

# Methode für die automatische Verifizierung der Ergebnisse der Einzelbaumdetektion, Baumartenklassifizierung und Baumkronengrenzen aus LiDAR-Daten

Sead Mustafic<sup>1</sup>, Mathias Schardt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Geodäsie, Technische Universität Graz · seadmustafic@gmail.com

**Zusammenfassung:** Auf Basis von LiDAR-Daten ist es möglich, automatisch einzelne Bäume zu detektieren und zu segmentieren. Die resultierenden Produkte, die mithilfe des automatischen Prozesses gewonnen wurden, werden anschließend auf die Güte der Einzelbaumdetektion (evtl. Baumartentrennung) und Baumkronensegmentierung überprüft. Die der Verifizierung zugrunde liegende Methode wird in dieser Studie vorgestellt. Die Methode setzt das Vorhandensein von Referenzdaten voraus, anhand welcher die Verifizierung durchgeführt wird. Mehrere Tests haben gezeigt, dass die Verifizierung zum einen mit einem hohen Automatisierungsgrad durchgeführt werden kann und zum anderen robust gegenüber unterschiedlichen Baumarten bzw. Kronenformen ist.

**Schlüsselwörter:** Verifizierung, Waldinventur, Einzelbaumdetektion, Baumsegmentierung, Baumart

*Abstract:* Based on LiDAR-data it is possible to detect and to segment automatically individual (single) trees. The quality of the detection (poss. tree species differentiation) and segmentation will be validated for the resulting products, which has been generated through an automatical process. In this study a robust verification method will be presented, which considers the quality of single tree detection, tree species differentiation as well as the tree crown boundaries. The method requires the availability of reference data. The suitability of the method for the automatic verification of the results has already been verified through several tests.

**Keywords:** Verification, forest inventory, single tree detection, tree crown segmentation, tree species

## 1 Motivation und Stand der Technik

Auf Basis von LiDAR-Daten (Light Detection And Ranging) ist es möglich, automatisch einzelne Bäume zu detektieren und zu segmentieren. In der Forstwirtschaft bilden diese Produkte eine wichtige Datengrundlage für die Ableitung verschiedenster forstlicher Parameter, wie beispielsweise der Baumhöhe, Baumart, dem Stammdurchmesser, der Biomasse sowie dem Kronenvolumen (BUDDENBAUM 2010). Die Komplexität der Verfahren zur automatischen Baumdetektion bzw. der Baumkronensegmentierung wird durch die große Anzahl an Veröffentlichungen sowie durch die Verschiedenartigkeit der dafür entwickelten methodischen Ansätze belegt. Die meisten Ansätze verwenden als Datengrundlage ein sogenanntes „normalized Digital Surface Model“ (nDSM) (HYYPÄ et al. 2001, REITBERGER 2010, MUSTAFIC et al. 2014), andere Verfahren verwenden die georeferenzierte Punktwolke (MORS-DORF et al. 2003, REITBERGER 2010) als Basis. Welcher Ansatz gewählt wird, hängt in erste Linie von den zur Verfügung stehenden Daten ab. Neben der Wahl des Ansatzes spielen für die Qualität der Auswertergebnisse die Punktgenauigkeit, die Punktdichte, die Qualität der Datenvorverarbeitung sowie der im Anwendungsgebiet auftretende Waldtyp eine wichtige Rolle (VAUHKONEN et al. 2012, EYSN et al. 2015). Allein durch die Variation der angeführten

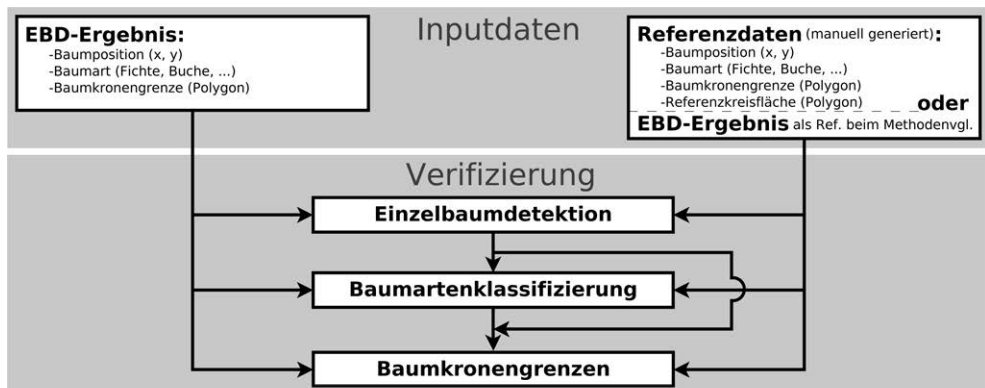
Einflussfaktoren können mehrere verschiedene Ergebnisse in ein und demselben Waldgebiet erzielt werden. Zum Vergleich (Benchmarking) der verschiedenen methodischen Ansätze bzw. der unterschiedlichen Parametereinstellungen (MUSTAFIC 2015) ist die Verfügbarkeit von robusten Validierungsverfahren eine wesentliche Voraussetzung. ZHEN et al. (2014), DALPONTE et al. (2015), EYSN et al. (2015) und MUSTAFIC (2015) haben verschiedene Verfahren für die automatische Validierung der Ergebnisse der Einzelbaumdetektion (EBD) vorgestellt, die entweder nur einen Teil der Verifikation (EBD oder Baumkronensegmentierung) berücksichtigen oder vor allem, wenn es um die Baumkronensegmente geht, nicht ausreichend detailliert vorgehen.

Ziel der vorgestellten Untersuchung ist daher die Entwicklung einer Validierungsmethode, die sowohl die Güte der Einzelbaumdetektion als auch die der Baumkronensegmentierung und Baumartentrennbarkeit berücksichtigt. Diese Aufgabe mag vielleicht einfach klingen, sie stellt aber vor allem aufgrund der Heterogenität von Waldoberflächenmodellen eine große Herausforderung dar.

## 2 Methode: Inputdaten und Funktionsweise

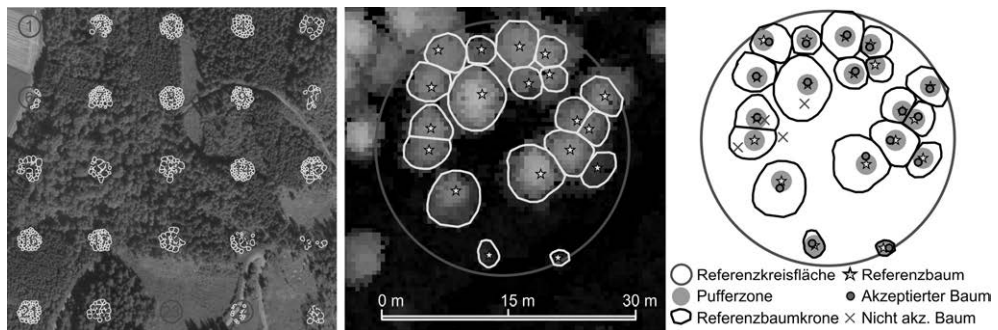
Die Methode setzt das Vorhandensein von Referenzdaten (Abb. 1 rechts oben) voraus, anhand welcher die Verifizierung durchgeführt wird. Diese Daten beinhalten die Baumpositionen als Punkt und die Baumkronenabgrenzungen als Polygon. Die Information über die Baumart kann als zusätzliches Attribut zu der Baumposition angefügt werden. Um den Arbeitsaufwand bei der manuellen Generierung von Referenzdaten in Grenzen zu halten, kann das Untersuchungsgebiet in gleichmäßig verteilte Kreisflächen (Abb. 2), die mehrere Baumkronen beinhalten, unterteilt werden. Möchte man aber nur einen **relativen** Vergleich zwischen verschiedenen EBD-Methoden ermitteln, könnte das voll automatisiert, also ohne manuell generierten Referenzdaten durchgeführt werden. In diesem Fall wird als Referenzdateninput das Ergebnis einer EBD-Methode gewählt.

Die Vorgehensweise der Verifizierungsmethode ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt und lässt sich in drei wesentliche Verifizierungsschritte unterteilen:



**Abb. 1:** Ablaufdiagramm bei der Verifizierung

Im ersten Schritt wird anhand der Referenzdaten und vorgegebenen Regeln definiert, wann ein Baum „richtig detektiert“ worden ist. Für eine richtige Detektion muss die automatisch detektierte Baumspitze **gleichzeitig** drei bzw. vier wesentliche Kriterien erfüllen: (1) sie muss sich innerhalb des Kronenreferenzpolygons befinden, (2) innerhalb einer vorgegebenen horizontalen Pufferzone um die Spitze des Referenzbaumes liegen (falls mehrere Baumspitzen innerhalb des Kronenreferenzpolygons vorkommen), (3) die Höhe des Baumes innerhalb der vorgegebenen Höhenabweichung in Bezug auf die Referenzhöhe liegen (4) und, wenn zwei oder mehrere Baumspitzen die ersten drei Kriterien erfüllt haben, wird der Baum mit der kürzesten horizontalen Entfernung zur Kronenspitze des Referenzbaumes als „richtig detektiert“ angesehen (Abb. 2). Die „richtig detektierten“ Baumspitzen werden in einem weiteren Schritt markiert und mithilfe einer ID mit dem Referenzbaum verknüpft. Baumspitzen, die sich innerhalb der Referenzbaumkrone befinden, aber die vorgegebenen Kriterien nicht erfüllen, sowie jene, die außerhalb der Referenzbaumkrone (Polygon), aber weiterhin in der Kreisfläche liegen, zählen zur Überdetektion. Zur Unterdetektion zählen die Bäume, innerhalb derer Krone bzw. Pufferzone bei der Einzelbaumdetektion keine Baumspitzen detektiert wurden.

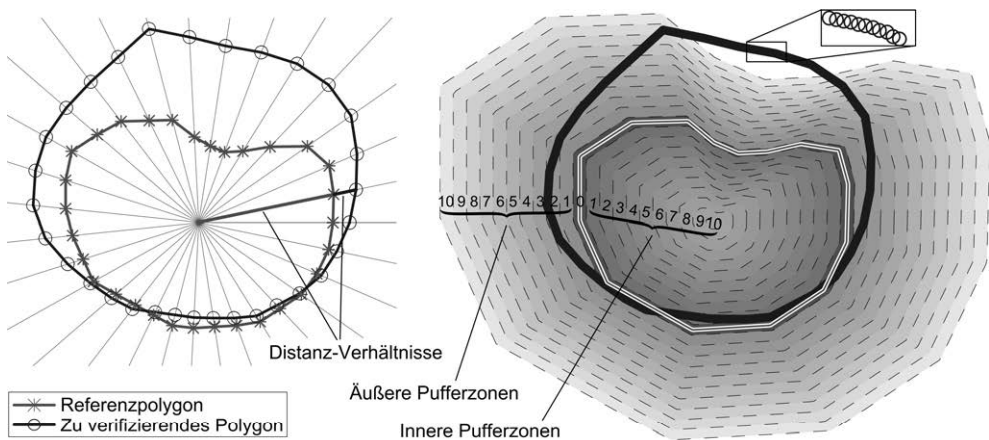


**Abb. 2:** Referenzkreisflächen und schematische Darstellung der EBD-Verifikation

Im zweiten Verifizierungsschritt wird die Güte der Baumartenklassifizierung auf Einzelbaumbasis ermittelt. Dieser Schritt basiert auf dem Ergebnis der EBD-Verifikation, wo bereits automatisch („richtig“) detektierte Bäume und Referenzbäume miteinander verknüpft wurden. Die Baumart wird durch einen Vergleich zwischen den Referenzdaten und automatisch generierten Daten auf Einzelbaumbasis überprüft, wobei das daraus resultierende Ergebnis anhand der Referenzdaten als „Wahr“ oder „Falsch“ eingestuft wird.

Der dritte Schritt der Verifizierung überprüft die Baumkronenabgrenzung. Dabei werden die Baumkronensegmente der „richtig“ detektierten Bäume (Abb. 3: blaues Polygon mit Kreisen) auf Übereinstimmung mit den Referenzbaumkronensegmenten (Abb. 3: rotes Polygon mit Sternen) überprüft. Zuerst wird das automatisch abgeleitete Polygon, das aus der EBD stammt und eine Baumkrone beschreibt, in gleichmäßige und sehr kurze Linienstücke zerlegt (Abb. 3: blaues Polygon mit Kreisen). Ausgehend vom Schwerpunkt des Referenzpolygons wird jeweils eine Gerade zu jedem Teilsegment mathematisch definiert und der Schnittpunkt mit dem Referenzpolygon berechnet. Darüber hinaus werden die Distanzen zwischen den Schnittpunkten der beiden Polygone und dem Schwerpunkt des Referenzpolygons berechnet

und das Längenverhältnis bestimmt. Auf der Basis dieser Längenverhältnisse können Pufferzonen (Zonen zwischen den gestrichelten Linien in Abb. 3 rechts) um das Referenzpolygon nach innen sowie außen definiert werden. Die Abstände zwischen den Pufferlinien sind nicht konstant, sondern werden dabei durch die jeweiligen Längenverhältnisse gesteuert. In einem nächsten Schritt werden die Punkte auf dem automatisch berechneten Segment (blaue Kreise in Abb. 3 rechts oben) den Pufferzonen zugeordnet und deren prozentuale Verteilung berechnet. Zusätzlich wird eine Gewichtung (Werte zwischen 0 und 1) eingeführt, die größere Abstände zwischen dem Referenzpolygon und dem automatisch berechneten Polygon bestraft. Dabei können die Gewichtungswerte linear oder nichtlinear in die Berechnung einfließen. So könnte man im Extremfall nur den Prozentwert der Punkte des automatisch berechneten Polygons, die sich in der Pufferzone 0 befinden, mit dem Wert 1 gewichten und die Prozentwerte der restlichen Pufferzonen dem Gewichtungswert 0 versehen. Als Resultat erhält man einen Ähnlichkeitsindex (Korrelationswert), der die geometrische Übereinstimmung zwischen den zwei Polygonen ausdrückt.



**Abb. 3:** Polygonzerlegung (links) und Pufferzonen um das Referenzpolygon (rechts)

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Die Tauglichkeit der Methode für die automatische Verifizierung der Ergebnisse hat sich bereits durch mehrere Tests bestätigt. Diese Tests erfolgten auf der Basis von sechs repräsentativ ausgewählten Waldgebieten, in denen eine Einzelbaumdetektion, Baumartenklassifizierung sowie eine Kronensegmentierung mit vier verschiedenen Ansätzen durchgeführt wurde, wobei bei der 4. Methode zwei unterschiedliche Segmentierungsverfahren angewendet wurden. Für jeden Ansatz wurden zudem mehrere Parameter variiert, wodurch eine Vielzahl an Ergebnissen entstanden ist (über 3000). Die ausgewählten Methoden zur EBD und Segmentierung werden hier nicht näher beschrieben, da sie nur dazu dienen, die Funktionsweise der Verifizierung zu erläutern. Eine genauere Beschreibung der Methoden findet sich bei MUSTAFIC (2015). Als Referenzdatensatz dienten insgesamt 2816 manuell aufgenommene Bäume, die sich aus allen sechs Gebieten zusammensetzten (siehe Kapitel 2, Abb. 2).

Die manuelle Erhebung der Referenzdaten erfolgte durch die Kombination von hochauflösender Orthophotos, nDSM und LiDAR-Intensitätsdaten, wobei die Bäume der oberen bzw. mittleren Bestandesschicht aufgenommen wurden. Der nötige Zeitaufwand für die Erhebung der Referenzdaten am Computer betrug wenige Stunden.

Auf eine tabellarische Darstellung von Validierungsergebnissen der EBD und Baumartenklassifizierung wurde hier aus Platzmangel verzichtet. Die Korrelationsergebnisse der Validierung der Baumsegmente für ein Mischwaldtestgebiet zwischen den Referenzdaten (R) und den verschiedenen Methoden (M#) sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Bei dem Validierungsprozess wurden folgende Gewichtungen für die Pufferzonen (0-10, siehe Abb. 3) gewählt: 1,0 0,9 0,8 ... 0,1 0,02. Die Diagonalwerte in der Tabelle 1 stellen die Korrelation der jeweiligen Methode mit sich selbst dar. Theoretisch sollten die Werte immer 1 sein, aber aufgrund der nicht kreisförmig bzw. sehr unregelmäßig um den Schwerpunkt verlaufenden Kronensegmente liegt dieser Wert in den meisten Fällen etwas unter 1 (ausgenommen bei R und M4). Diese Abweichungen repräsentieren die Korrelationsunsicherheit.

**Tabelle 1:** Ergebnis der Baumkronenkorrelation zwischen den manuell erhobenen (R) und den automatisch abgeleiteten Baumsegmenten (M). z. B. R → M2: Gesamtkorrelation 0,77 (davon: innere (1-10)- 0,33; mittlere (0)- 0,16 und äußere (1-10) 0,28 Pufferzone/n) und Mittelwert des Distanz-Verhältnisses [1,03]

	R	M1	M2	M3	M4	M4+
R	1,00 [1,00] 0,00 1,00 0,00	0,72 [1,21] 0,22 0,15 0,35	0,74 [1,16] 0,25 0,17 0,32	0,66 [1,32] 0,21 0,11 0,34	0,17 [2,72] 0,01 0,01 0,15	0,72 [1,18] 0,28 0,14 0,30
M1	0,76 [1,00] 0,35 0,16 0,25	0,99 [1,00] 0,02 0,94 0,03	0,77 [1,07] 0,27 0,34 0,16	0,73 [1,21] 0,16 0,36 0,21	0,22 [2,74] 0,03 0,02 0,17	0,71 [1,11] 0,28 0,24 0,19
M2	0,77 [1,03] 0,33 0,16 0,28	0,75 [1,17] 0,15 0,33 0,27	0,98 [1,01] 0,04 0,89 0,05	0,71 [1,24] 0,15 0,26 0,30	0,19 [2,73] 0,02 0,01 0,16	0,74 [1,13] 0,25 0,28 0,21
M3	0,73 [0,98] 0,36 0,12 0,25	0,76 [1,06] 0,21 0,36 0,19	0,75 [1,04] 0,30 0,27 0,18	0,99 [1,00] 0,03 0,92 0,04	0,23 [2,67] 0,04 0,02 0,17	0,81 [1,02] 0,26 0,44 0,11
M4	0,53 [0,56] 0,48 0,03 0,02	0,55 [0,61] 0,47 0,04 0,04	0,57 [0,61] 0,49 0,04 0,04	0,58 [0,66] 0,47 0,05 0,06	1,00 [1,00] 0,00 0,99 0,00	0,56 [0,64] 0,47 0,05 0,04
M4+	0,71 [1,10] 0,28 0,13 0,30	0,67 [1,24] 0,17 0,22 0,28	0,72 [1,17] 0,19 0,27 0,26	0,73 [1,28] 0,09 0,40 0,24	0,18 [3,05] 0,03 0,02 0,13	0,98 [1,00] 0,03 0,91 0,04

Die Spalte R in Tabelle 1 stellt die Korrelationen zwischen den manuell generierten Referenzdaten und der jeweiligen Methode dar, wobei die Zeile R die Rückkorrelationen darstellt. Durch die Rückkorrelationen aufgrund der relativen Distanzen (Abb. 3 links) werden die Korrelationsunterschiede in eine Richtung hervorgehoben, wodurch sich die Methode, die nicht optimale Kronensegmente generiert, leichter identifizieren lässt (vergleiche Spalte M4 mit der Zeile M4 in der Tabelle 1). Die Spalten M1 bis M4+ bzw. Zeilen M1 bis M4+ stellen die Korrelationen zwischen den verschiedenen Methoden dar. Durch den direkten Vergleich zwischen den Methoden kann die **relative** Korrelationsgenauigkeit auf der Basis aller im Gebiet vorkommenden Baumkronensegmente geschätzt werden. Darüber hinaus können Aussagen getroffen werden, in welchem Maße die ausgewählten Kreisflächen repräsentativ für alle im Untersuchungsgebiet vorkommenden Baumkronen sind.

## 4 Zusammenfassung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die entwickelte Verifizierungsmethode ein effektives Werkzeug zur automatisierten Auswahl der besten Auswertemethode bzw. der optimalen Parametereinstellungen darstellt. Die Methode besticht durch ihre Effektivität. Darüber hinaus werden durch die Verwendung von relativen Distanzverhältnissen die Entscheidungskriterien (Pufferzonen) auf die Größe der Baumkrone automatisch angepasst, wodurch sich das Verfahren automatisch an den jeweils vorliegenden Waldtyp anpasst.

Eine weitere auf die entwickelte Methode basierende Anwendung wäre die Verifizierung der Höhe entlang des Baumkronenrandes. Dies würde die Verifizierung des Baumkronensegmentes nicht nur, wie üblich, im 2D-Raum, sondern auch im 3D-Raum ermöglichen.

## Literatur

- BUDDENBAUM, H. (2010), Charakterisierung von Forstbeständen mit Hilfe von Laserscanning und Reflexionsmodellierung. Universität Trier (Dissertation), 56-89.
- DALPONTE, M., REYES, F., KANDARE, K. & GIANELLE, D. (2015), Delineation of Individual Tree Crowns from ALS and Hyperspectral data: a comparison among four methods. *European Journal of Remote Sensing*, 48, 365-382. doi: 10.5721/EuJRS20154821.
- EYSN, L., HOLLAUS, M., LINDBERG, E., BERGER, F., MONNET, J. M., DALPONTE, M., KOBAL, M., PELLEGRINI, M., LINGUA, E., MONGUS, D. & PFEIFER, N. (2015), A Benchmark of Lidar-Based Single Tree Detection Methods Using Heterogeneous Forest Data from the Alpine Space. *Forests*, 6/2015, 1721-1747.
- HYYPÄ, J., KELLE, O., LEHIKONEN, M. & INKINEN, M. (2001), A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 969-975.
- MORSORF, F., MEIER, E., ALLGÖWER, B. & NÜESCH, D. (2003), Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, Part 3/W13, 27-33.
- MUSTAFIC, S. (2015), Differenzierung von Baumarten aus LiDAR-Daten. Masterarbeit, Technische Universität Graz.
- MUSTAFIC, S., KAINER, A. & SCHARDT, M. (2014), Einzelbaumdetektion anhand von Ebenenschnitten. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.), *Angewandte Geoinformatik 2014*. ISBN 978-3-87907-543-0.
- REITBERGER, J. (2010), 3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner. Dissertation, Technische Universität München, 27-45.
- VAUHKONEN, J., ENE, L., GUPTA, S., HEINZEL, J., HOLMGREN, J., PITKÄNEN, J., SOLBERG, S., WANG, Y., WEINACKER, H., HAUGLIN, K.M., LIEN, V., PACKALÉN, P., GOBAKKEN, T., KOCH, B., NÆSSET, E., TOKOLA, T. & MALTAMO, M. (2012), Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry*, 85, 27-40.
- ZHEN, Z., QUACKENBUSH, L. J. & ZHANG, L. (2014), Impact of Tree-Oriented Growth Order in Marker-Controlled Region Growing for Individual Tree Crown Delineation Using Airborne Laser Scanner (ALS) Data. *Remote Sensing*, 6/2014, 555-579.