

Automatisierte Einzelbaumerfassung auf Basis von hochauflösten TrueOrtho-Mosaiken und photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodellen

STEVEN BAYER¹, MOHSEN MIRI² & TILMAN BUCHER³

Zusammenfassung. Die Forstfernerkundung hat in Deutschland eine lange Tradition. In den letzten 30 Jahren wurden zudem verschiedene Verfahren der automatischen Extraktion von Einzelbäumen aus Fernerkundungsdaten entwickelt und veröffentlicht. Dabei bestand jedoch eine Fokussierung auf Satellitenbilder und Laserdaten. Zudem haben viele Ansätze ihre Tauglichkeit vor allem im Nadelwald unter Beweis gestellt. Die automatische Einzelbaumextraktion von Laubbäumen ist dagegen bis heute eine Herausforderung. Daher stand im Mittelpunkt des entwickelten Verfahrens nicht nur die Extraktion von Nadelbäumen aus Luftbildern und photogrammetrisch erzeugten Oberflächen, sondern auch eine genaue Einzelbaumextraktion von im geschlossenen Bestand stehenden Laubbäumen. Wie das vorgestellte Verfahren zeigt, lassen sich unter der Verwendung von TrueOrtho-Luftbildern und photogrammetrisch erzeugten Oberflächen Einzelbäume mit einer sehr hohen Genauigkeit ableiten. Dies gilt dabei nicht nur für Nadelbäume sondern auch für Laubbäume.

1 Einleitung

Luftbilder sowie deren Auswertung werden in der Forstwirtschaft schon seit vielen Jahrzehnten für die Unterstützung der Forstinventur eingesetzt. Entsprechend lang ist auch die Forschungstradition in der automatisierten Auswertung von Luftbildern. Mit der Verbreitung von digitalen Luftbildern wurden seither vielfältige Ansätze für die Extraktion von Einzelbäumen entwickelt (STRAUB, 2003). Die automatische Extraktion von im Bestand stehenden Einzelbäumen, insbesondere von Laubbäumen, aus digitalen Luftbildern stellt jedoch bis heute, aufgrund der in den Luftbildern auflösungsbedingt hohen Komplexität, eine große Herausforderung dar. Ziel dieses Beitrages ist die Vorstellung eines leicht nachvollziehbaren Verfahrens der Einzelbaumextraktion aus digitalem Luftbildern unter der Verwendung von bekannten Algorithmen. Das entwickelte Verfahren zeigt dabei nicht nur einen Weg auf, wie Einzelbäume im Nadelwald extrahiert werden, sondern ermöglicht auch eine Einzelbaumextraktion von im geschlossenen Bestand stehenden Laubbäumen mit einer hohen Genauigkeit und Vollständigkeit der automatisch extrahierten Baumspitzen und Baumumrisse.

- 1) Steven Bayer, Institut für Internationale Stadtforschung (InUrban), INA gGmbH an der Freien Universität Berlin, Malteser Straße 74-100, 12249 Berlin; E-Mail: steven.bayer@fu-berlin.de
- 2) Mohsen Miri, Beuth Hochschule für Technik Berlin, FB III, Labor für Photogrammetrie, Luxemburger Straße 10, 13353 Berlin; E-Mail: mohsen.miri@fu-berlin.de
- 3) Tilman Bucher, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Fachabteilung Sensorkonzepte und Anwendungen, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin; E-Mail: tilman.bucher@dlr.de

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Ein Großteil der bisher veröffentlichten Verfahren zur automatischen Extraktion von Einzelbäumen stützt sich bei der Analyse auf die Verwendung von Satellitenbildern und Laserdaten. In dem hier vorgestellten Verfahren werden bis auf die Verwendung eines Standard DGM ausschließlich hochauflösende TrueOrtho-Mosaiken (TOM) und mittels Semi-Global Matching (SGM) photogrammetrisch erzeugte Digitale Oberflächenmodelle (DOM) verwendet. Als Testdatensätze standen dafür eine DMC-1 Befliegung vom 2. und 3. Mai 2011 mit einer 80/40 Überlappung sowie eine UltraCamXP Befliegung vom 22. September 2010 mit einer Überlappung von 80/30 zur Verfügung. Die x/y-Auflösung betrug bei beiden Befliegungen jeweils 20 cm. Die z-Auflösung des DOM betrug jeweils 10 cm (siehe Abb. 1). Die Eignung der Daten für die forstwirtschaftlichen Anwendungen wurde in einer vorab durchgeführten Studie bereits nachgewiesen (MIRI et. al. 2013).

Da die Entwicklung des Verfahrens der Einzelbaumextraktion in Zusammenarbeit mit dem Projekt „Der Virtuelle Wald“ (RIF e.V., 2012) stattfand, wurden zwei Untersuchungsgebiete in Nordrhein-Westfalen ausgewählt. Bei beiden Regionen handelt es sich um für Mitteldeutschland typische Mischwaldgebiete. Untersuchungsgebiet eins ist das NSG Habichtswald in der Nähe von Osnabrück. Das Gebiet ist geprägt durch einen hohen Anteil an Buchen-Eichenmischwald sowie Kleinflächen von Erlenwald und Fichtenwald (LANUV NRW, 2012). Untersuchungsgebiet zwei liegt ca. 20 km südwestlich von Siegburg und gehört zur Leudscheid, einem bewaldeten Höhenzug an der Grenze von Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen. Die Leudscheid ist geprägt durch einen hohen Anteil an aufgeforsteten Fichtenwäldern (LANIS 2012). Die gewählten Untersuchungsgebiete bieten durch ihre Bestandsvielfalt eine differenzierte Analysengrundlage.

2.1 Semi-Global Matching (SGM)

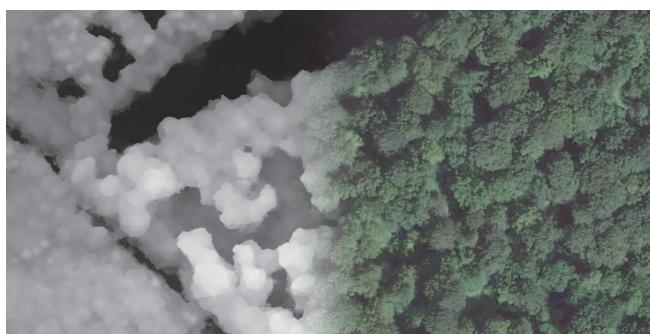


Abb. 1: Mit SGM prozessiertes DOM und TOM

Semi-Global Matching (HIRSCHMÜLLER, 2005) hat sich in der photogrammetrischen Community als führende Methode zur Generierung von Oberflächenmodellen erwiesen (Verleihung des Carl

Pulfrich Preis 2011 an H. Hirschmüller). Aus Luftbildbefliegungen mit idealerweise $\geq 80\%$ Längsüberlappung lassen sich aus Standard-Luftbilddaten qualitativ hochwertige pixelscharfe und sehr dichte digitale Oberflächenmodelle generieren. Basierend auf diesen werden TrueOrthobild-Mosaiken abgeleitet, die bei hohen Überlappungen auch im Wald nur geringe Sichtschatten aufweisen (siehe Abb. 1).

2.2 Digitales Geländemodell (DGM)

Zur Berechnung des normalisierten Oberflächenmodells (nDOM) wurde ein standard Digitales Geländemodell (DGM 1) mit einer Auflösung von einem Meter von Geobasis NRW verwendet. Auf die direkte Ableitung eines DGM aus dem DOM (MAYER, 2004) wurde aus Gründen der Nachvollziehbarkeit verzichtet. Für die Einzelbaumextraktion ist ein nDOM nicht zwingend notwendig. Dies erleichtert aber die Klassifikation und ist für die Ableitung von Baumhöhen notwendig.

2.3 Kontrolldaten

Für die Berechnung der Genauigkeiten und die Bestimmung der Kontrollbäume wurden im Gebiet des Habichtswaldes mit dem Riegl Laser Scanner LMS Z620 exemplarische Waldgebiete terrestrisch mit lokaler Genauigkeit unter 6 mm vermessen. Die globale Genauigkeit der so erhobenen Kontrollpunkte liegt bei unter 5 mm bezogen auf geodätische Festpunkte. Im Anschluss wurden mit der Software PHIDIAS in Microstation die Kontrollbäume mit der Genauigkeit von ca. 1 cm bestimmt. Dabei wurden die Bäume erhoben, die sowohl in der terrestrischen Punktwolke als auch in dem dazu gehörigen Foto sichtbar waren. Im Zuge der Kontrollbaumbestimmung wurden somit auch sehr kleine Bäume erhoben, um auch Aussagen über den Unterbau treffen zu können. Für die Bestimmung der Vollständigkeit und Korrektheit wurde im Laubwald aber nur auf Bäume mit einem Durchmesser über 20 cm zurückgegriffen. Im Nadelwald wurden nur Bäume mit einem Durchmesser von mindestens 15 cm verwendet. Im zweiten Waldgebiet wurden im Nadelwald zusätzlich weitere Kontrollbäume visuell aus dem Luftbild bestimmt, um genauere Aussagen über die Vollständigkeit und Korrektheit der automatisch extrahierten Bäume treffen zu können. Insgesamt wurden im Nadelwald ca. 500 Kontrollbäume erhoben.

3 Methoden

Die ersten Methoden der automatischen Extraktion von Einzelbäumen aus Luftbildern wurden ab Mitte der 1980er Jahre entwickelt. Diese Ansätze identifizierten die Einzelbäume mit Hilfe der Detektion von lokalen Helligkeits- oder Intensitätsmaxima im Luftbild (vgl. HAENEL et. al., 1987). Mit zunehmender Bildauflösung gewann neben der Radiometrie auch die Geometrie eine große Bedeutung bei der Erkennung von Einzelbäumen (vgl. FOURNIER et. al., 1995). Bedingt durch die Entwicklung des flugzeuggetragenen Laserscanners und die Ableitung von direkt gemessenen Oberflächenmodellen wurden in der jüngeren Vergangenheit verstärkt Ansätze zur Einzelbaumextraktion aus DOM publiziert (vgl. HYYPÄ et.al., 2001; KAARTINEN & HYYPÄ, 2008).

Der in Kooperation mit dem DLR, Abteilung Sensorenkonzepte und Anwendungen in Berlin Adlershof entwickelte Ansatz verwendet neben den radiometrischen Informationen des TOM auch die geometrischen Informationen des DOM für die Extraktion von im Bestand stehenden Einzelbäumen. Dafür wurde ein mehrstufiges Verfahren entwickelt, welches für Nadel- und Laubwaldbestände neben der Bestimmung der Baumspitzen auch eine Segmentierung der Baumumringe ermöglicht (siehe Abb. 2). Grundlage für alle eingesetzten Verfahren ist, aufgrund der Morphologie der Bäume, die Erstellung einer Laubwald- und einer Nadelwaldklasse zur differenzierten Betrachtung.

Für die nachfolgend beschriebenen Verfahren wurden die kommerziellen Softwareprodukte ArcGIS 10.1 für die GIS-Analysen und eCognition 8 für die Segmentierung und Klassifizierung verwendet.

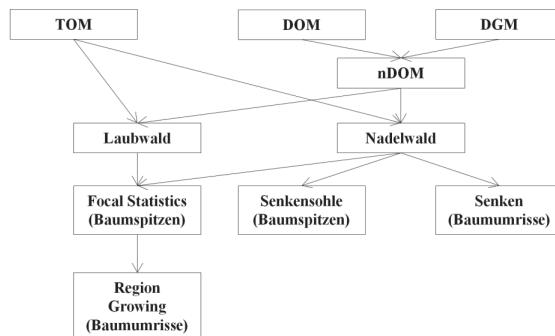


Abb. 2: Verfahren der Einzelbaumextraktion

3.1 Focal Statistics

Mit Hilfe der sogenannten „Focal Statistics“ (ESRI, 2012) wird eine Nachbarschaftsoperation durchgeführt, bei welcher der Wert für eine Ausgabezelle eine Funktion aller Werte der benachbarten Eingabezellen ist. Für die Extraktion der Baumspitzen wird dabei mit Hilfe einer Maximalfunktion in einem vorgegeben Suchraum nach „lokalen Maxima“ im Oberflächenmodell

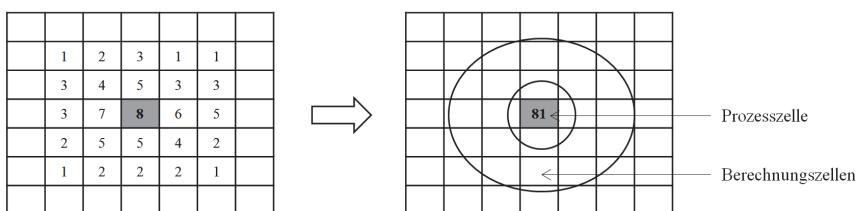


Abb. 3: Focal Statistics Berechnung (Quelle: Abbildung verändert nach Esri, 2012)

gesucht. Anschließend wird die Summe aller Werte in der Nachbarschaft des lokalen Maximums aufsummiert und ausgegeben. Dabei wird mit einer Kreisringform, welche einen kleinen Kreis innerhalb eines größeren Kreises darstellt, gearbeitet. Bei dieser Form der Auswertung werden nur die Zellen zwischen dem inneren und äußeren Kreis in die Berechnung einbezogen (ESRI, 2012), wodurch die Größe der Bäume über das Verhältnis von innerem und äußerem Ring berücksichtigt werden kann (siehe Abb. 3). Durch die Verschneidung von Oberflächenmodell mit den Ergebnissen der Focal Statistics Analyse können die Baumspitzen sowohl im Nadelwald als auch im Laubwald mit einer hohen Genauigkeit und Vollständigkeit bestimmt werden.

3.2 Region Growing

Zur Bestimmung der Baumumrisse wird das Bildsegmentierungsverfahren Region Growing verwendet (SCHIEWE, 2002). Die mit Hilfe der Focal Statistics Analyse erstellten Baumspitzen werden dabei als initiale Zellen, d.h. als Anfangsregionen für die Segmentierung verwendet. Durch die Berücksichtigung der spektralen und geometrischen Eigenschaften der zu detektierenden Bäume sowie durch die Beachtung von Nachbarschaftsverhältnissen innerhalb der Baumbestände, aber auch durch die Annahme von statistischen Größenverhältnissen für die Laub- und Nadelbäume, lassen sich mit einem Region Growing Verfahren die Baumumrisse für beide Waldtypen sehr genau bestimmen.

3.3 Lokales Maximum und Senken

Parallel zum Verfahren der Detektion von Baumspitzen und Baumumrisse durch den Einsatz einer Focal Statistics Analyse und eines Region Growing Bildsegmentierungsverfahrens wurde ein zweiter Ansatz entwickelt, mit welchem im Rahmen einer GIS-Analyse sowie durch den Einsatz von hydrologischen Tools Baumspitzen und Baumumrisse ebenfalls gut bestimmt werden können (siehe Abb. 4). Dazu ist zu Beginn der Analyse die Invertierung des

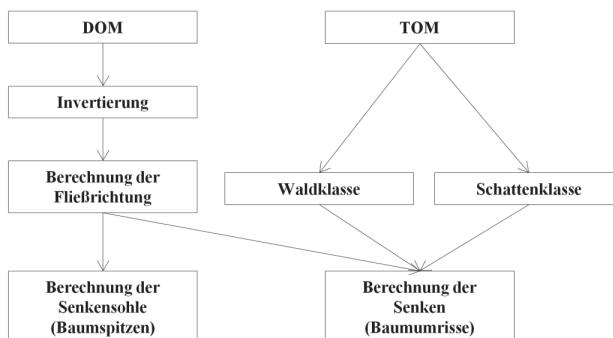


Abb. 4: Berechnung der Lokalen Maxima und Senken aus dem Oberflächenmodell

Oberflächenmodelles notwendig. Anschließend wird für das invertierte DOM die Fließrichtung von jeder Zelle zur nächsten Nachbarzelle mit der steilsten Neigung berechnet. Auf Basis der berechneten Fließrichtung wird das invertierte DOM im Modell „geflutet“ und die Wassereinzugsgebiete (im folgenden Senken genannt) berechnet. Die Senken werden mit Hilfe

der Berechnung der Wasserscheide bestimmt. Durch die Verschneidung der Senken mit einem vorab klassifizierten Wald- und Schattenlayer können so die Baumumrisse extrahiert werden. Neben der Berechnung der Senken werden auch deren Sohlen bestimmt, welche als lokale Maxima des Oberflächenmodells die Baumspitzen gut abbilden.

4 Ergebnisse

Mit Hilfe der entwickelten Verfahren können sowohl Nadel- als auch Laubbäume, welche in geschlossenen Beständen stehen mit einer sehr hohen Genauigkeit und Vollständigkeit extrahiert werden. Um die Ergebnisse quantifizieren zu können, wurde nach STRAUB (2003) die Vollständigkeit und Korrektheit der Ergebnisse berechnet.

Die Vollständigkeit (V) der Ergebnisse wird dabei wie folgt berechnet:

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

Die Korrektheit (K) der Ergebnisse wird dabei wie folgt berechnet:

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

4.1 Laubwald

Die automatische Einzelbaumextraktion von im geschlossenen Bestand stehenden Laubbäumen ist bis heute eine wichtige Aufgabe der Fernerkundung. Aus diesem Grund war es das Hauptziel der Arbeit ein Verfahren zu entwickeln, mit dem auch die Baumspitzen und Baumumringe von Laubbäumen mit einer hohen Vollständigkeit und Genauigkeit automatisch erhoben werden können. Für die Berechnung der Vollständigkeit und Genauigkeit wurden 89 terrestrisch eingemessene Laubbäume mit einem Durchmesser von mindestens 20 cm verwendet. Von diesen 89 Kontrollbäumen konnten für 76 die Baumspitzen richtig extrahiert werden, was einer Vollständigkeit von 87,25 % entspricht. Dabei wurde aufgrund der Morphologie der Baumkrone und des Wachstumsverhaltens der Laubbäume ein Maximalabstand von fünf Metern zwischen Kontrollbaum und automatisch erhobener Baumspitze für die Bestimmung der Vollständigkeit verwendet. Bei den mit Hilfe der Focal Statistics Analyse automatisch bestimmten Baumspitzen konnten nur fünf als falsch identifiziert werden, was einer Korrektheit von 94,68 % entspricht. Wie die Ergebnisse zeigen, lassen sich mit Hilfe der Focal Statistics Analyse gute Ergebnisse bei der automatischen Extraktion der Baumspitzen von Laubbäumen erzielen. Nicht einzeln detektierbar sind lediglich sehr dicht stehende Bäume gleicher Größe, die überwiegend als Einzelbaum mit nur einer Baumspitze detektiert werden, im Luftbild aber auch visuell nicht zu unterscheiden sind. Vereinzelt wurden auch einige im TOM visuell offensichtlich richtig extrahierte Baumspitzen als nicht extrahierte Baumspitzen ausgegeben. Die Gründe hierfür sind mit dem teilweise sehr schrägen Stammwachstum einiger Laubbäume sowie durch die eventuelle Aufzweigung der Krone eines Baumes zu erklären. In diesen Fällen kann die Baumkrone

mehrere nicht eindeutig bestimmmbare Spitzen enthalten. Dadurch kann der Abstand zwischen der auf Brusthöhe gemessenen Kontrollposition des Baumes und der im DOM extrahierten Baumspitzen mehr als fünf Meter betragen. Bei einer rein visuellen Beurteilung von TOM und DOM wären diese Baumspitzen als richtig extrahiert eingeordnet worden, was dementsprechend auch die Vollständigkeit erhöht hätte.

Da die Baumumringe aus den Baumspitzen berechnet wurden, beträgt auch hier die Vollständigkeit 87,25 %. Für die Beurteilung der Korrektheit wurden die automatisch erstellten Baumsegmente visuell in richtig und falsch extrahiert eingeteilt. Die so ermittelte Korrektheit der Baumumrisse liegt bei 93,68 %. Durch die Begrenzung des Segmentwachstums auf ein Größenmaximum und festgelegte Spektralbereiche liegt die Korrektheit der Baumumrisse über der der extrahierten Baumspitzen, weil auch die schräg wachsenden Bäume und die sich teilenden Kronen korrekt extrahiert werden (siehe Abb. 5).

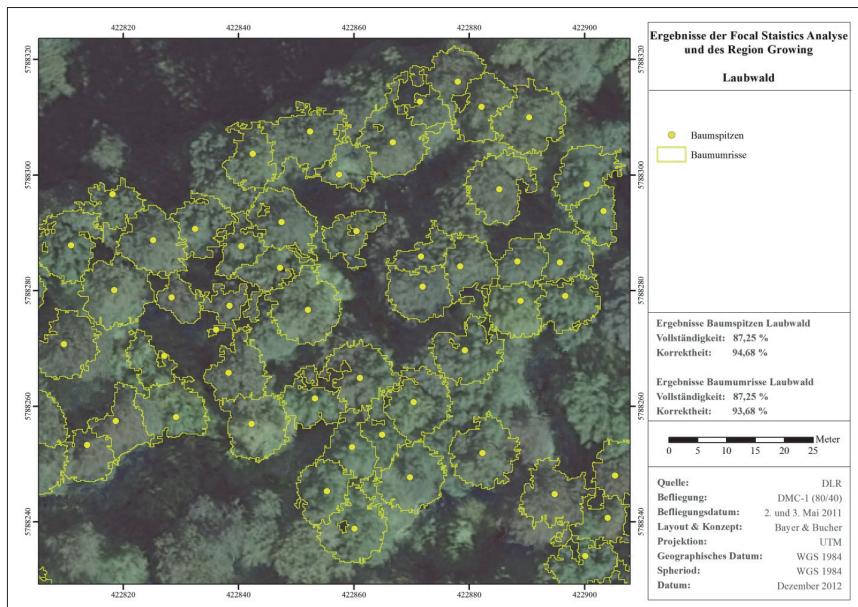


Abb. 5: Ergebnisse der automatischen Einzelbaumextraktion im Laubwald

4.2 Nadelwald

Obwohl für den Nadelwald mit der Focal Statistics Analyse und dem Region Growing Verfahren geringfügig höhere Genauigkeiten erreicht werden, werden im folgenden Kapitel trotzdem die Ergebnisse der Senken- und Senkensohlenanalyse vorgestellt, um auch deren Potential aufzeigen zu können.

Von den Kontrollbäumen im Nadelwald wurden bei einem Maximalabstand von 2,5 m zwischen Kontrollpunkt und extrahiertem Punkt 91,15 % der Baumspitzen vollständig bestimmt. 86,3 %

der ausgegebenen Baumspitzen werden bei dieser Analyse korrekt bestimmt. Im Vergleich zur Focal Statistics Analyse zeigt sich bei der Bestimmung der Baumspitze mit der Berechnung der Senkensohle, dass mehr lokale Maxima automatisch extrahiert werden. Auch ist die Lagegenauigkeit der mit der Focal Statistics Analyse berechneten Baumspitzen minimal genauer.

Werden die Baumumrisse mit Hilfe der Senken aus dem Oberflächenmodell bestimmt, liegt die Vollständigkeit bei über 99 %, d.h. es werden fast alle Nadelbäume automatisch extrahiert. Da die Extraktion der Baumumrisse eine für sich eigenständige GIS-Analyse ist und diese nicht mit Hilfe der Baumspitzen berechnet werden, ist eine annähernd hundertprozentige Vollständigkeit erreichbar. Die Korrektheit der Analyse liegt bei 91,74 % (siehe Abb. 6).

Insgesamt ist bei diesen beiden Analyseverfahren eine deutliche Abhängigkeit von der Auflösung des Oberflächenmodells zu beobachten. Bei der Originalauflösung von 20 cm sind eine leichte Übersegmentierung und die Detektion von kleineren Nebenmaxima zu beobachten. Bei den vorliegenden TOM und DOM wurden bei einer Auflösung von 50 cm die genauesten Ergebnisse hinsichtlich Vollständigkeit und Korrektheit erzielt.

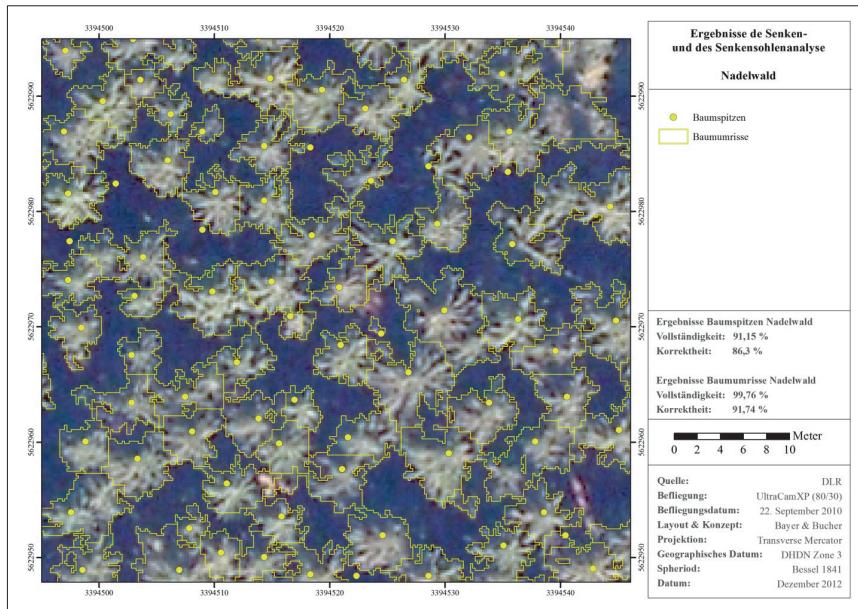


Abb. 6: Ergebnisse der automatischen Einzelbaumextraktion im Nadelwald

5 Konklusion

Wie die Ergebnisse der beiden Verfahren zeigen, können mit Hilfe von photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodellen sehr genau die Baumspitzen sowohl im Nadelwald, als auch

im Laubwald abgeleitet werden. Für die Detektion der Baumstandorte kann dabei auf die Verwendung der spektralen Bildinformationen verzichtet werden, da diese keinen Mehrwert für die Extraktion der Baumspitzen darstellen.

Die Bildinformationen lassen sich jedoch für die Extraktion der Baumumrisse und eine mögliche Klassifikation der Baumarten sehr gut nutzen. Mit den beschriebenen Verfahren werden auch bei der automatischen Extraktion der Baumumrisse sehr gute Ergebnisse hinsichtlich Vollständigkeit und Korrektheit erzielt. Zusammenfassend lässt sich damit feststellen, dass eine Einzelbaumextraktion aus photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodellen und hochauflösenden TrueOrtho-Mosaiken in Nadel- und Laubwald möglich ist. Mit Hilfe der automatisch extrahierten Daten können so wichtige Informationen, wie beispielsweise Baumhöhe, Kronenfläche oder Baumart, für die Forstinventur abgeleitet werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen werden sich die zukünftigen Arbeiten mit der Verbesserung der automatischen Extraktion im Laubwald beschäftigen. Hierbei wird ein Schwerpunkt auf der Einzelbaumextraktion in jüngeren und homogenen Baumbeständen liegen. Zusätzlich ist eine Erweiterung der terrestrisch erhobenen Kontrolldaten geplant, um noch genauere Aussagen über Vollständigkeit und Korrektheit treffen zu können.

6 Danksagung

Die Fernerkundungsdaten wurden für das Projekt „Der Virtuelle Wald“ aufgenommen und prozessiert, welches von der Europäischen Union (European Regional Development Fund - EFRE) und dem Land Nordrhein-Westfalen teilfinanziert wurde. Ein großer Dank gilt an dieser Stelle den Projektbeteiligten des Institutes für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) der RWTH Aachen und des RIF e.V. für die Bereitstellung der Daten und die organisatorische sowie fachliche Unterstützung. Ein Dank geht auch an Geobasis NRW für die kostenfreie Bereitstellung des Digitalen Geländemodells. Ein besonderer Dank geht auch an ZeDe3D Ltd. für die personelle und technische Unterstützung während der Erhebung der Kontrolldaten.

7 Literaturverzeichnis

- ESRI, 2012: ArcGIS Resource Center: Focal Statistics. *Online in Internet:* <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z000000qs000000>. [Stand: 2012.12-18]
- FOURNIER, A. R., EDWARDS, G. & ELDRIGE, N. R., 1995: A Catalogue of Potential Spatial Descriptors for High Spatial Resolution Digital Images of Individual Crowns. Canadian Journal of Remote Sensing, 3 (21), S. 285-298.
- HAENEL, S., TRÄNKNER, H. & ECKSTEIN, W., 1987: Automatische Baumkronenentdeckung in Luftbildern - Der Weg durch den Engpaß. Oberpfaffenhofen, S. 53-66.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. – Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 20-26 June 2005, 2, S.807-814.
- HYYPPÄ, J., SCHARDT, M., HAGGRÉN, H., KOCH, B., LOHR, U., SCHERRER, H., PAANANEN, R., LUUKKONEN, H., ZIEGLER, M., HYYPPÄ, H., PYYSALO, U., FRIEDLÄNDER, H., UUTTERA, J., WAGNER, S., INKINEN, M., WIMMER, A., KUKKO, A., AHOKAS, E.,

- KARJALAINEN, 2001: HIGH-SCAN: The first European-wide Attempt to Derive Single-Tree information from Laserscanner Data. *The Photogrammetric Journal of Finnland*, 2 (17), pp. 58-68.
- Kaartinen, H., Hyppä, J. 2008: Tree Extraction. EuroSDR / ISPRS Project, Commission II "Tree Extraction". Final Report.
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV NRW), 2012: Naturschutzgebiet Habichtswald (ST-092). *Online in Internet: http://www.naturschutzinformationenrw.de/nsg/de/fachinfo/gebiete/gesamt/ST_092.* [Stand: 2012.12-18]
- LANDSCHAFTSINFORMATIONSSYSTEM DER NATURSCHUTZVERWALDUNG RHEINLAND-PFALZ (LANIS) 2012; Leuscheid. *Online in Internet: http://map1.naturschutz.rlp.de/landschaften_rlp/landschaftsraum.php?lr_nr=330.00.* [Stand: 2012.12-18]
- MAYER, S. 2004: Automatisierte Objekterkennung zur Interpretation hochauflösender Bilddaten in der Erdfernerkundung. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II.
- MIRI, M., BAYER, S., BUCHER, T., 2013: Evaluation of high resolution digital surface models for single tree extraction approaches in mixed forests. DGPF Tagungsband 22 /2013 (in Veröffentlichung).
- RIF E.V. 2012: Der Virtuelle Wald. *Online in Internet: http://www.virtueller-wald.de/de/der_virtuelle_wald.* [Stand: 2012.12-18]
- SCHIEWE, J., 2002: Segmentation of High-Resolution Remotely Sensed Data-Concepts, Applications and Problems. Proceedings of Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications.
- STRAUB, B.-M., 2003: Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 249.