberComparator>
data::pos_type labelImage(RegionMemberComparator f_comp,
data::pos_type f_maxPixelsPerRegion=
    std::numeric_limits<data::pos_type>::max(),
    common::CProgress* f_progress_p=0,
data::pos_type f_startLabel=0,
    data::pos_type f_labelIncrement=1);

/**
* LabelImageRelative labels the source image using region growing.
* The similarity criterion will be applied relative to the predecessor
* pixel rather than the region seed however.
*
* @param f_comp the comparison functor that decides whether a pixel
* belongs to the region or not
* @param f_maxPixelsPerRegion the maximum number of pixels per
* region (defaults to std::numeric_limits<data::pos_type>::max())
* @param f_progress_p the progress indicator
* @param f_startLabel the label of the first region found
* @param f_labelIncrement the label increment (or decrement if
    negative) if a new region is to be labeled
* @param f_seedList_p a list of seeds, will be exclusively taken if
* valid
* @return the number of regions found
*/
template <class RegionMemberComparator>
data::pos_type labelImageRelative(RegionMemberComparator f_comp,
data::pos_type f_maxPixelsPerRegion=
    std::numeric_limits<data::pos_type>::max(),
    common::CProgress* f_progress_p=0,data::pos_type f_startLabel=0,
    data::pos_type f_labelIncrement=1, const std::vector<data::
    CPoint2DInt>* f_seedList_p=0);

/**
* The destructor.

```

```

        */
        ~CRegionLabeler() { }
};

} // namespace image

/*****
/*****
/*****

template <class RegionMemberComparator>
data::pos_type image::CRegionLabeler::labelImage(
RegionMemberComparator f_comp, data::pos_type f_maxPixelsPerRegion,
common::CProgress* f_progress_p, data::pos_type f_startLabel, data::pos_type
f_labelIncrement) {

// width/height
const data::pos_type imageWidth=m_srcImage_p->getDescriptor().getValue
<data::pos_type>("/Base/imageWidth");
const data::pos_type imageHeight=m_srcImage_p->getDescriptor().getValue
<data::pos_type>("/Base/imageHeight");
const data::pos_type imageNrOfChannels=m_srcImage_p->getDescriptor().
getValue<data::pos_type>("/Base/imageNrOfChannels");

// initialize both the label and class image
CRandomAccessIterator labelIt=m_labelImage_p->getRaIterator();
CConstRandomAccessIterator seedIt=m_labelImage_p->getConstRaIterator();
CConstRandomAccessIterator srcIt=m_srcImage_p->getConstRaIterator();

for (labelIt.y.begin(), labelIt.ch.begin(); labelIt.y.isValid();
++labelIt.y) {
    for (labelIt.x.begin(); labelIt.x.isValid(); ++labelIt.x) {
        *labelIt=-1;
    } // x
} // y

bool regionedAllPixels=false;

```

```

data::pos_type regionCount=0;
data::pos_type currentRegion=f_startLabel;
data::sample_type* seedPix_p=new data::sample_type[imageNrOfChannels];
data::pos_type pixelsProcessed=0;

// initialize seed
seedIt.x=0;
seedIt.y=0;
seedIt.ch=0;

while (!regionedAllPixels) {

    // find seed
    bool foundSeed=false;
    data::CPoint2DInt seedPos(-1, -1);

    for (labelIt.y=seedIt.y, labelIt.ch.begin(); labelIt.y.isValid()
        && !foundSeed; ++labelIt.y) {
        for (labelIt.x=0; labelIt.x.isValid() && !foundSeed;
            ++labelIt.x) {
            if (*labelIt<0) {
                seedIt.x=labelIt.x;
                seedIt.y=labelIt.y;
                foundSeed=true;
            }
        } // x
    } // y

    if (foundSeed) {
        seedPos.setCoords(seedIt.x, seedIt.y);
        srcIt.x=seedPos.m_i;
        srcIt.y=seedPos.m_j;
        srcIt.ch=0;
        memcpy(seedPix_p, srcIt.access(), imageNrOfChannels*
            sizeof(data::sample_type));
    }

    // progress indication
    if (f_progress_p) {

        if (regionCount%100==0) {
            const data::sample_type percentage=
                ((1.0*pixelsProcessed)/static_cast<data::sample_type>(
                    imageWidth))/imageHeight;

```

```

        f_progress_p->setPercentage(percentage);
        f_progress_p->showProgress();
    }
}

// label the image
regionedAllPixels=!foundSeed;

if (!regionedAllPixels) {
    std::list<std::pair<data::pos_type, data::pos_type>> contour;
    contour.push_back(std::make_pair(seedIt.x, seedIt.y));

    data::pos_type regionPixels=f_maxPixelsPerRegion;
    // count seed pixel too
    ++pixelsProcessed;

    // process rim of region, add new neighbours if they fulfill
    // the region criterion
    while (contour.size()) {

        // get local seed
        std::pair<data::pos_type, data::pos_type> localSeed=
            contour.front();

        // label local seed
        labelIt.x=localSeed.first;
        labelIt.y=localSeed.second;
        *labelIt=currentRegion;
        contour.pop_front();

        // label neighbours excluding seed, and modify the contour
        // accordingly
        if (regionPixels>0) {
            for (labelIt.y=localSeed.second-1; labelIt.y<=localSeed.
                second+1; ++labelIt.y) {
                for (labelIt.x=localSeed.first-1; labelIt.x<=
                    localSeed.first+1; ++labelIt.x) {
                    if (labelIt.isValid()) {
                        if (*labelIt<0) {

                            const data::CPoint2DInt lblPos(labelIt.x,
                                labelIt.y);

                            srcIt.x=lblPos.m_i;

```

```

        srcIt.y=lblPos.m_j;
        srcIt.ch=0;

        if (f_comp(seedPix_p, srcIt.access(),
            &seedPos, &lblPos)) {
            *labelIt=currentRegion;
            ++pixelsProcessed;
            --regionPixels;
            contour.push_back(std::make_pair(labelIt.x,
                labelIt.y));

                } // regionCriterion
            } // notYetLabeled
        } // labelIteratorValid
    }
} // regionPixelsNotReached

} // whileContourPixels

currentRegion+=f_labelIncrement;
++regionCount;

} // current growth run

} // regioned all pixels

delete[] seedPix_p;
return regionCount;
}

/*****

template <class RegionMemberComparator>
data::pos_type image::CRegionLabeler::labelImageRelative(
RegionMemberComparator f_comp, data::pos_type f_maxPixelsPerRegion,
common::CProgress* f_progress_p, data::pos_type f_startLabel, data::pos_type
f_labelIncrement, const std::vector<data::CPoint2DInt>* f_seedList_p) {

// width/height
const data::pos_type imageWidth=m_srcImage_p->getDescriptor().getValue
<data::pos_type>("/Base/imageWidth");

```

```

const data::pos_type imageHeight=m_srcImage_p->getDescriptor().getValue
<data::pos_type>("/Base/imageHeight");
const data::pos_type imageNrOfChannels=m_srcImage_p->getDescriptor().
getValue<data::pos_type>("/Base/imageNrOfChannels");

// initialize both the label and class image
CRandomAccessIterator labelIt=m_labelImage_p->getRaIterator();
CConstRandomAccessIterator seedIt=m_labelImage_p->getConstRaIterator();
CConstRandomAccessIterator srcIt=m_srcImage_p->getConstRaIterator();

for (labelIt.y.begin(), labelIt.ch.begin(); labelIt.y.isValid();
++labelIt.y) {
    for (labelIt.x.begin(); labelIt.x.isValid(); ++labelIt.x) {
        *labelIt=-1;
    } // x
} // y

bool regionedAllPixels=false;
data::pos_type regionCount=0;
data::pos_type currentRegion=f_startLabel;
data::sample_type* seedPix_p=new data::sample_type[imageNrOfChannels];
data::sample_type* localSeedPix_p=new data::sample_type[imageNrOfChannels];
data::pos_type pixelsProcessed=0;

// explicit seed list
std::vector<data::CPoint2DInt>::size_type seedListIndex=0;

// initialize seed
seedIt.x=0;
seedIt.y=0;
seedIt.ch=0;

while (!regionedAllPixels) {

    // find seed
    bool foundSeed=false;

    // use explicit seed list ?
    if (f_seedList_p) {

        // yes, get next seed
        if (seedListIndex<f_seedList_p->size()) {

            seedIt.x=f_seedList_p->at(seedListIndex).m_i;

```

```

        seedIt.y=f_seedList_p->at(seedListIndex).m_j;
        foundSeed=seedIt.isValid();
        ++seedListIndex;
    }
} else {

    for (labelIt.y=seedIt.y, labelIt.ch.begin(); labelIt.y.isValid() &&
        !foundSeed; ++labelIt.y) {
        for (labelIt.x=0; labelIt.x.isValid() && !foundSeed;
            ++labelIt.x) {
            if (*labelIt<0) {
                seedIt.x=labelIt.x;
                seedIt.y=labelIt.y;
                foundSeed=true;
            }
        } // x
    } // y
}

if (foundSeed) {
    srcIt.x=static_cast<data::pos_type>(seedIt.x);
    srcIt.y=static_cast<data::pos_type>(seedIt.y);
    srcIt.ch=0;
    memcpy(seedPix_p, srcIt.access(), imageNrOfChannels*
        sizeof(data::sample_type));
}

// progress indication
if (f_progress_p) {
    if (f_seedList_p) {
        f_progress_p->setPercentage(static_cast<double>(
            seedListIndex)/f_seedList_p->size());
        f_progress_p->showProgress();
    } else {

        if (regionCount%100==0) {
            const data::sample_type percentage=
                ((1.0*pixelsProcessed)/static_cast<data::sample_type>(
                    imageWidth))/imageHeight;

            f_progress_p->setPercentage(percentage);
            f_progress_p->showProgress();
        }
    }
}

```

```

}

// label the image
regionedAllPixels=!foundSeed;

if (!regionedAllPixels) {
    std::list<std::pair<data::pos_type, data::pos_type>> contour;
    contour.push_back(std::make_pair(seedIt.x, seedIt.y));

    data::pos_type regionPixels=f_maxPixelsPerRegion;

    // count seed pixel too
    ++pixelsProcessed;

    // process rim of region, add new neighbours if they fulfill
    // the region criterion
    while (contour.size()) {

        // get local seed
        data::CPoint2DInt localSeed(contour.front().first, contour.
front().second);

        // get local seed pixel color from source image
        srcIt.x=localSeed.m_i;
        srcIt.y=localSeed.m_j;
        srcIt.ch=0;
        memcpy(localSeedPix_p, srcIt.access(), imageNrOfChannels*
sizeof(data::sample_type));

        // label local seed
        labelIt.x=localSeed.m_i;
        labelIt.y=localSeed.m_j;
        *labelIt=currentRegion;
        contour.pop_front();

        // label neighbours excluding seed, and modify the contour
        // accordingly
        if (regionPixels>0) {
            for (labelIt.y=localSeed.m_j-1; labelIt.y<=localSeed.
m_j+1; ++labelIt.y) {
                for (labelIt.x=localSeed.m_i-1; labelIt.x<=
localSeed.m_i+1; ++labelIt.x) {
                    if (labelIt.isValid()) {
                        if (*labelIt<0) {

```

```

        const data::CPoint2DInt initialSeed(
            seedIt.x, seedIt.y);

        const data::CPoint2DInt lblPos(lblIt.x,
            lblIt.y);

        srcIt.x=lblPos.m_i;
        srcIt.y=lblPos.m_j;
        srcIt.ch=0;

        if (f_comp(localSeedPix_p, srcIt.access(),
            &localSeed, &lblPos, &initialSeed)) {

            *labelIt=currentRegion;
            ++pixelsProcessed;
            --regionPixels;
            contour.push_back(std::make_pair(lblIt.x,
                lblIt.y));

                } // regionCriterion
            } // notYetLabeled
        } // labelIteratorValid
    }
} // regionPixelsNotReached

} // whileContourPixels

currentRegion+=f_labelIncrement;
++regionCount;

} // current growth run

} // regioned all pixels

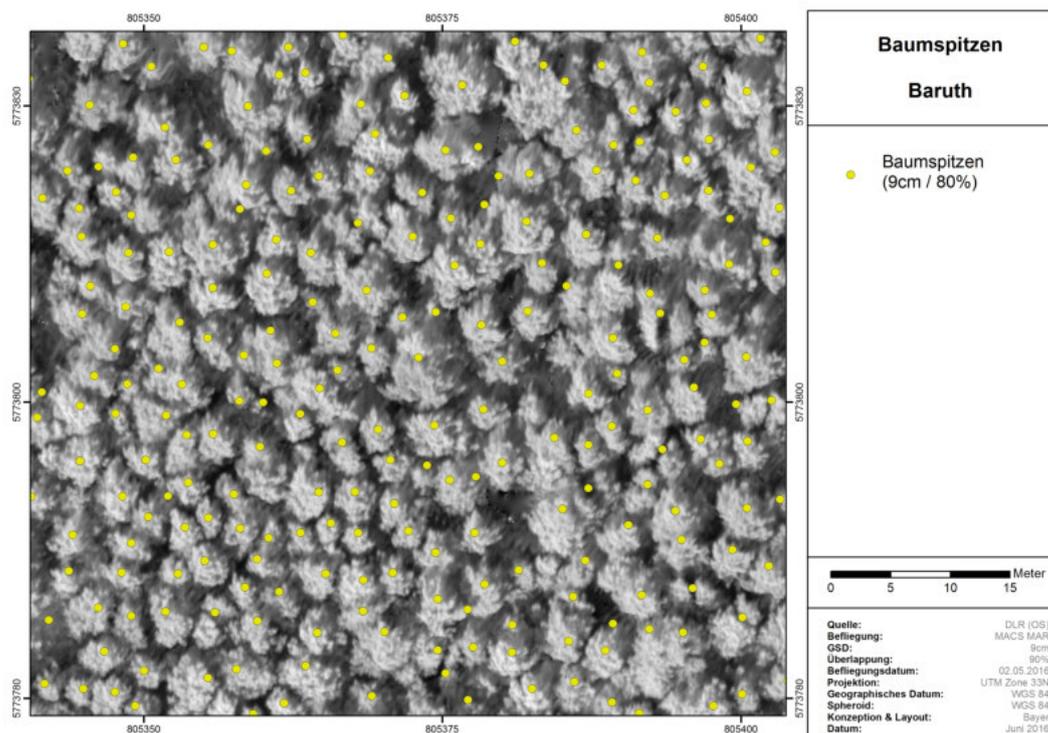
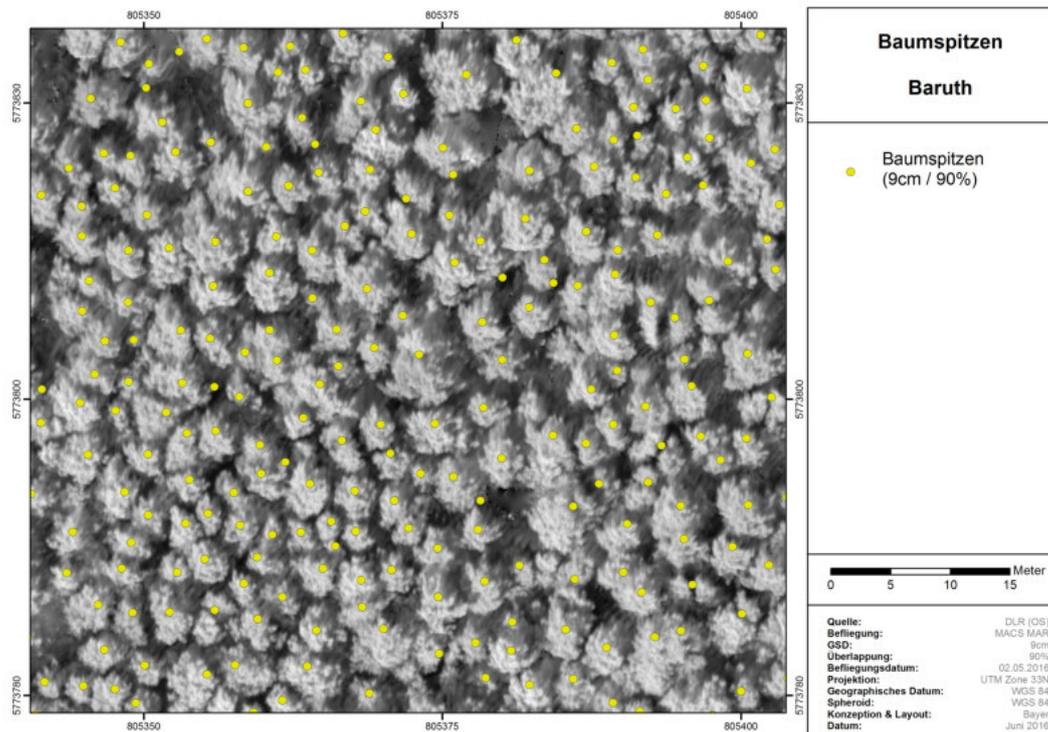
delete[] localSeedPix_p;
delete[] seedPix_p;
return regionCount;
}

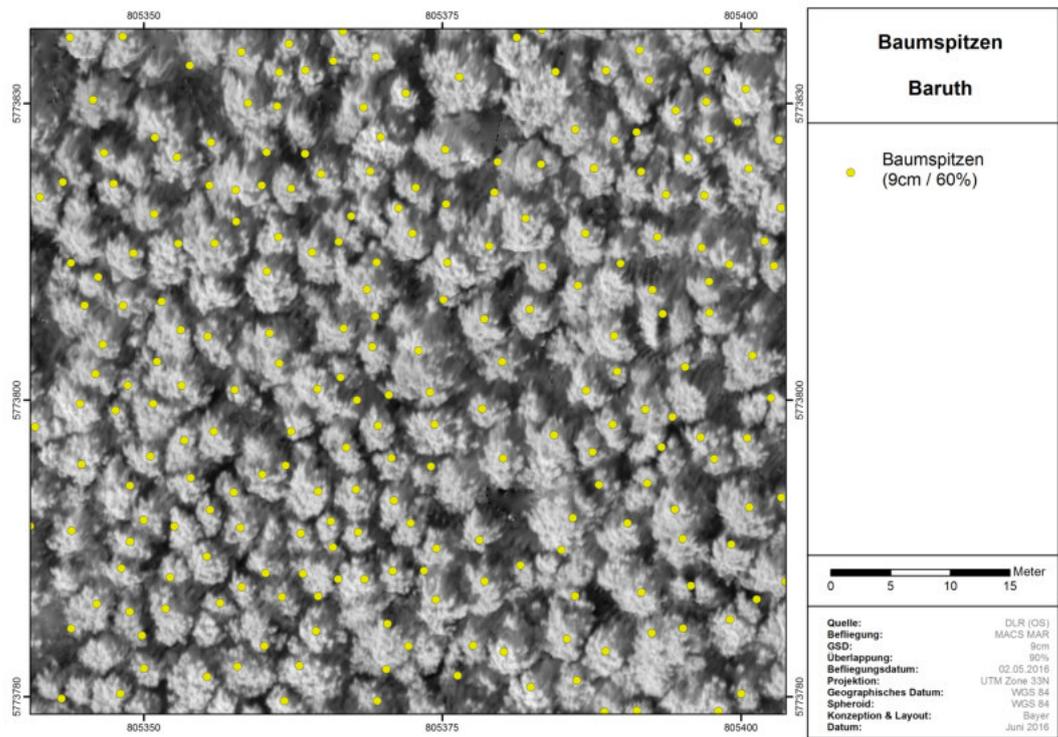
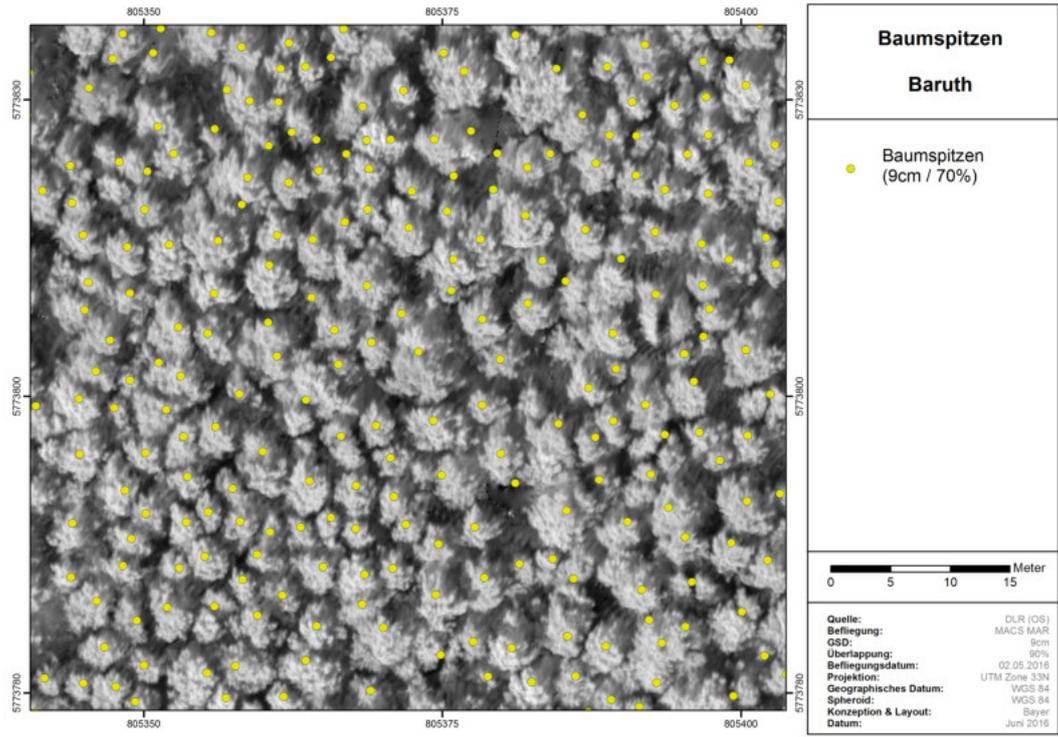
/*****

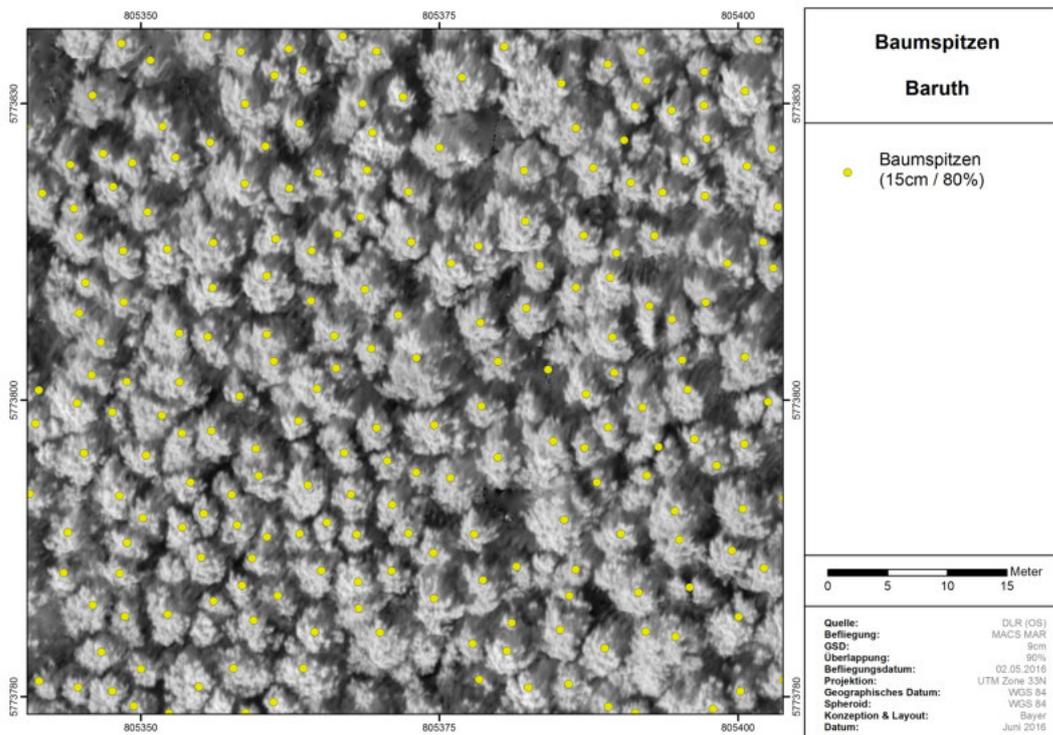
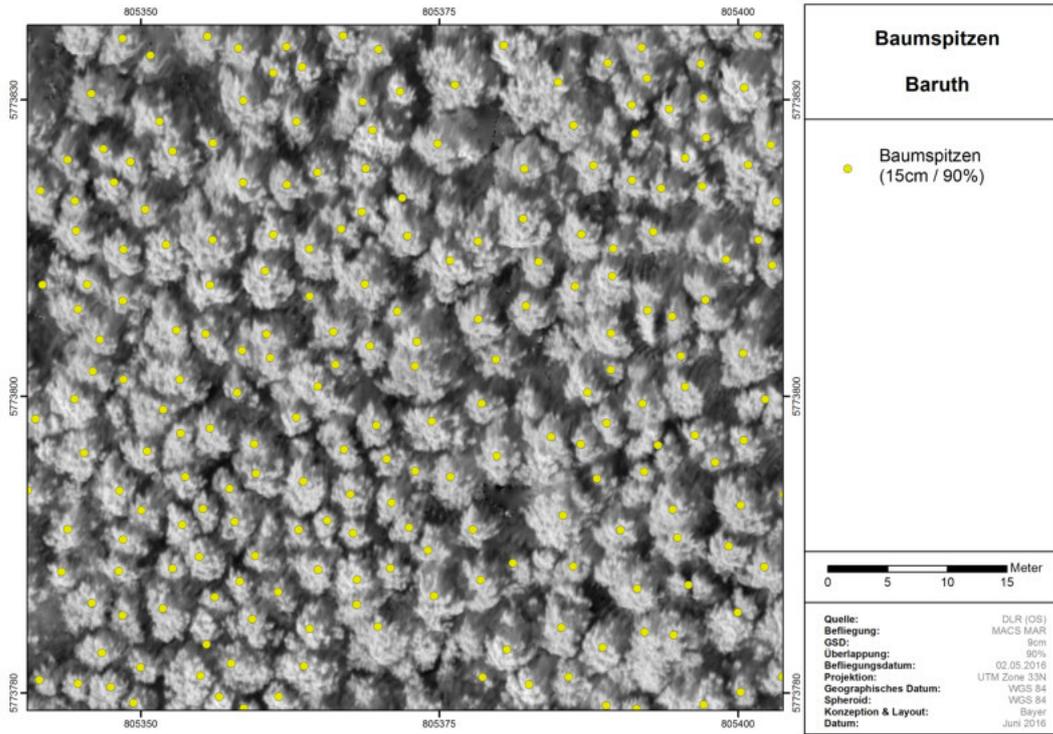
#endif

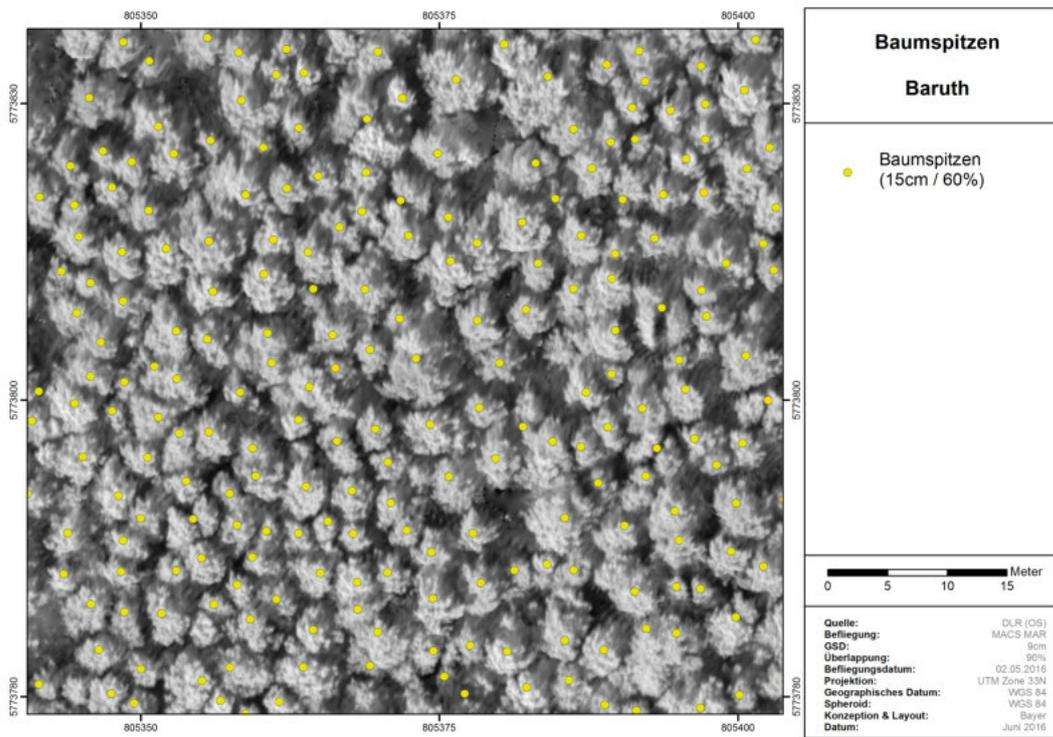
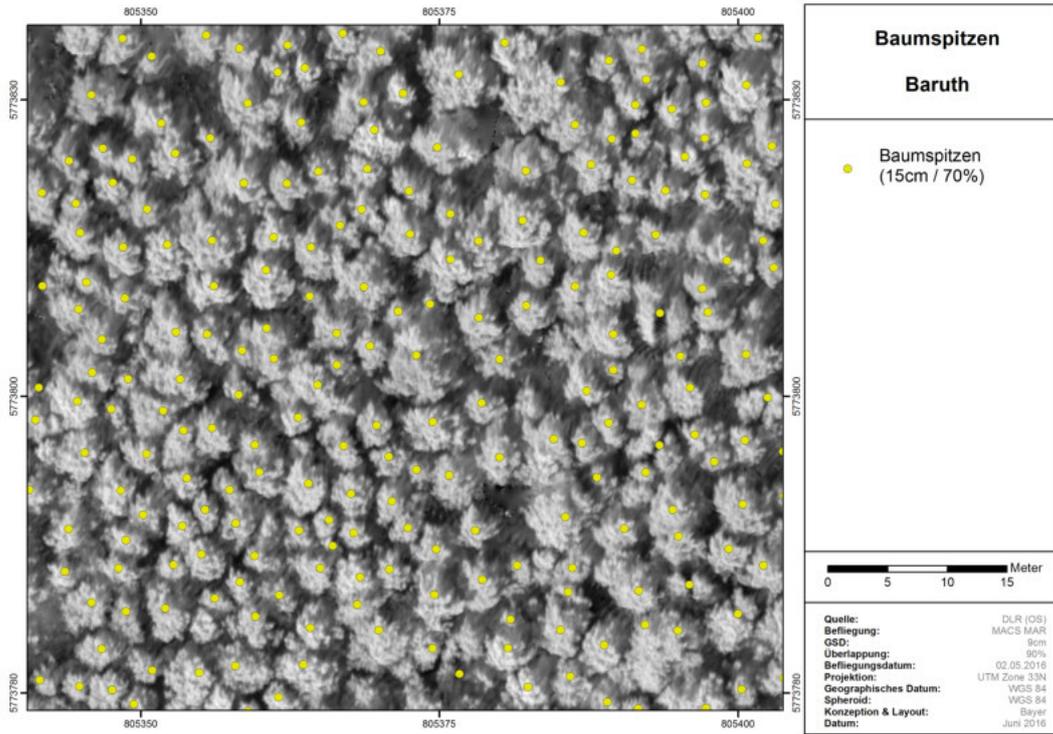
```

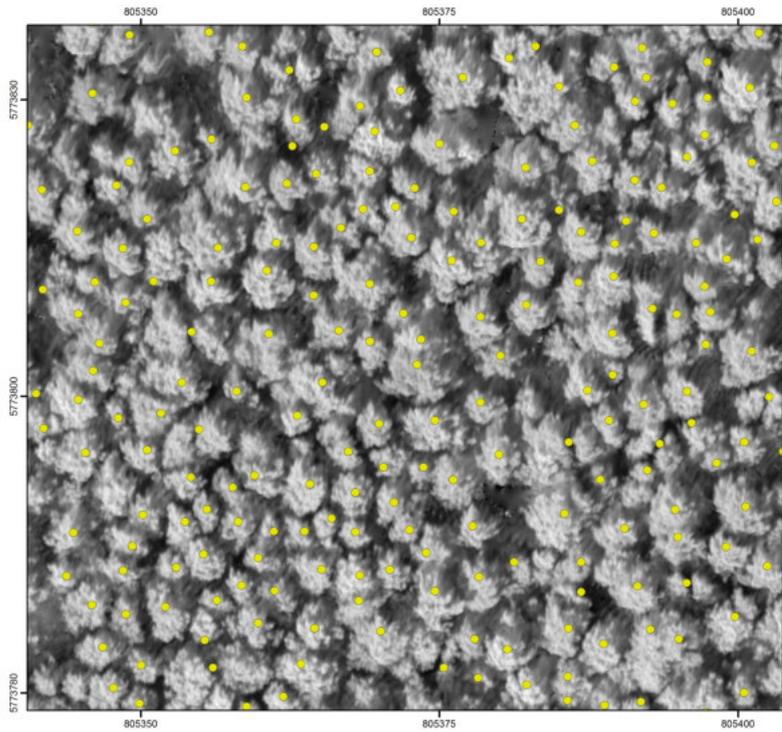
Anhang 4 – Baumspitzen Baruth









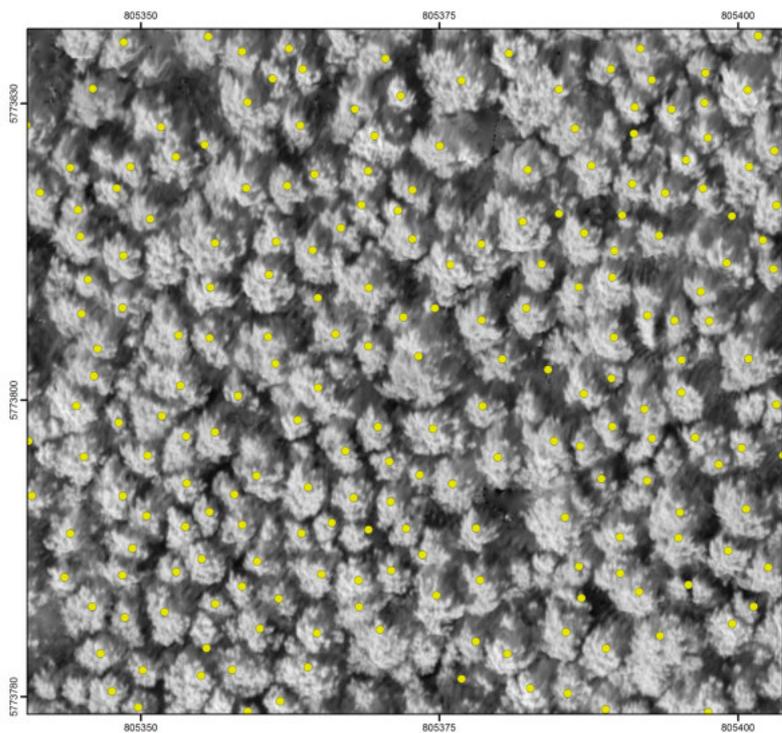


**Baumspitzen
Baruth**

● Baumspitzen
(20cm / 90%)

Meter
0 5 10 15

Quelle:	DLR (OB)
Befliegung:	MACS MAR
GSD:	9cm
Überlappung:	90%
Befliegungsdatum:	02.05.2016
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016

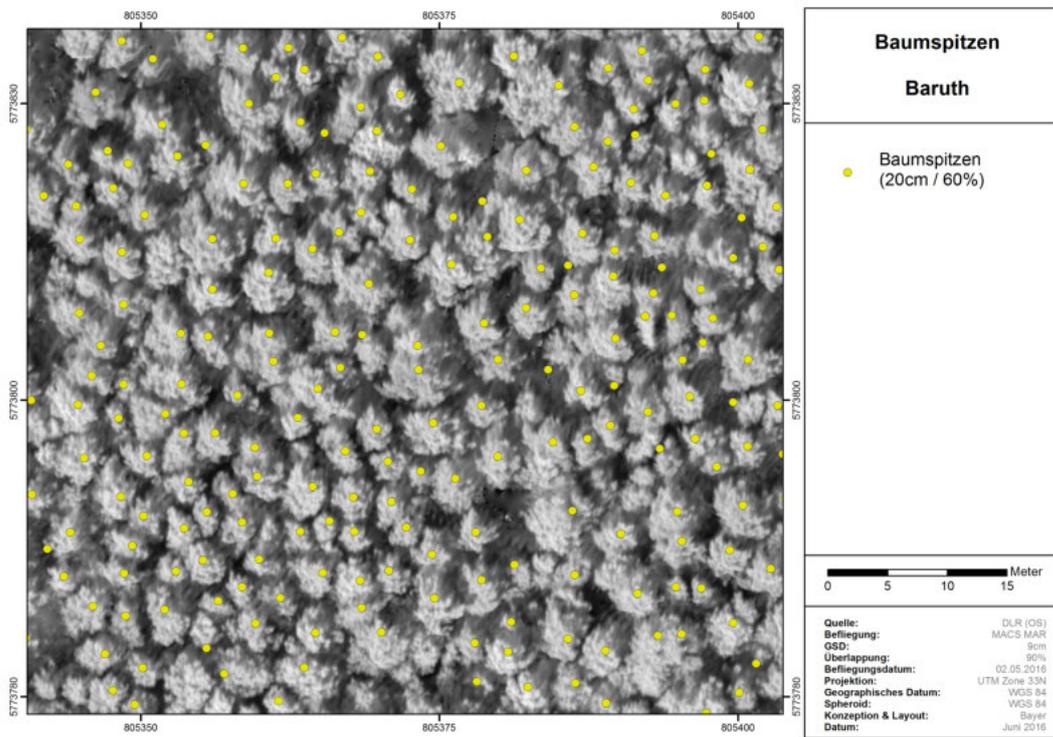
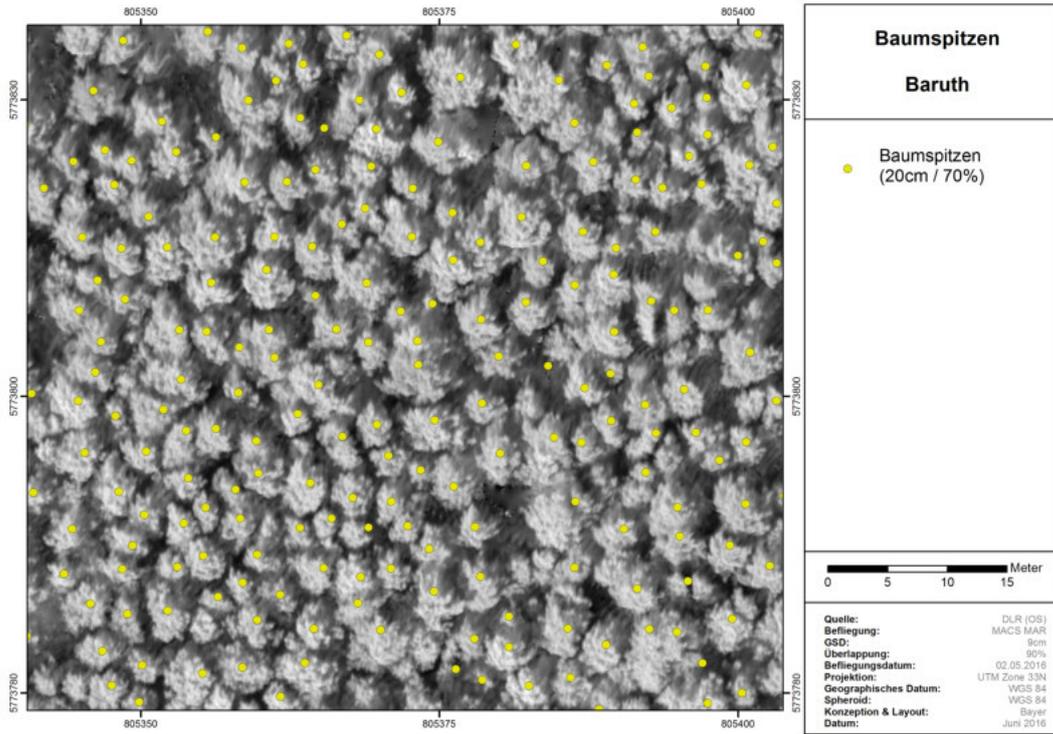


**Baumspitzen
Baruth**

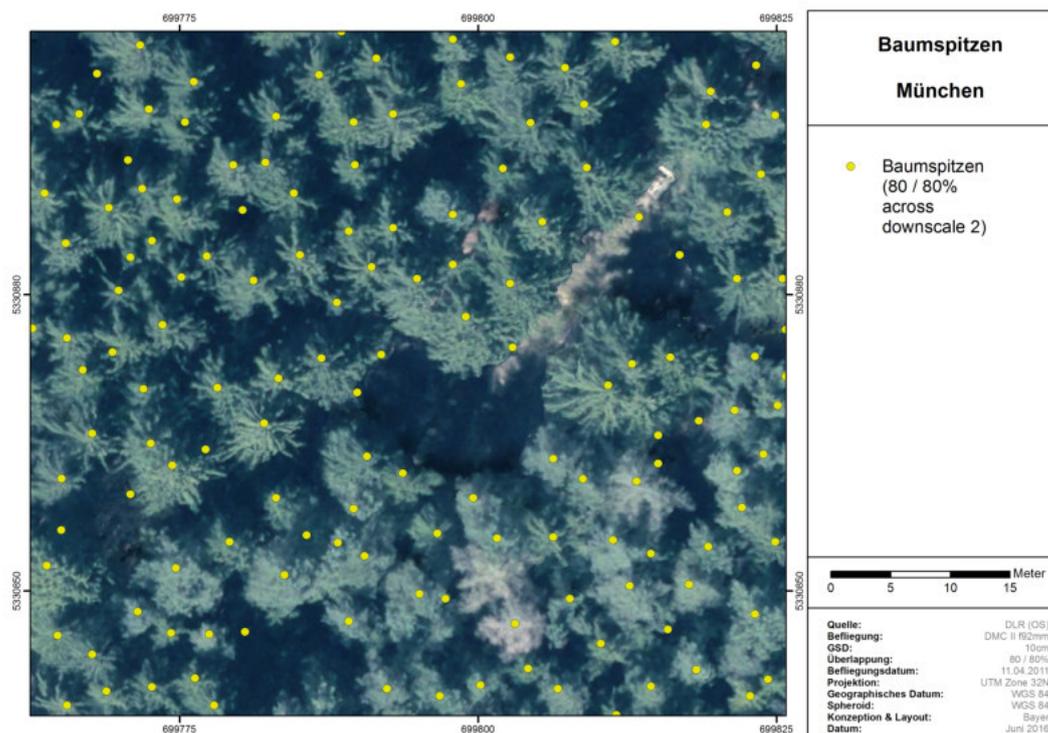
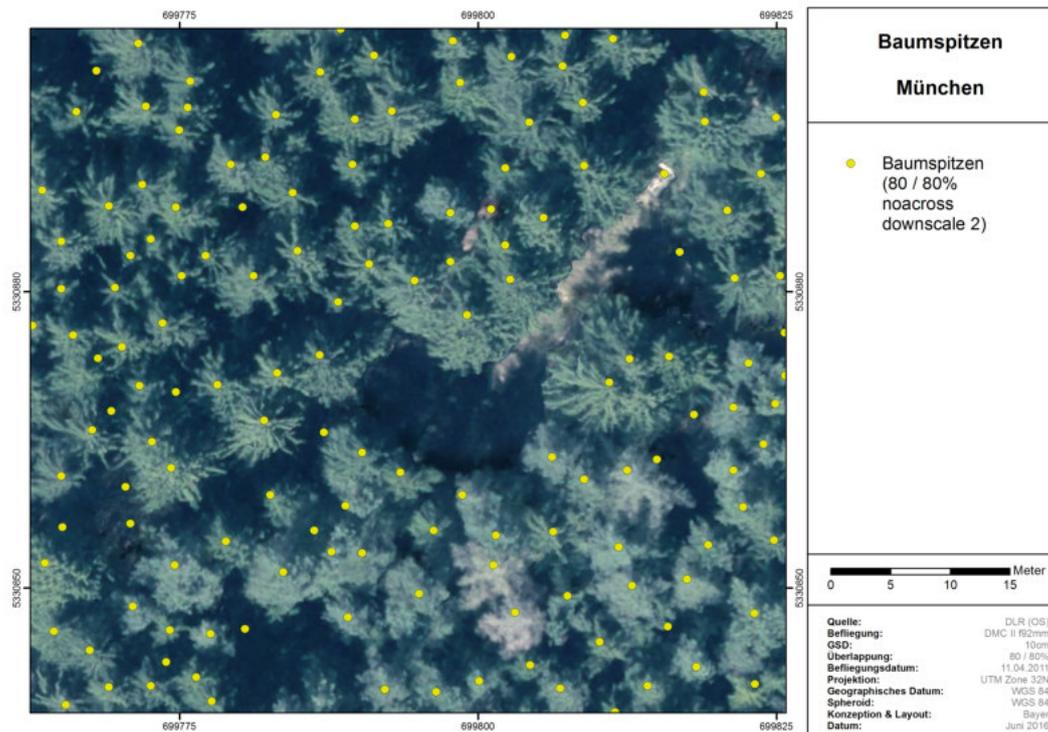
● Baumspitzen
(20cm / 80%)

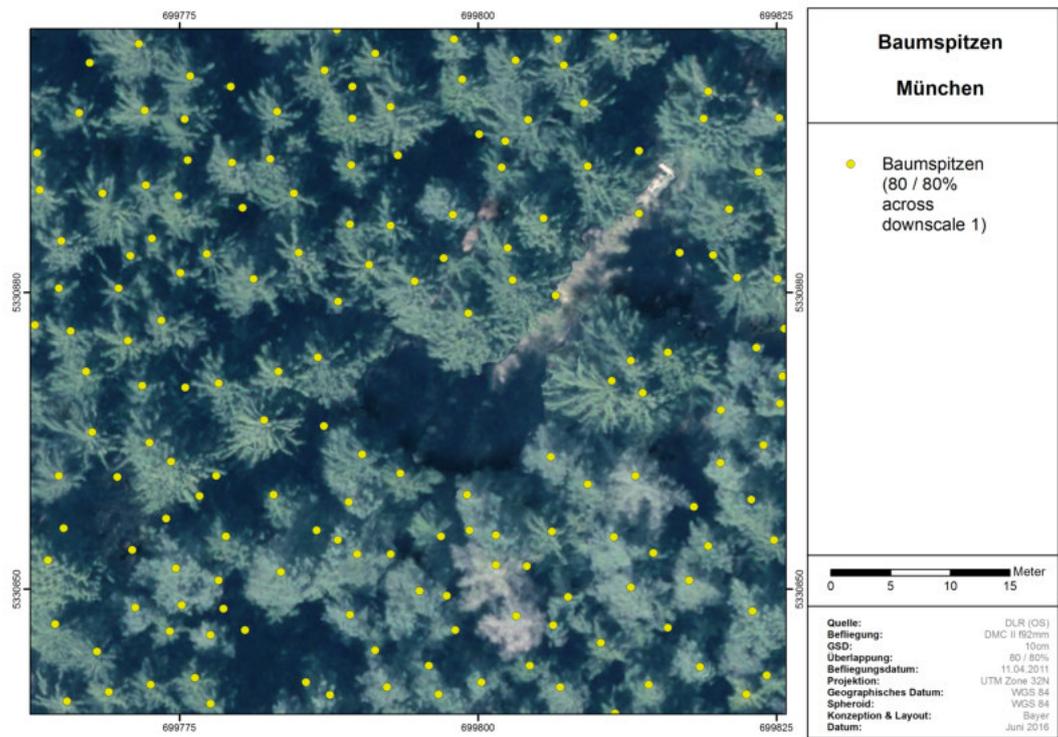
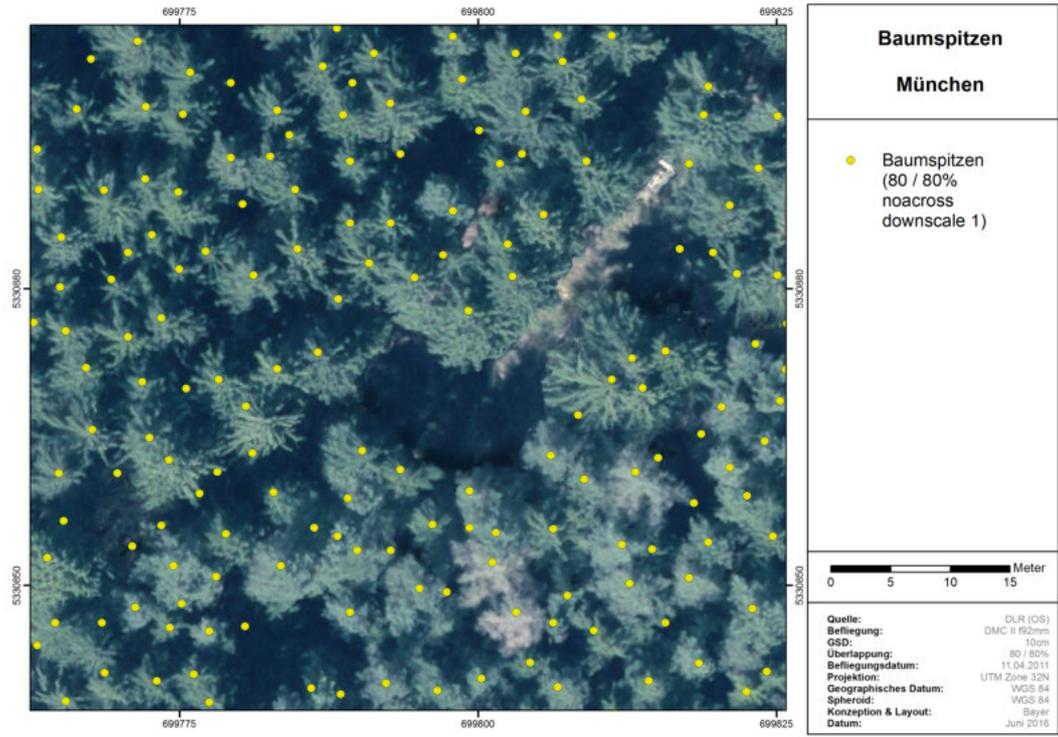
Meter
0 5 10 15

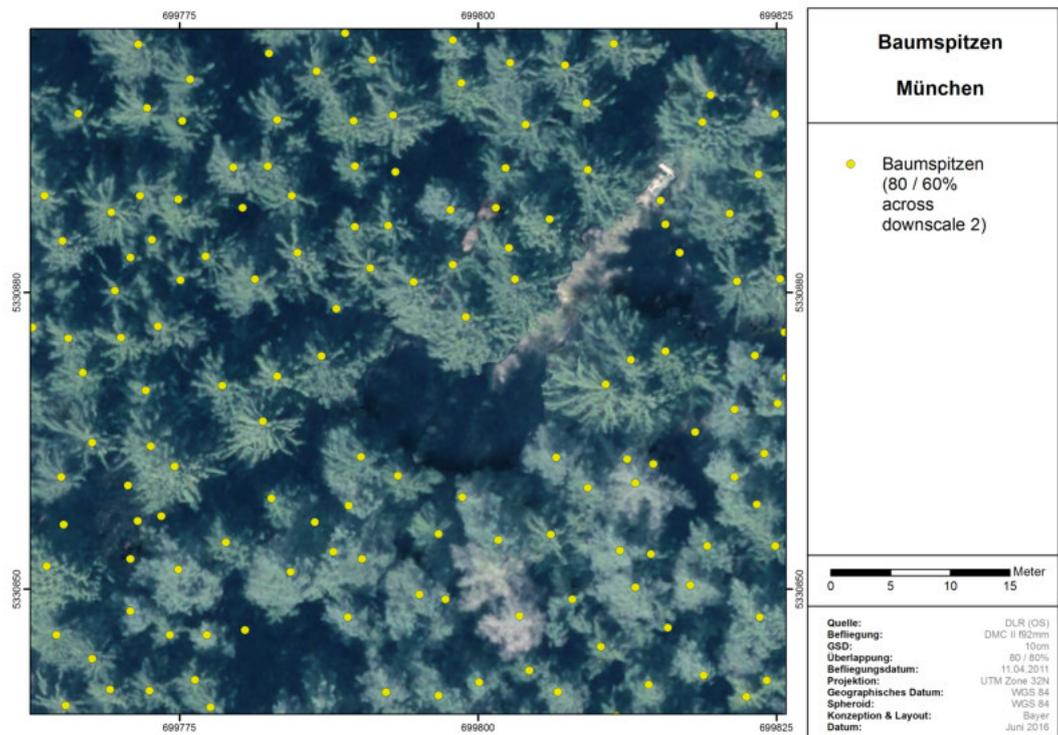
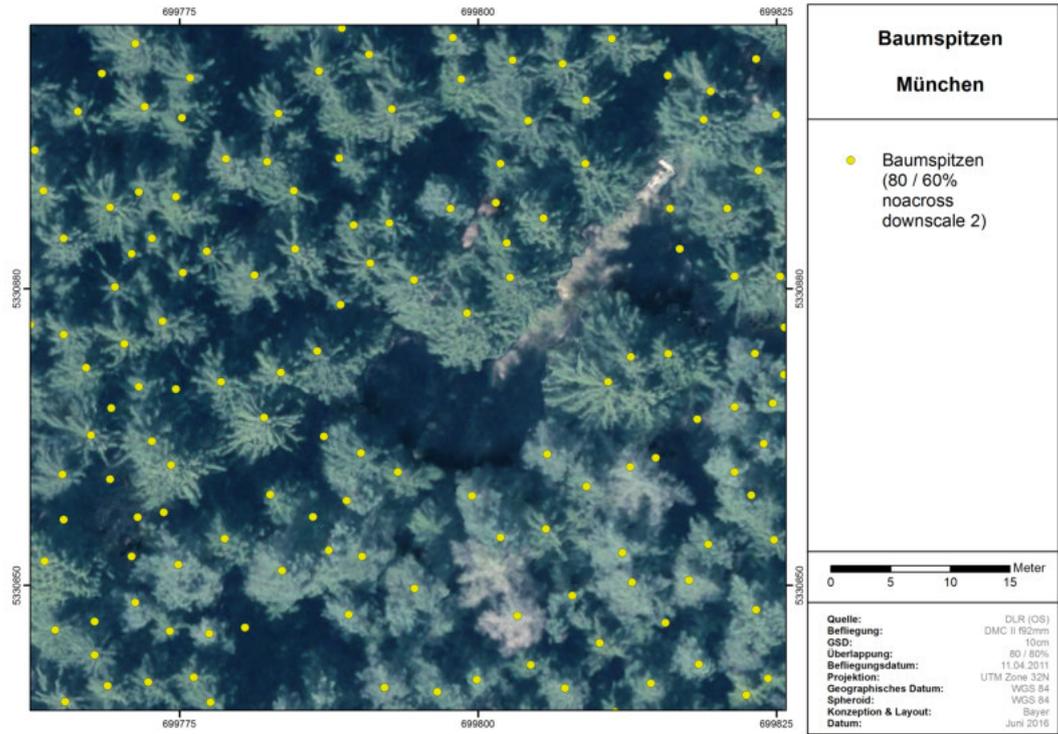
Quelle:	DLR (OB)
Befliegung:	MACS MAR
GSD:	9cm
Überlappung:	90%
Befliegungsdatum:	02.05.2016
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016

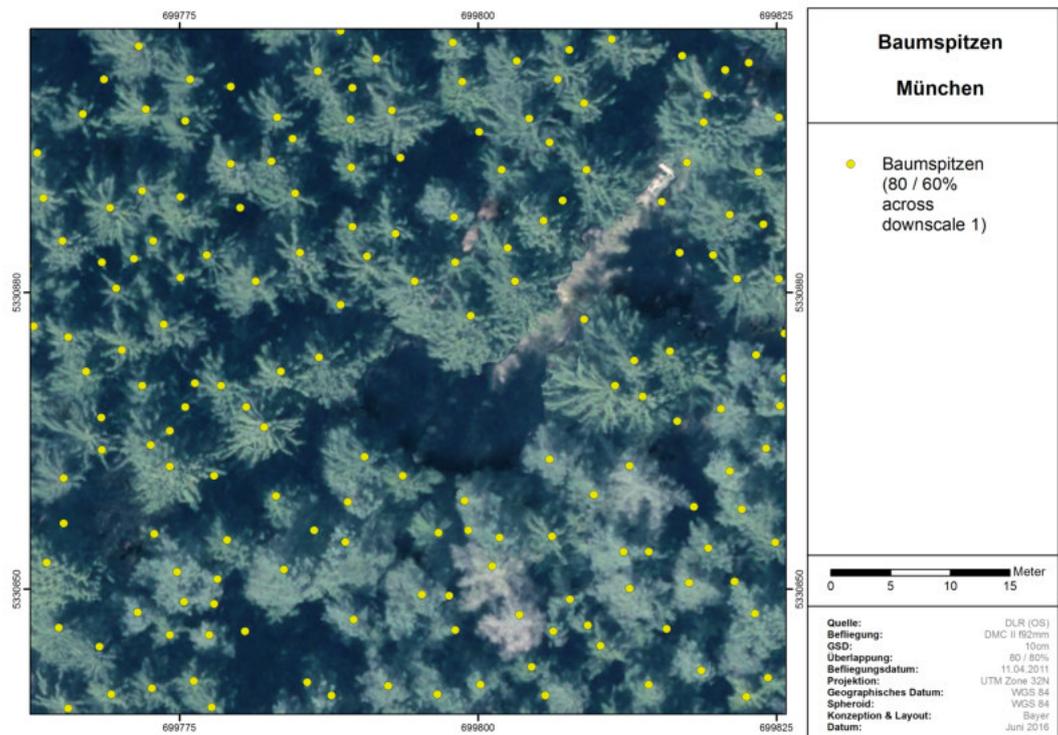
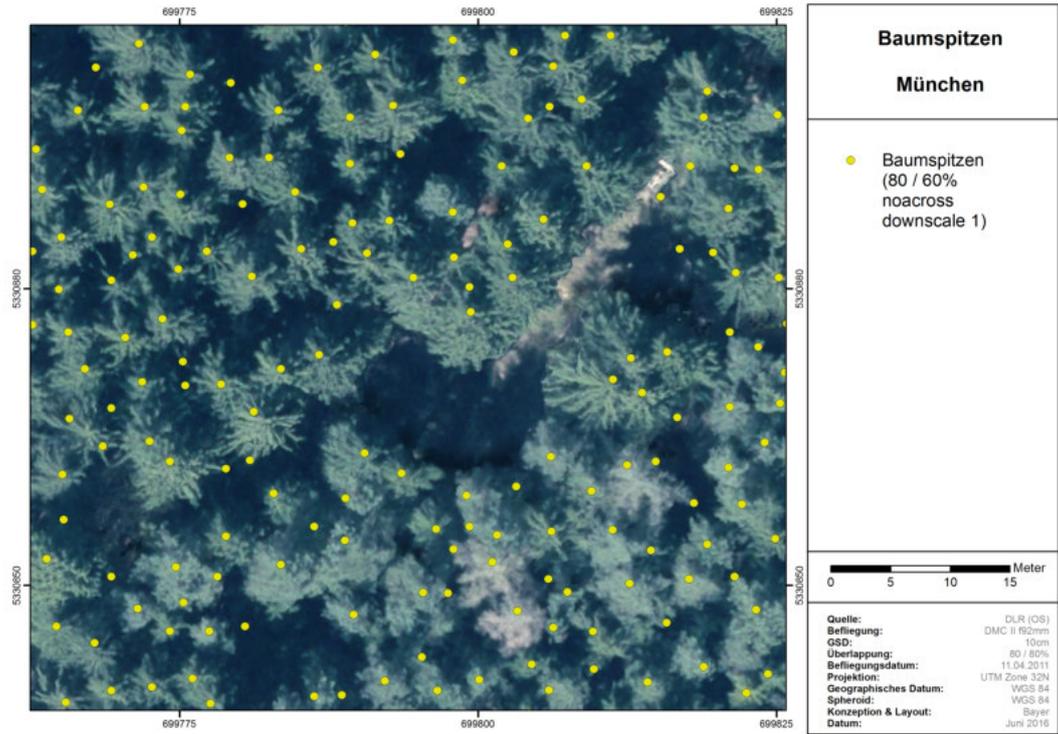


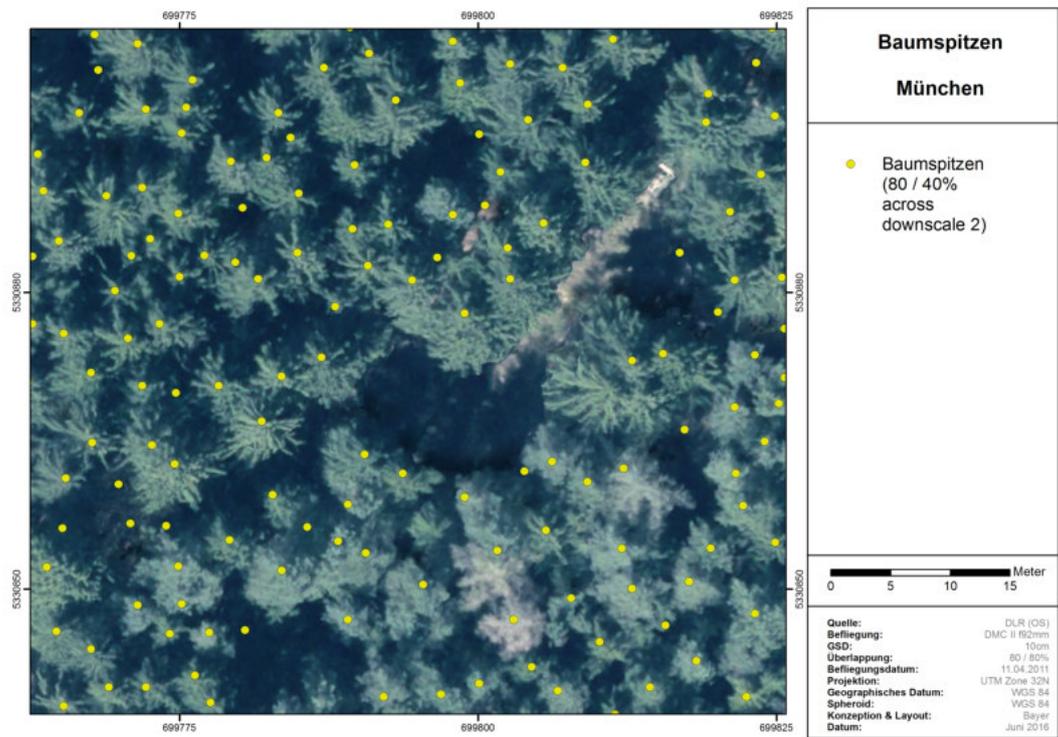
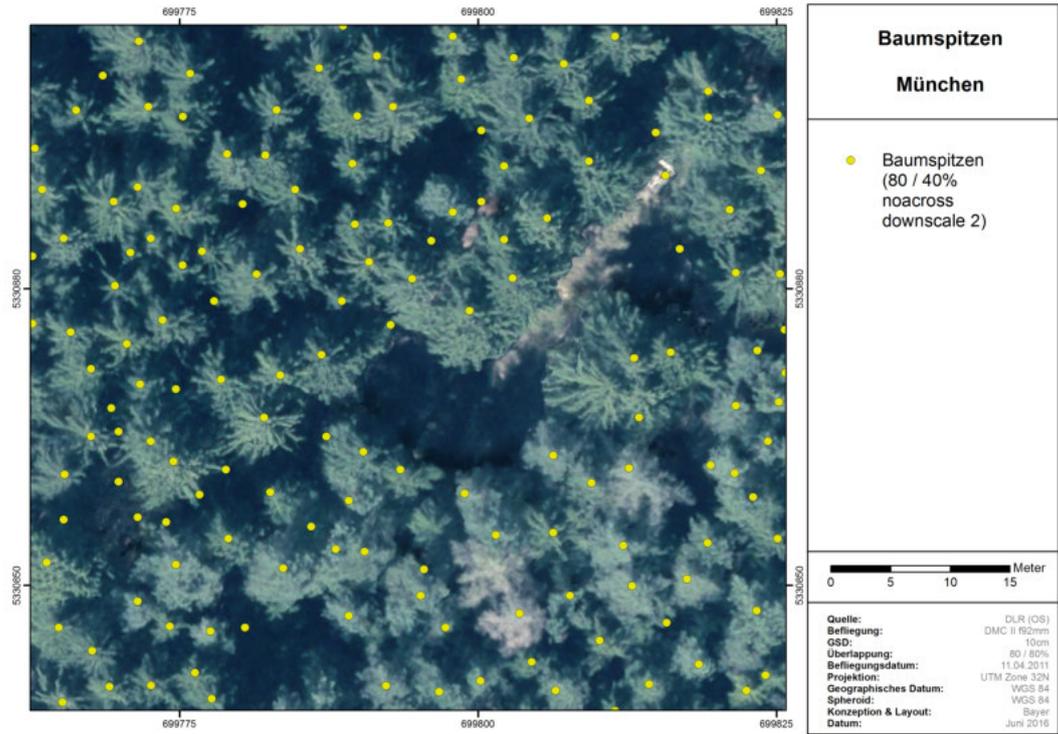
Anhang 5 – Baumspitzen München

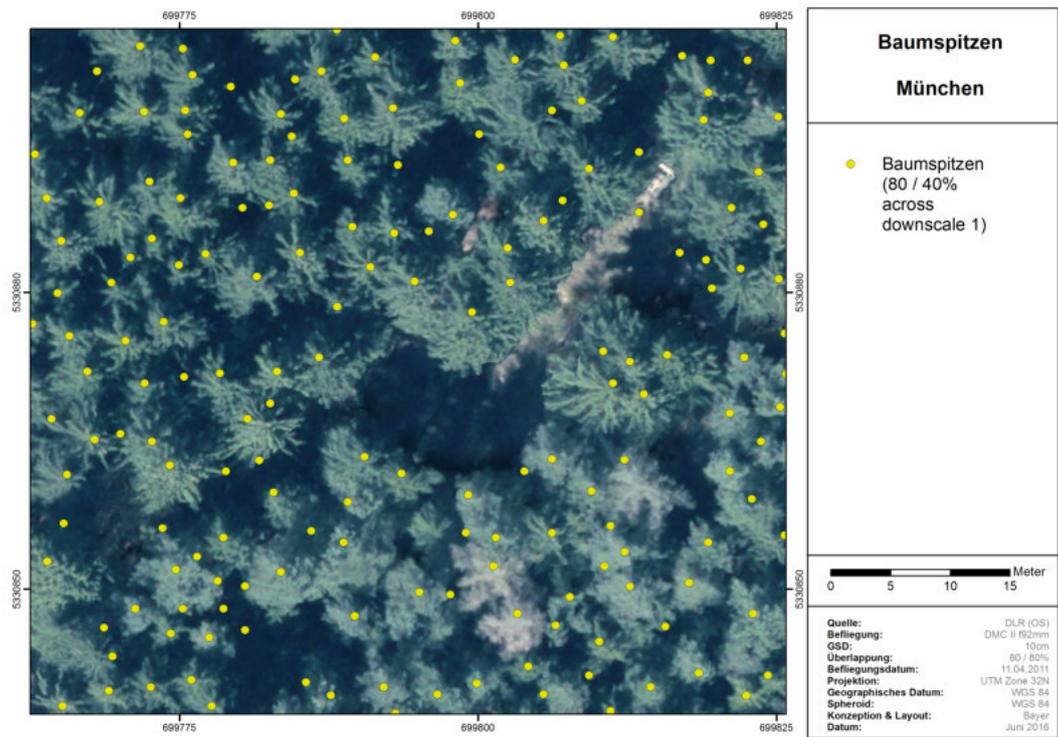
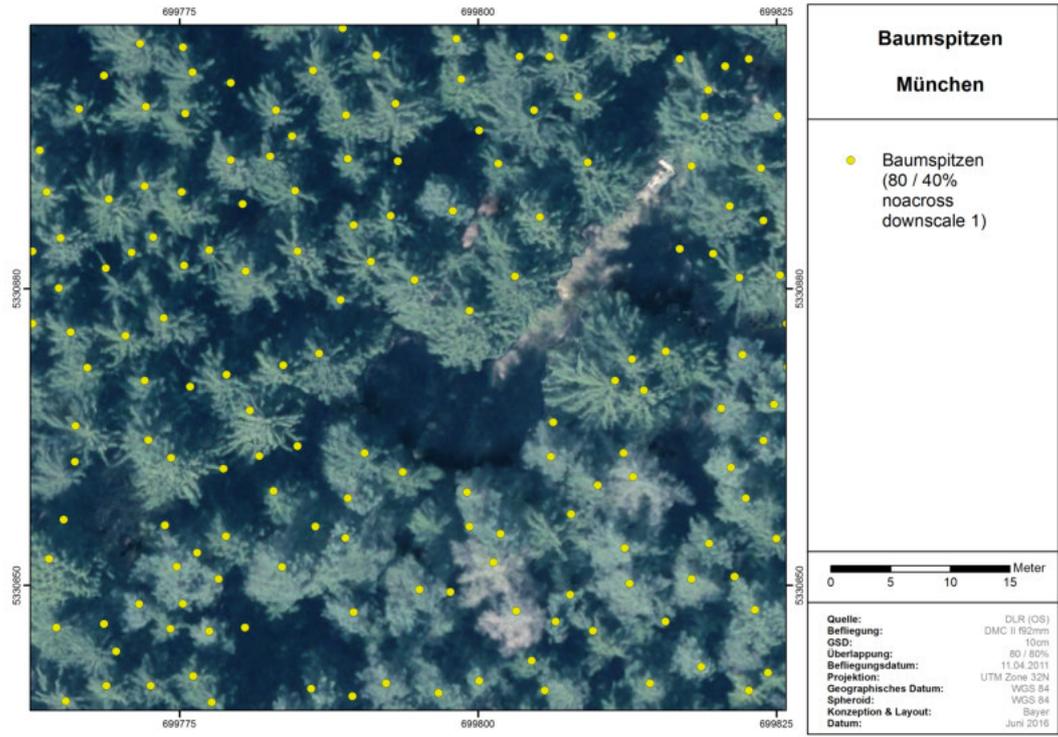


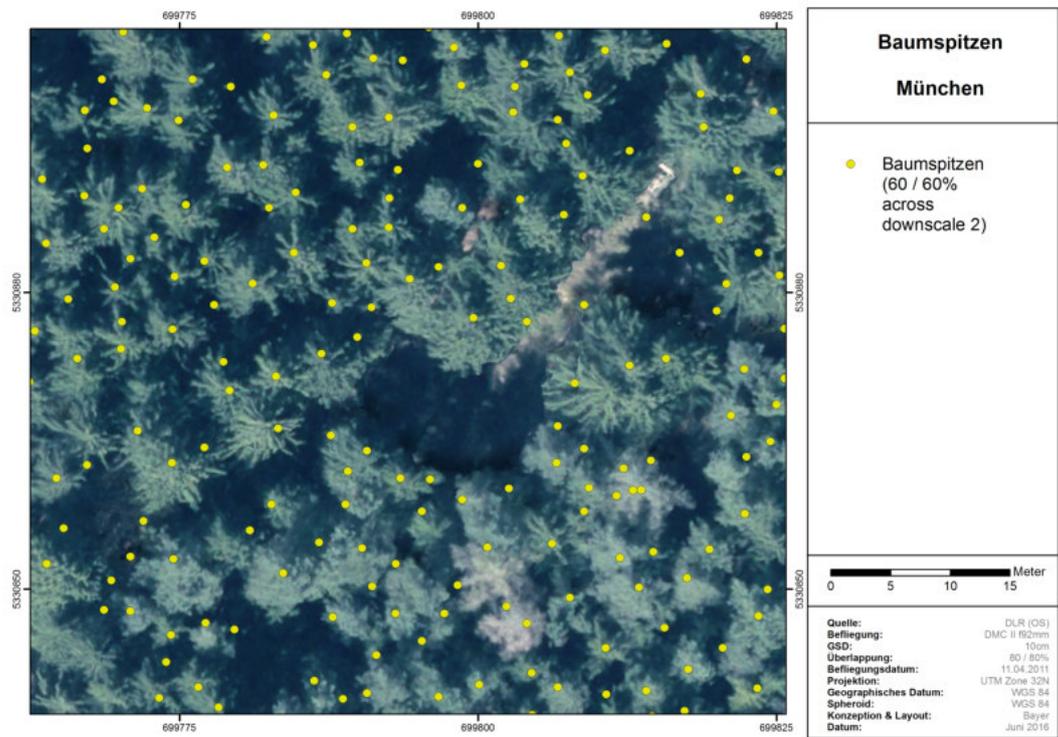
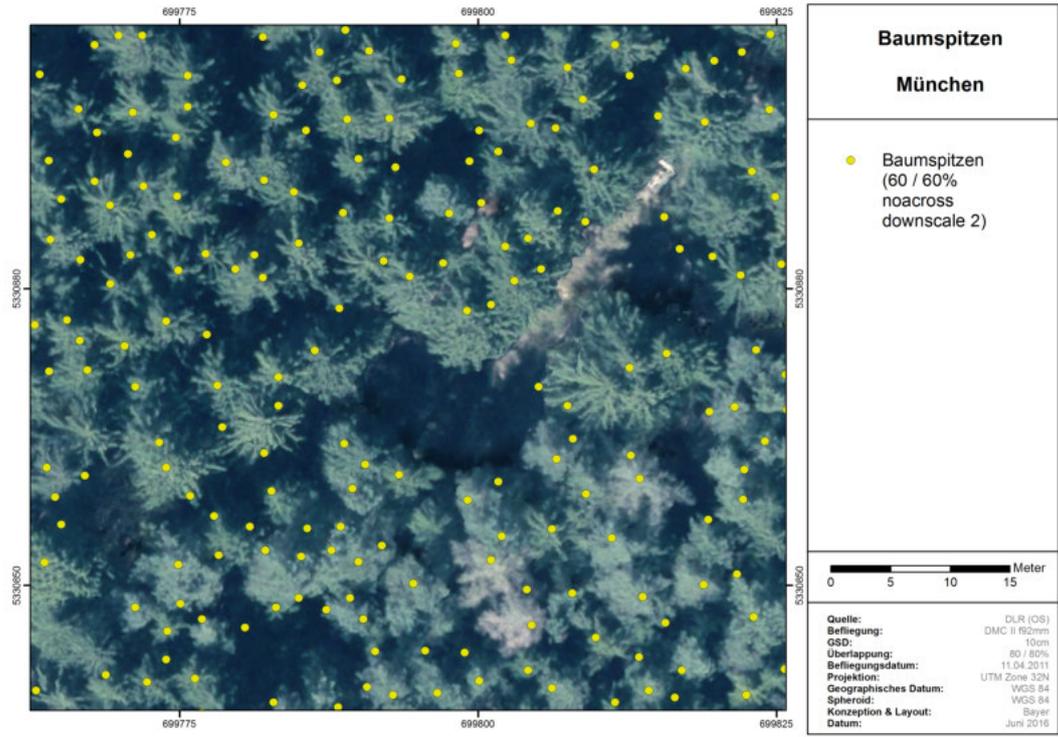


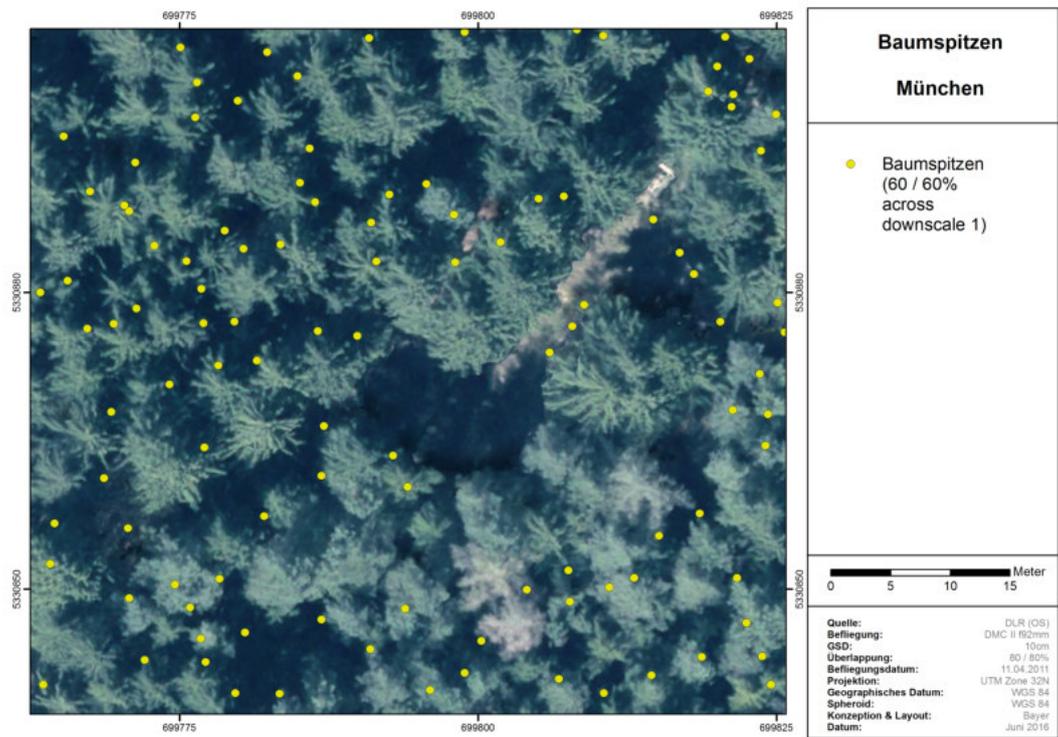
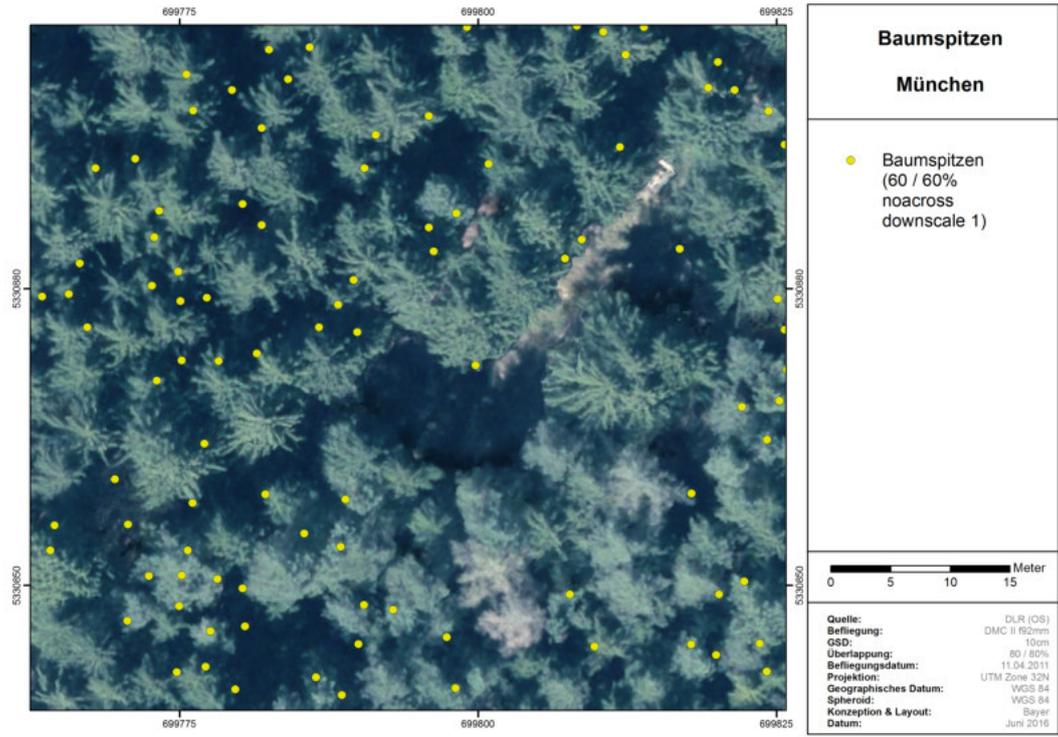


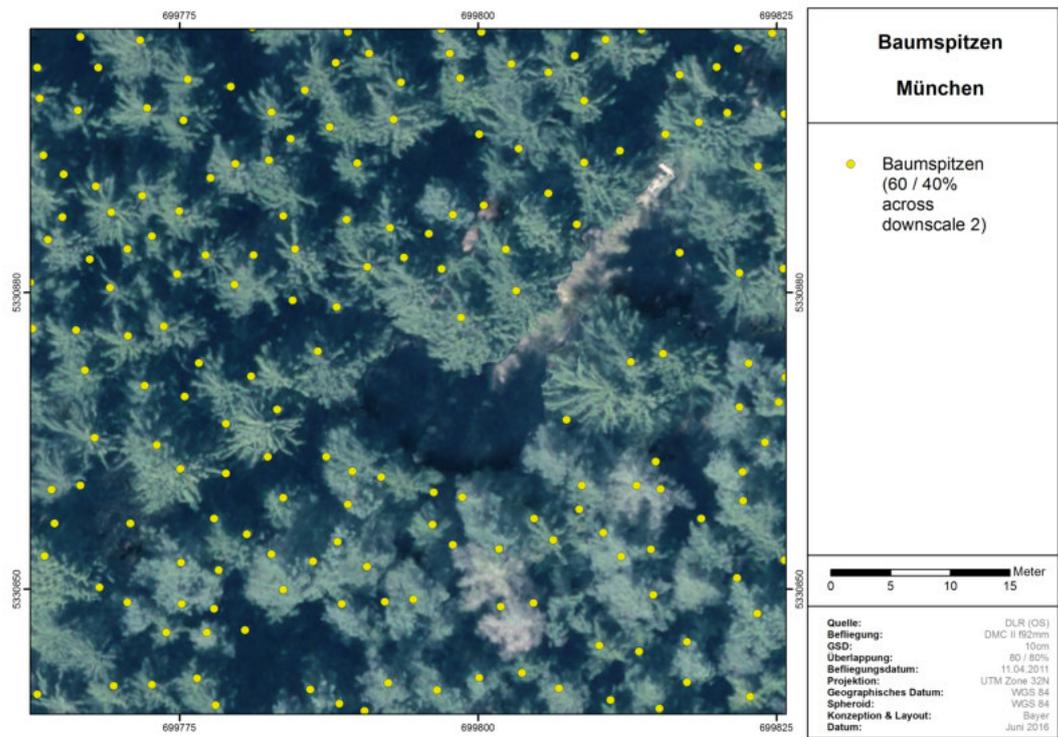
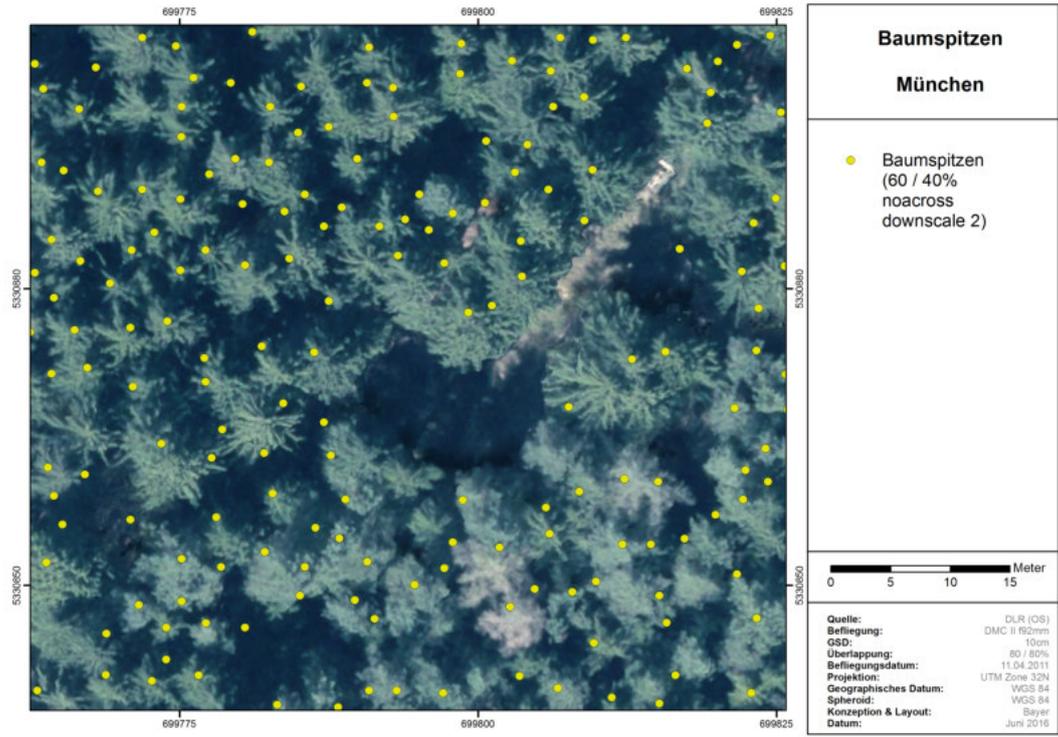


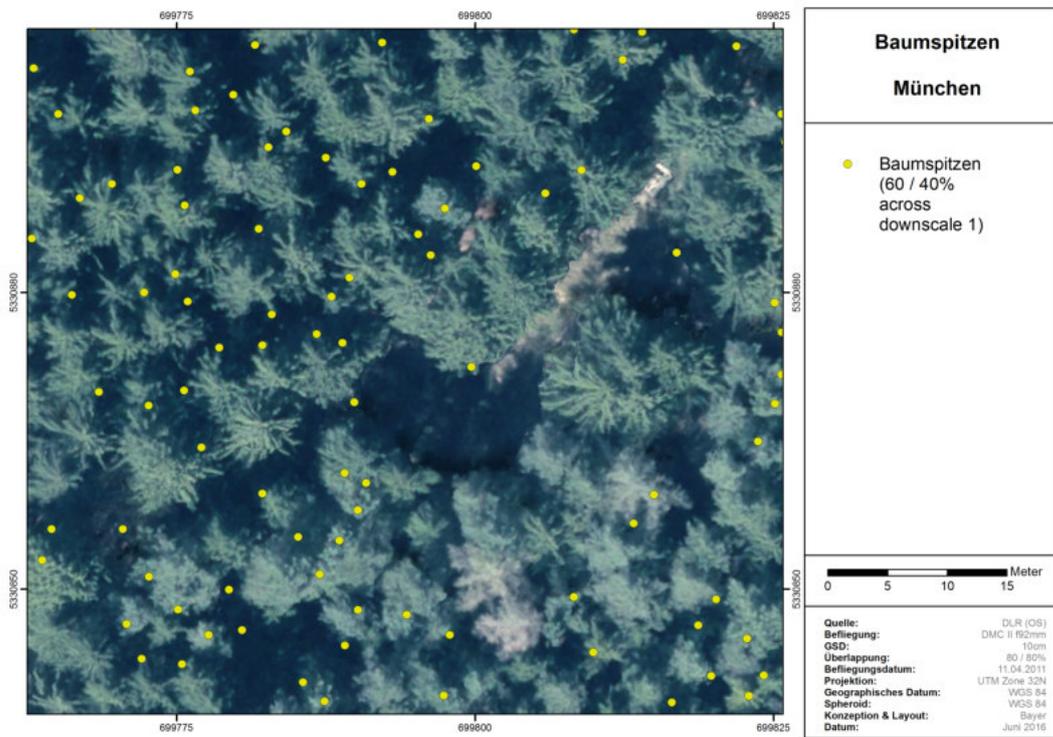
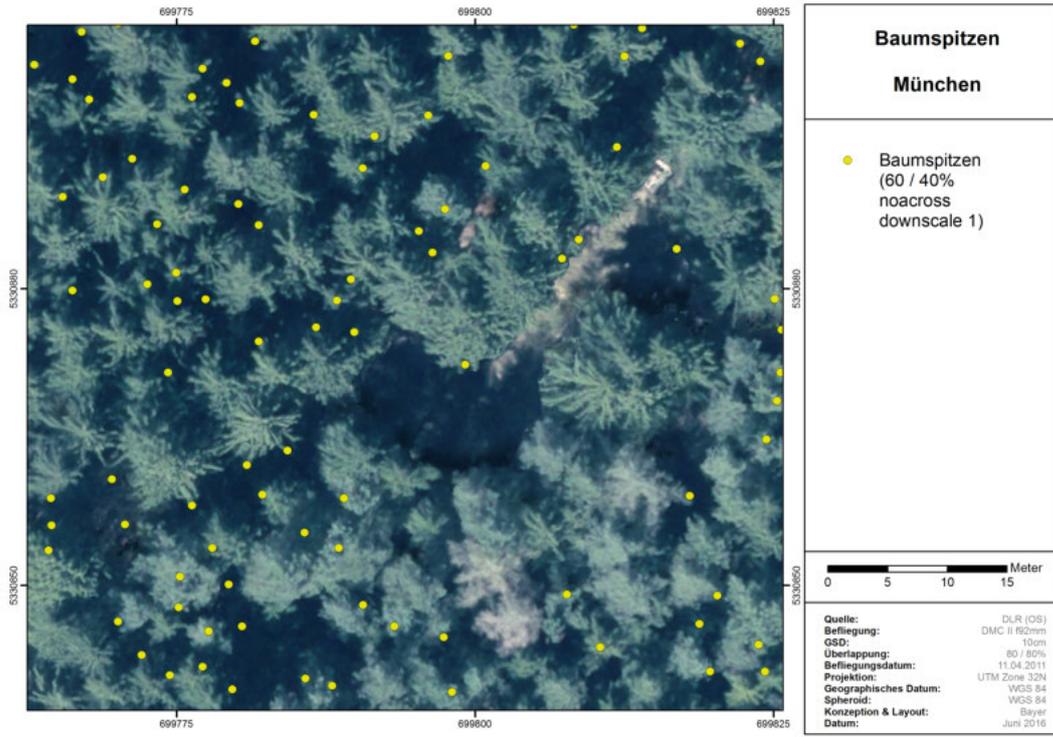




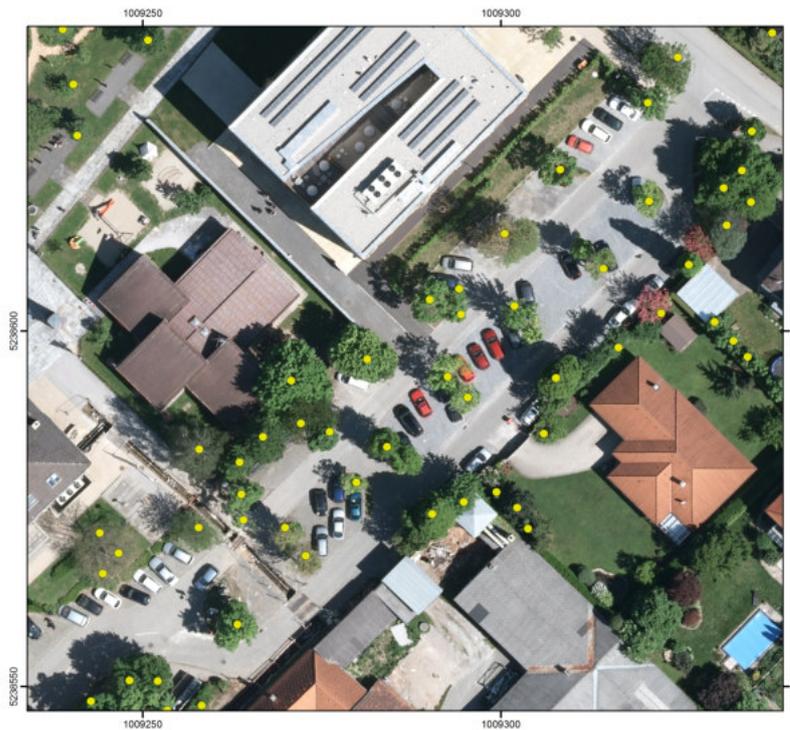








Anhang 6 – Baumspitzen Gleisdorf



**Baumspitzen
Gleisdorf**

- Baumspitzen f210mm
(70 / 70%
noacross
downscale 3)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexcel
Befliegung:	UltraCam Eagle f60mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



**Baumspitzen
Gleisdorf**

- Baumspitzen f210mm
(70 / 70%
noacross
downscale 2)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexcel
Befliegung:	UltraCam Eagle f60mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f210mm
(70 / 70%
across
downscale 2)

Meter
0 5 10 15 20 25

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f210mm
(70 / 70%
noacross
downscale 1)

Meter
0 5 10 15 20 25

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f210mm
(70 / 70%
across
downscale 1)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm
(80 / 70%
noacross
downscale 3)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm (80 / 70% across downscale 3)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm (80 / 70% noacross downscale 2)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm (80 / 70% across downscale 2)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm (80 / 70% noacross downscale 1)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm
(80 / 70%
across
downscale 1)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016

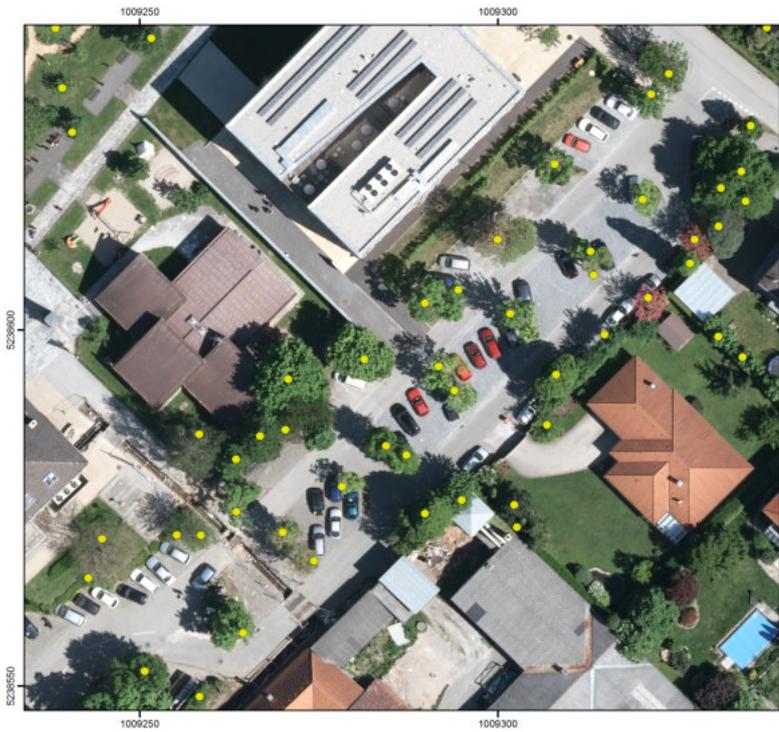


Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm
(60 / 70%
noacross
downscale 3)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm
(60 / 70%
across
downscale 3)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm
(60 / 70%
noacross
downscale 2)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm
(60 / 70%
across
downscale 2)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016

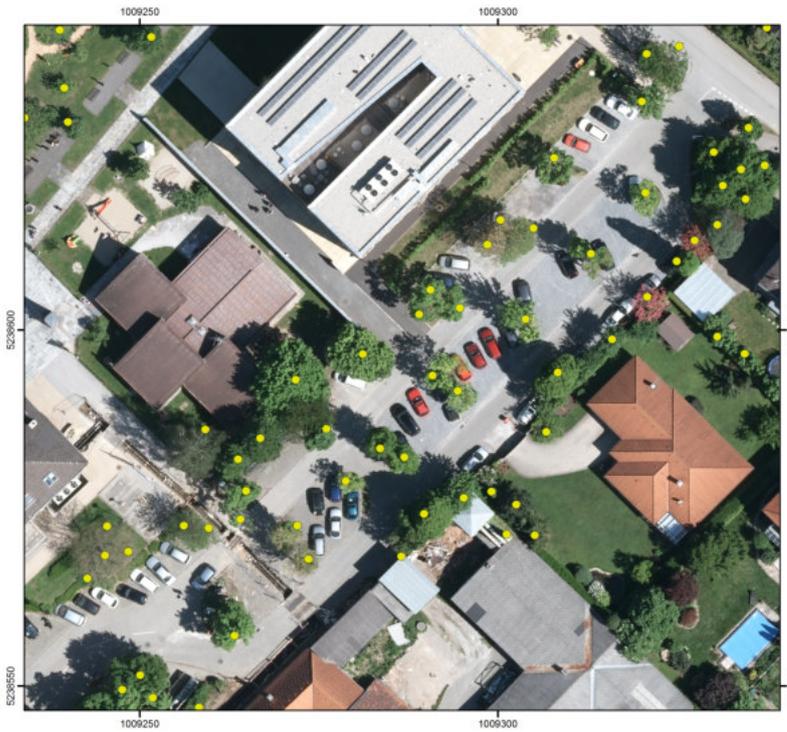


Baumspitzen
Gleisdorf

- Baumspitzen f80mm
(60 / 70%
noacross
downscale 1)

Meter

Quelle:	Microsoft / Vexel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen

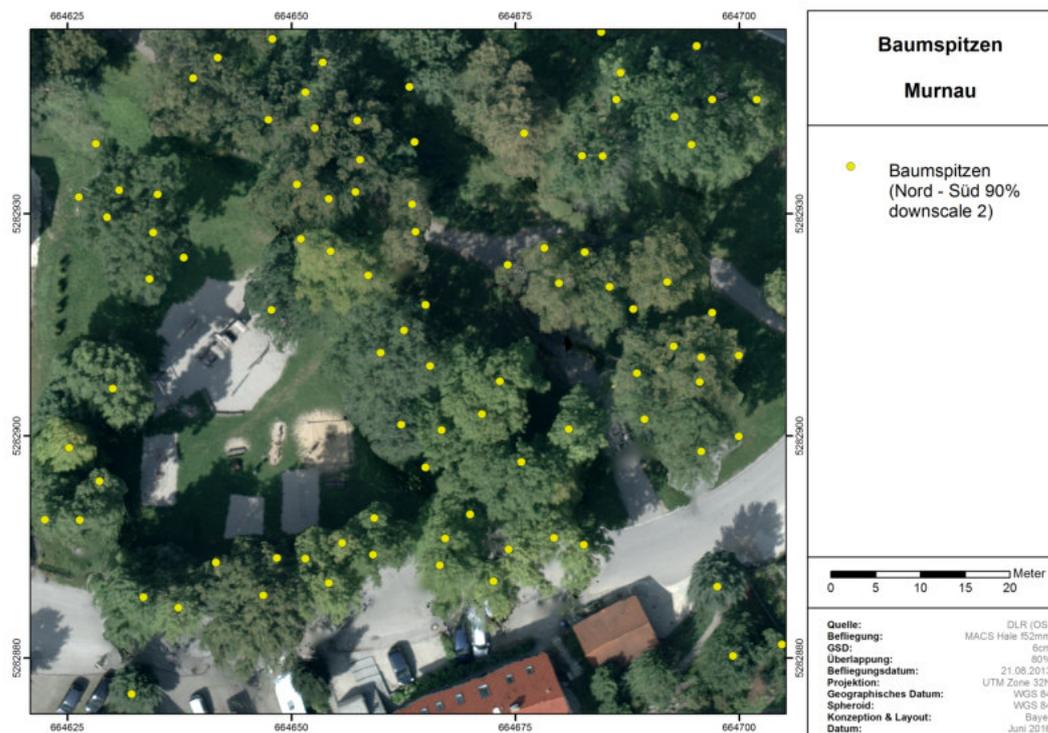
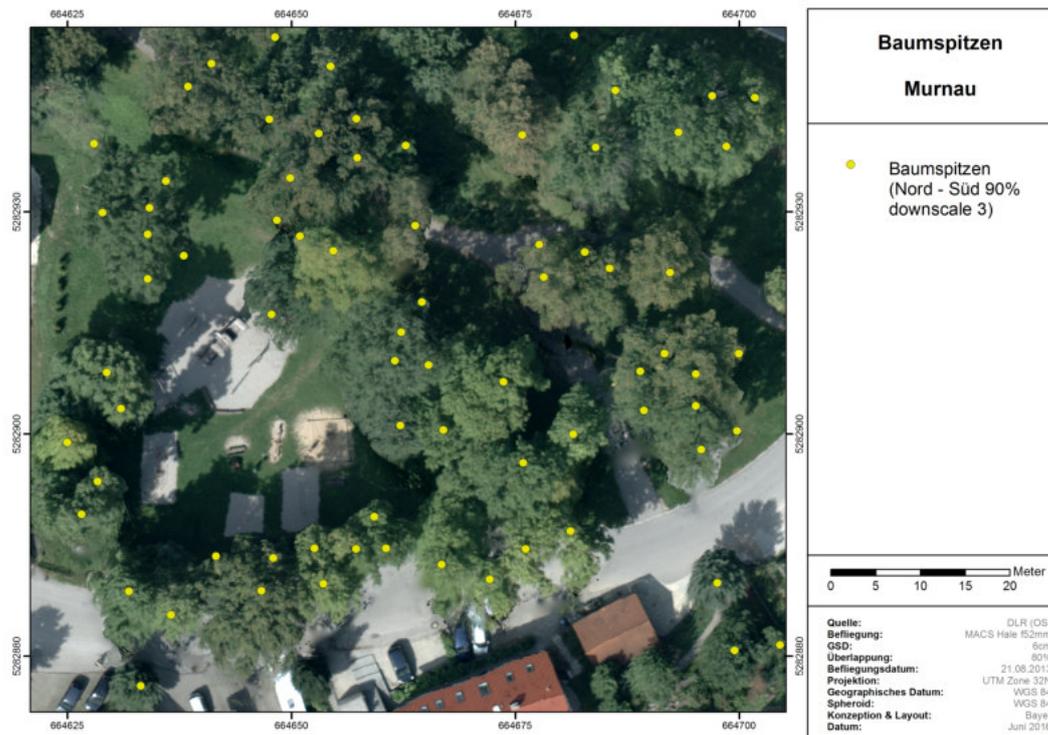
Gleisdorf

● Baumspitzen f80mm
(60 / 70%
across
downscale 1)

0 5 10 15 20 25 Meter

Quelle:	Microsoft / Vexcel
Befliegung:	UltraCam Eagle f80mm
GSD:	5cm
Überlappung:	80 / 70%
Befliegungsdatum:	unbekannt
Projektion:	UTM Zone 33N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016

Anhang 7 – Baumspitzen Murnau





Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 90%
downscale 1)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 80%
downscale 3)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016

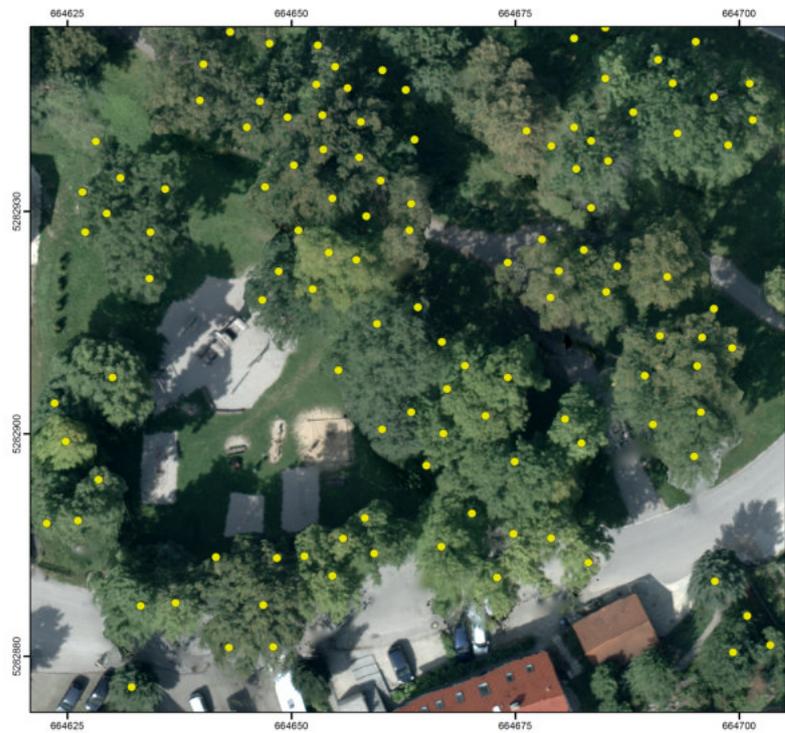


Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 80%
downscale 2)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 80%
downscale 1)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 70%
downscale 3)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 70%
downscale 2)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 70%
downscale 1)

Meter

0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 60%
downscale 3)

Meter

0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 60%
downscale 2)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	60%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Nord - Süd 60%
downscale 1)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	60%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 90%
downscale 3)

Meter

0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale f52mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 90%
downscale 2)

Meter

0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale f52mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 90%
downscale 1)

Meter

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale f52mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 80%
downscale 3)

Meter

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale f52mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 80%
downscale 2)

Meter

0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 80%
downscale 1)

Meter

0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 70%
downscale 3)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale f52mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 70%
downscale 2)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale f52mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Sphäroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 70%
downscale 1)

Meter

0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale f52mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 60%
downscale 3)

Meter

0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale f52mm
GSD:	6cm
Überlappung:	80%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 60%
downscale 2)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	60%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016



Baumspitzen
Murnau

● Baumspitzen
(Ost - West 60%
downscale 1)

Meter
0 5 10 15 20

Quelle:	DLR (DS)
Befliegung:	MACS Hale 152mm
GSD:	6cm
Überlappung:	60%
Befliegungsdatum:	21.08.2013
Projektion:	UTM Zone 32N
Geographisches Datum:	WGS 84
Spheroid:	WGS 84
Konzeption & Layout:	Bayer
Datum:	Juni 2016