



## Hochauflösende Gelände- und Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten – ein Anwendungsbeispiel aus der Forstinventur

Michaela Ziegler<sup>1</sup>, Andreas Wimmer<sup>2</sup>, Mathias Schardt<sup>3</sup>, Otto Eckmüller<sup>4</sup>, Johannes Hofrichter<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Joanneum Research, Institut für digitale Bildverarbeitung, Wastiangasse 6, 8010 Graz*

<sup>2</sup> *Joanneum Research, Institut für digitale Bildverarbeitung, Wastiangasse 6, 8010 Graz*

<sup>3</sup> *Joanneum Research, Institut für digitale Bildverarbeitung, Wastiangasse 6, 8010 Graz*

<sup>4</sup> *Institut für Waldwachstumsforschung, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordanstr. 82, 1190 Wien*

<sup>5</sup> *Institut für angewandte Statistik, Joanneum Research, Steyrergasse 25, 8010 Graz*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **89** (1), S. 18–25  
2001

Bib<sub>T</sub>E<sub>X</sub>:

```
@ARTICLE{Ziegler_VGI_200103,  
Title = {Hochauflösende Gelände- und Oberflächenmodelle aus  
Laserscannerdaten -- ein Anwendungsbeispiel aus der Forstinventur},  
Author = {Ziegler, Michaela and Wimmer, Andreas and Schardt, Mathias and Eckm  
{\u}llner, Otto and Hofrichter, Johannes},  
Journal = {VGI -- Österreichische Zeitschrift für Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {18--25},  
Number = {1},  
Year = {2001},  
Volume = {89}  
}
```



vermuteten Netzspannungen mittels eines „normalen“ Zwangsnetzes erfolgen.

Die „Methode der Koordinatenbeobachtungen“ ist gegenüber der erstgenannten Methode der grundsätzlich allgemeinere Ansatz und bietet besonders bei der Interpretation der Qualität des Festpunktfeldes Möglichkeiten, die den vielleicht höheren Implementierungsaufwand einer entsprechenden Software rechtfertigen.

#### Referenzen

- [1] Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über Vermessungen und Pläne (VermV), BGBl. Nr. 562/1994, 1994.
- [2] Verordnung des Bundesministers für wirtschaftliche Angelegenheiten über Vermessungen beim Bergbau, das Bergbaukartenwerk und die Erfassung von Bodenbewegungen (Markscheideverordnung), BGBl. II Nr. 134/1997, 1997.
- [3] Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen, DIN 55350/T13, 1987.

- [4] BEV, Grenzkataster: Einrichtung, Neuanlegung, Führung und Amtshandlungen. 1994, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen: Wien.
- [5] Gleinsvik, P. (1963): Über die Genauigkeit der trigonometrischen Punktbestimmung mit besonderer Berücksichtigung der Einwirkung der Festpunkte. In: Zeitschrift für Vermessungswesen, 88.Jhg., Heft 11, pp. 441-446
- [6] Daxinger, W. (1995): Der Einfluß fehlerhafter Altpunkte auf die Bestimmung von Neupunkten. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, Heft 3, pp. 136-144
- [7] Kuang, S. (1996): Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications. Ann Arbor Press, Inc., Chelsea, Michigan.

#### Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. Dr. Martin Staudinger: Institut für Geoinformation und Landesvermessung, Technische Universität Wien, Gusshausstraße 27-29/127, A-1040 Wien, staudinger@geoinfo.tuwien.ac.at  
Johannes Otepka: Department of Geomatics, The University of Melbourne Parkville, Victoria 3052 Australia, johannes@avt.at



## Hochauflösende Gelände- und Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten – ein Anwendungsbeispiel aus der Forstinventur

Michaela Ziegler, Andreas Wimmer, Mathias Schardt, Otto Eckmüller und Johannes Hofrichter, Graz

#### Abstract

In this study laser scanner canopy height metrics data from the laser scanner Toposys-1 were investigated to derive forest attributes such as timber volume, tree height, and crown area coverage for the use in forest inventories. Investigations were mainly based on the processing of a correct DTM and on the derivation of single tree information from crown segmentation. Forest inventory parameters are classified on the base of single trees or small groups of trees using digital image processing methods such as segmentation and data filtering. First results for DTM-processing and single tree heights are very promising.

#### Zusammenfassung

In dieser Studie werden die Anwendungsmöglichkeiten von Laserscannerdaten des Scanners Toposys-1 hinsichtlich der Ableitung von forstwirtschaftlichen Parametern wie Holzvolumen, Baumhöhe und Kronenschirmfläche für die Forstinventur untersucht. Die exakte Geländemodell-Generierung sowie die Ableitung von Einzelbauminformationen aus der Kronensegmentierung standen dabei im Vordergrund. Die Forstparameter werden auf Basis der abgegrenzten Einzelbäume bzw. Baumgruppen mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden wie Segmentierung und Filteralgorithmen ermittelt. Die ersten Ergebnisse für die Bodenmodell-Generierung und die Einzelbaumhöhen aus Laserscannerdaten sind vielversprechend.

#### 1. Untersuchungsgebiet

Die im folgenden präsentierten Auswertungen sind am Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research, Graz im Rahmen des EU-Projektes HIGHSCAN – Assessing forest stand attributes by integrated use of high-resolution satellite imagery and laserscanner – [1] entstanden. Für Österreich wurden 3 Testgebiete ausgewählt: ein alpines Gebiet (Hohentauern) und zwei Gebiete im oststeirischen Hügelland. Die

Ergebnisse dieser Veröffentlichung basieren auf den Daten des alpinen Testgebietes Hohentauern, Forstverwaltung Stift Admont.

Das alpine Testgebiet Hohentauern weist einen Höhenunterschied von ca. 1300 bis 1600 m auf und ist durch eine hohe Reliefenergie gekennzeichnet. Die Hauptbaumarten sind Fichte (*picea abies*) mit einem Anteil von 94 %, Tanne (*abies alba*) 1 %, Lärche (*larix*) 2 %, Kiefer (*pinus*) 2 % und Laubbäume mit einem Anteil von 1 %. Der Wald übernimmt hier in den höheren Lagen

hauptsächlich die Funktion als Schutzwald. Die Forstinventur wird alle 10 Jahre durchgeführt mittels Winkelzählprobe und Ertragstafeln.

## 2. Laserscanning Prinzip

Beim Laserscanning wird die Entfernung von einem Flugzeug (oder Hubschrauber) zum Boden über die Laufzeit des reflektierten Laserstrahls gemessen. Wenn man die Position des Flugzeugs (besser des Sensors) genau kennt, kann diese Entfernungen in Gelände- bzw. Vegetationshöhen umgerechnet werden. Die Position des Sensors wird während des Fluges durch begleitende GPS (Bestimmung der Koordinaten mit WGS84 Bezugssystem) und INS (Korrektur der Bewegungen des Flugzeuges) Messungen ermittelt (siehe Abb. 1). Auf der Basis einer gemeinsamen Bezugsfläche werden Ort und Höhe des vermessenen Objekts aus der Position des Sensors, der Orientierung der Einzelmessung und der gemessenen Entfernung bestimmt. Durchschnittlich werden beim TopoSys-1 Laserscanner, der für die vorliegende Untersuchung verwendet wurde, 4 bis 5 Punkte / m<sup>2</sup> bei einer Flughöhe von ca. 800 m und einem Aufnahmewinkel von +/- 7° aufgenommen [2].

Die Aufnahme kann in zwei Modi erfolgen: Last-pulse und First-pulse (siehe Abb. 1). So wird bei der Last-pulse Aufnahme der zuletzt reflektierte Teil des Laserstrahls, der zum großen Teil in das Bestandesinnere eindringt und dort von der Bodenoberfläche reflektiert wird, im Sensor registriert. Beim First-pulse Mode wird hingegen das erste reflektierte Signal aufgenommen, das die Kronenoberfläche wiedergibt.

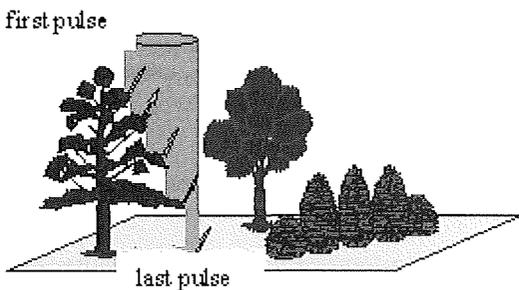


Abb. 1: First und Last-pulse Mode (Abb. Fa. Toposys)

## 3. Verarbeitung der Rohdaten

### 3.1 Digitales Geländemodell (DTM – digital terrain model)

Ein exaktes digitales Geländemodell (Bodenmodell) ist unerlässlich als Basis für alle weiteren

Laserscanner Anwendungen. Daher wird hier großes Augenmerk auf die exakte Trennung von Boden- und Vegetationspunkten bei der Generierung der Bodenmodelle gelegt. Die Erstellung der Bodenmodelle basiert prinzipiell auf den Rohdaten der Last Pulse Aufnahme. Das sind unregelmäßig verteilte Datenpunkte mit Angabe der x,y,z-Werte im lokalen Koordinatensystem.

Für das Gebiet Hohentauern mußten allerdings die First Pulse Daten zur Generierung des Bodenmodells herangezogen werden, da die Last Pulse Daten aufgrund eines Defektes am Scanner zum Befliegungszeitpunkt nicht aufgenommen werden konnten. Die angewendete Methode ist für Last und First Pulse Daten gleich, es muß jedoch bei den First Pulse Daten aufgrund der größeren Anzahl von Vegetationspunkten (siehe Kapitel 2) mit schlechteren Ergebnissen bei der DTM Generierung gerechnet werden.

#### 3.1.1 Prinzip der Methode zur Generierung von digitalen Geländemodellen

Im folgenden wird das Grundprinzip der Generierung von digitalen Geländemodellen aus Laserscannerdaten erklärt. Für spezielle Fälle, wie z. B. steiles, bewaldetes Gelände sind Modifikationen dieses Ansatzes notwendig (siehe 3.1.2). Die zur Generierung von Bodenmodellen am Joanneum Research entwickelte Methode basiert auf einem rasterorientierten Ansatz mit iterativen Verbesserungsschritten. Zur Transformation der Rohpunkte in ein regelmäßiges Raster wird im ersten Schritt eine Minimum-Filterung vorgenommen. Nach Wahl der Auflösung für das Basis Rasterbild werden innerhalb der Pixel dieses Rasterbildes die Minima in den Rohpunkte gesucht und den jeweiligen Pixeln zugeschrieben. Nach Glättung und Filterung von Lücken und Ausreißern bildet dieses „Grobmodell“ das Basis-DTM ohne Vegetationspunkte. Nun werden Bodenmodelle mit höheren Auflösungen ebenfalls mit Minimum-Rasterung gerechnet, bis hin zur gewünschten Ergebnis-Auflösung von 1 m. Das nächst feinere Modell (DTM b, (1)) wird nun im nächsten Schritt mit dem Basis-DTM, das mittels „Resampling“ auf die Auflösung des nächst feineren Modells gebracht wurde (DTM a, (1)), verglichen. Bei Höhenabweichungen innerhalb einer bestimmten Schranke wird der Wert vom feineren Modell akzeptiert. Man geht hier davon aus, daß sich auch im feineren Modell keine Vegetationspunkte mehr befinden. Überschreiten die Abweichungen aber die Schranke, bleibt der Wert vom Basis-DTM bestehen. Das somit erzeugte neue Bodenmo-

dell (DTM c, (2)) dient nun in den weiteren Schritten als Basis-DTM zum Vergleich mit der jeweils nächst feineren Auflösung. Dieser Prozess wird nun iterativ bis zur gewünschten Endauflösung – in diesem Fall 1 m – fortgesetzt. [3]

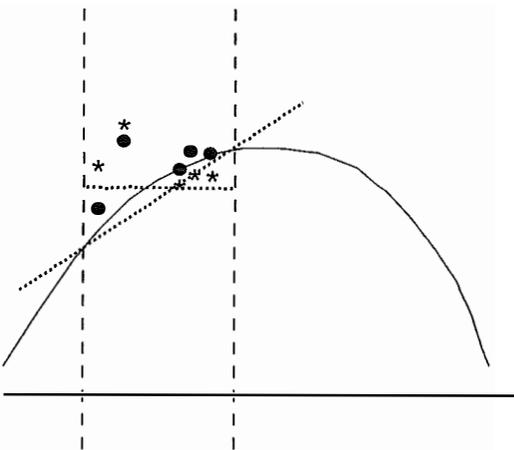
$$b(x,y) \in \text{Bodenpunkt} \text{ if } |b(x,y) - a(x,y)| < \text{Schranke} \quad (1)$$

$$\text{if } b(x,y) \in \text{Bodenpunkt} \quad \text{then } c(x,y) = b(x,y) \\ \text{else } c(x,y) = a(x,y) \quad (2)$$

Dieser Ansatz liefert für flaches bis moderates Gelände bereits zufriedenstellende Ergebnisse. Für das Testgebiet Hohentauern mit Hangneigungen zwischen 15° und 40° und zum Teil sehr dichter Vegetation (Wald) muß die Methode jedoch modifiziert werden.

### 3.1.2 Verfeinerung der Methode für steiles Gelände

Für geneigtes bis steiles Gelände liefert die oben beschriebene Methode bereits im ersten Basis-DTM grobe Fehler, da bei Hanglage das Minimum in einem Bereich (Pixel) durch die Minimum-Rasterung nicht aus der Pixelmitte sondern aus dem Randbereich stammt. Abhilfe für diesen Effekt kann durch Anpassung der Rohpunkte mit Hilfe der lokalen Gradienteninformation geschaffen werden. Diese Anpassung erfolgt bei allen Bodenmodellen, die innerhalb des iterativen Prozesses generiert werden. Abbildung 2 veranschaulicht die Anpassung der Rohpunkte mit Hilfe der lokalen Gradienteninformation.



- \* Raw data points
- Adjusted with gradient model
- ..... Gradient model

Abb. 2: Anhebung der Rohpunkte mit Hilfe der Gradienteninformation.

### 3.1.3 Ergebnisse und Verifizierung

Das DTM für Hohentauern wurde mittels terrestrischer Messungen verifiziert. Dazu wurden 4 Bereiche (jeweils ca. 30 m x 100 m) innerhalb des Testgebietes mittels terrestrischer Vermessung aufgenommen und Verifizierungs-Geländemodelle mit einer Auflösung von 10 cm erstellt. Die Verifizierungsergebnisse zeigen bei allen 4 Verifizierungsbereichen beim Vergleich LasermodeLL minus Verifizierungsmodelle eine mittlere Abweichung der beiden Geländemodelle von -15 cm bis -25 cm bei einer Standardabweichung von ca. 25 cm. Die Ergebnisse sind für das Projekt High-Scan sehr zufriedenstellend, da auch bei Geländekanten und steilen Böschungsbereichen diese Genauigkeiten erreicht werden konnten. Bei sehr dichten Beständen müssen aber auch Abweichungen bis zu 2 m in Kauf genommen werden, da aufgrund der Verwendung von First Pulse Daten keine Vegetationspunkte in diesen Bereichen vorliegen. Bessere Ergebnisse sind bei der Verwendung von Last Pulse Daten zu erwarten. [4]

### 3.2 Absolutes Kronenmodell

Das absolute Kronenmodell wird durch Maximum-Filterung der First Pulse Rohdaten (x,y,z) mit einer Rasterweite von 1m generiert. Ausreißer und Datenlöcher werden mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden (smoothing und thresholding) gefiltert und interpoliert. Das absolute Kronenmodell stellt also ein Oberflächen-Höhenmodell dar. [5]

### 3.3 Relatives Kronenmodell

Durch die Differenzbildung absolutes Kronenmodell minus Geländemodell entsteht das relative Kronenmodell, das in diesem Fall die Baumhöhen wiedergibt, siehe Abbildung 3. Die weiteren Arbeiten zur Ableitung forstwirtschaftlich relevanter Parameter basieren auf dem relativen Kronenmodell mit einer Auflösung von 1m.

## 4. Ableitung forstwirtschaftlich relevanter Parameter

Zur Ableitung von forstwirtschaftlich relevanten Parametern aus dem relativen Kronenmodell sind folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Vorverarbeitung des relativen Kronenmodells für die Kronen-Segmentierung inklusive der Ableitung von lokalen Maxima zur Bestimmung von Baumanzahl und Baumhöhen (4.1)

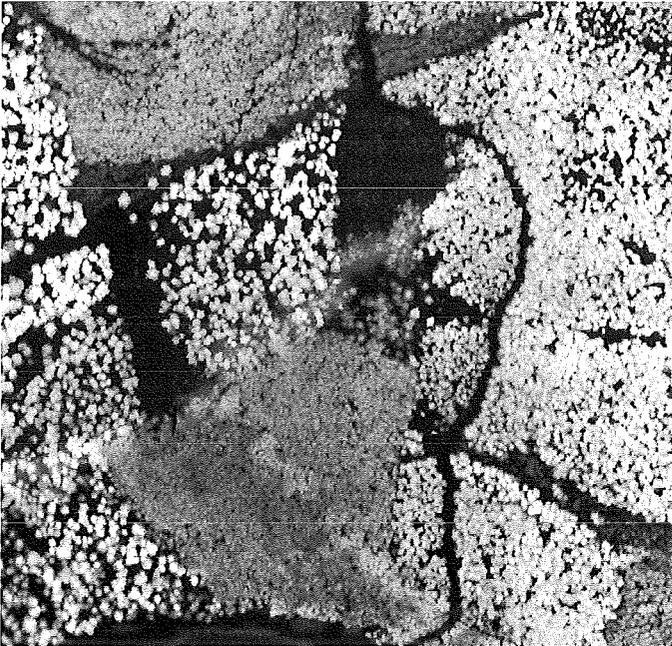


Abb. 3: Ausschnitt aus dem relativen Kronenmodell (Grauwerte geben unterschiedliche Höhen wieder, je heller, desto höher)

- Delinierung der Einzelbaumkronen mittels eines Segmentierungs-Algorithmus zur Bestimmung der Kronenflächen (4.2)
- Ableitung weiterer Parameter wie z.B. BHD (Brusthöhendurchmesser) und Holzvolumen über ertragskundliche Modelle aus den direkt aus den Laserscannerdaten ablesbaren Informationen Baumhöhe, Baumart, BHD, Kronenschirmfläche (4.3, 4.4)

Der beschriebene Segmentierungsalgorithmus wurde speziell für Nadelbäume mit ihrer annähernd kegelförmigen Krone für das Testgebiet Hohentauern mit einem Nadelbaumanteil von 99 % entwickelt. Für die Verifizierung wurden 197 repräsentativ verteilte Bäume (165 Fichten, 32 Lärchen) im Gelände vermessen - x,y,z Koordinaten, Baumhöhe, Baumart, BHD, Kronenschirmfläche.

#### 4.1 Vorverarbeitungsschritte für die Segmentierung – Ermittlung der Einzelbaumhöhen

Zunächst wird das relative Kronenmodell von 1 m auf 25 cm „resampled“, da die nachfolgenden

den Bildverarbeitungsmethoden eine Mindestanzahl an Pixeln erfordern. Danach wird eine Schwellwert Operation durchgeführt, um zu gewährleisten, daß bei der nachfolgenden Segmentierung nur Pixel der Baumkrone berücksichtigt werden. In diesem Fall werden Höhenwerte unter 1,5 m herausgenommen, da es sich dabei um Höhenwerte der Bodenvegetation und des Unterwuchses handelt. Eine weitere Voraussetzung für die Segmentierung ist, daß jede Baumkrone nur ein Höhen-Maximum aufweist und daß Höhendetails, welche die Kegelform stören, aus der Baumkrone entfernt werden. Daher wird zur Glättung des relativen Kronenmodells ein Gauss-Filter angewendet [6], [7], da dieser bei der Glättung keine neuen Extrema produziert. Die lokalen Maxima, aus denen Baumanzahl und Baumhöhen direkt abgelesen werden können, werden mittels

eines Maxima-Detektors [10] bestimmt. Da eine Baumkrone aber trotz der Glättung mehrere Maxima aufweisen kann z. B. durch herausragende Äste, wurde zusätzlich eine sogenannte Auto-Scale Selektion implementiert [10]. Hier kann eine maximale Kronengröße vorgegeben werden, welche zur Beurteilung zweier nahe beieinander liegender Maxima herangezogen wird. .

Tabelle 1 und Abbildung 4 zeigen das Ergebnis der Baumhöhen-Verifizierung – tatsächliche Baumhöhe (Ground Truth) versus segmentierte Baumhöhe (Baumhöhe aus Maximum Detektion). Die Baumhöhe ermittelt aus der Maximum Detektion liegt im Mittel um 62 cm niedriger als die tatsächliche Baumhöhe. Für diese Aussage wurden 78 Fichten aus den 165 Verifizierungsfichten herangezogen, da diese Bäume in weiterer Folge richtig segmentiert wurden und für die Untersuchungen unter 4.3 verwendet wurden. Die Fichten mit der ID 508 und 719 (Abbildung 4) werden als Ausreißer klassifiziert (Meßfehler) und fließen nicht in die Statistik aus Tabelle 1 ein. Baum 1116 (Abbildung 4) wird in der Statistik weiter berücksichtigt.

	Minimum (m)	Maximum (m)	Mittelwert (m)	Std. Abweichung (m)
tatsächliche Baumhöhe	6,2	39,8	27,23	4,90
segmentierte Baumhöhe	9,67	36,22	26,60	4,54

Tabelle 1: Tatsächliche Baumhöhe versus segmentierte Baumhöhe (78 Fichten)

#### 4.2 „Watershed“-Segmentierung – Ermittlung der Kronenfläche

„Watershed“-Algorithmen suchen üblicherweise in Grauwert-Bildern nach lokalen Minima und versuchen jedes Pixel des Bildes einem lokalen Minimum zuzuordnen. Zur Delinierung der Baumkronen wird das relative Kronenmodell invertiert, so daß die lokalen Maxima (Baumspitzen) als lokale Minima erscheinen. Zur Verdeutlichung des „Watershed“-Algorithmus soll als Beispiel eine Landschaft dienen, die durch Wassereinzugsgebiete gegliedert ist. Das invertierte und vorverarbeitete relative Kronenmodell wird nun als eine solche Landschaft interpretiert. Fällt ein Regentropfen auf diese Landschaft, folgt er gemäß dem Gesetz der Gravitation dem steilsten Weg bergab, bis er ein lokales Minimum erreicht. Alle Pixel, von denen aus das gleiche lokale Minimum erreicht wird, werden diesem Minimum zugeordnet und erhalten eine einheitliche ID. Pixel, von denen aus mehrere Minima zu erreichen sind, werden „Watershed“-Pixel genannt und erhalten eine unterschiedliche ID [8], [9]. Im Fall der Baumkronen-Delinierung stellen die „Watershed“-Pixel den Rand einer Krone dar [10].

Das Ergebnis der Segmentierung ist in Tabelle 2 dargestellt. Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt aus den Verifizierungsdaten.

Gesamtzahl der Verifizierungsbäume	197
Anzahl korrekt erkannter Kronen	98
Anzahl der Verschmelzungen <sup>1)</sup>	88
Anzahl der Aufspaltungen	9
Anzahl nicht erkannter Kronen	2

<sup>1)</sup> davon 68 aufgrund fehlender Maxima

Tabelle 2: Verifizierungsstatistik Baumkronendelinierung

Für die fehlerhaft segmentierten Baumkronen gibt es hauptsächlich zwei Ursachen:

1. Innerhalb einer Baumkrone befinden sich im relativen Kronenmodell zwei Höhen-Maxima. Dadurch wird eine Baumkrone zu zwei Kronen aufgespalten (bei 9 von 197 untersuchten Fällen).

2. Zwei oder mehrere Kronen verschmelzen zu einer Baumkrone im segmentierten Bild. Das tritt vor allem dann auf, wenn eine Krone im relativen Kronenmodell kein Maximum aufweist, z. B. niedrige Bäume in dichten Beständen (bei 68 von 197 untersuchten Fällen).

Da Fehler hauptsächlich durch Verschmelzung mehrerer Kronen entstehen, ist zu überlegen, in-

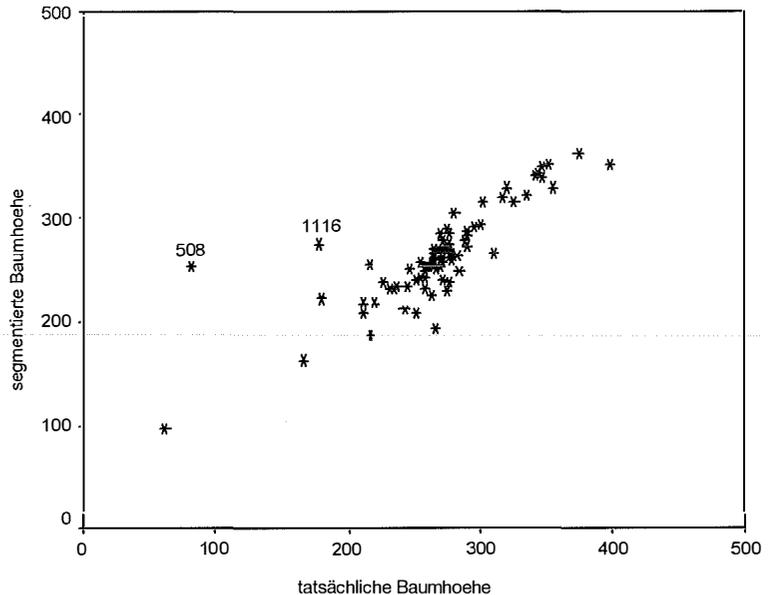


Abb. 4: Tatsächliche Baumhöhe versus segmentierte Baumhöhe

wieweit die Information „Kronenfläche / Baumgruppe“ bei Unkenntnis der genauen Baumanzahl zur Ermittlung des Holzvorrates / Bestand herangezogen werden kann, anstatt der Information „Kronenfläche / Einzelbaum“ (siehe Kapitel 4.4).

#### 4.3 Ableitung von BHD (Brusthöhendurchmesser) aus Baumhöhe und Kronenfläche

Der Brusthöhendurchmesser (BHD, Durchmesser des Baumstammes in 1,3 m Höhe) ist für die Ertragskunde ein wesentlicher Parameter, der bisher bei Einzelbaum-Untersuchungen – ohne Anwendung von Laserscannerdaten – terrestrisch gemessen wird. Der BHD ist die Basis für die Berechnung des Holzvorrates. Die folgenden Untersuchungen zielen darauf ab den BHD für Einzelbäume aus den direkt aus Laserscannerdaten ableitbaren Informationen Baumhöhe und Kronenfläche über ertragskundliche Modelle zu bestimmen. Dafür werden umfangreiche Meßreihen für Fichte aus dem Lehrforst der Universität für Bodenkultur (BOKU) – 562 Referenz-

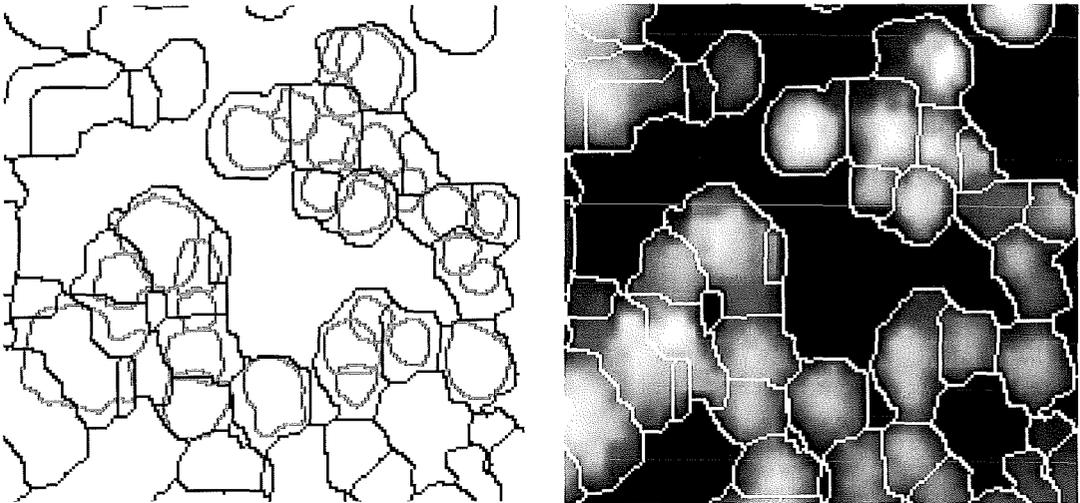


Abb. 5: Segmentierungsergebnis in schwarz und Verifizierungsbäume in grau (links) – relatives Kronenmodell überlagert mit dem Segmentierungsergebnis in weiß (rechts)

bäume – sowie die 165 Verifizierungsbäume aus dem Testgebiet Hohentauern herangezogen.

Am Institut für Waldwachstumsforschung der BOKU wurde aus den 562 Referenzbäumen folgende Formel (3) zur Ableitung des BHD (in mm) aus Baumhöhe (h in dm) und Kronenschirmfläche (s in m<sup>2</sup>) für Fichte ermittelt. R<sup>2</sup> beträgt 85,5 %.

$$\text{BHD} = -11,0178 + 1,10059 \cdot h + 4,5258 \cdot s \quad (3)$$

Zur Absicherung von Modell (3) und zur Überprüfung dessen Gültigkeit für das Testgebiet Hohentauern wird aus 165 Verifizierungsbäumen (Fichte) des Testgebietes Hohentauern ebenfalls eine Formel (4) zur Bestimmung des BHD abgeleitet (BHD in mm, h in dm, s in m<sup>2</sup>):

$$\text{BHD} = -31,96 + 1,33 \cdot h + 5,19 \cdot s \quad (4)$$

Der R<sup>2</sup> von 72 % für Modell (4) liegt deutlich unter dem der Referenzanalyse (85,5%), was zum Teil auf den geringeren Stichprobenumfang und dadurch die kleinere Streuung der BHDs zurückzuführen ist.

Von großem Interesse ist nun, ob das BOKU-Referenzmodell (3), das mit einem größeren Stichprobenumfang abgesichert ist und ein besseres R<sup>2</sup> liefert, auf die Daten des Testgebietes Hohentauern angewendet werden kann, für die die Ableitung (4) mit einem schlechteren R<sup>2</sup> bei

kleinerer Stichprobe ermittelt wurde. Vergleicht man die Koeffizienten beider Modelle und betrachtet dabei die 95 % – Konfidenzintervalle der Koeffizienten beider Modelle, so überschneiden sich diese 95 % – Konfidenzintervalle (siehe Tabelle 3). Daraus ergibt sich, daß das Referenzmodell BOKU auch für das Testgebiet Hohentauern anwendbar ist.

In den nächsten Arbeitsschritten müssen nun Fichten-Reinbestände im Testgebiet Hohentauern ausgewählt, die Bäume segmentiert und danach die BHD mit den Formeln (3) und (4) berechnet werden. Anschließend werden die Ergebnisse mit der zuständigen Forstverwaltung und vorliegenden Forstinventurdaten verifiziert werden. Diese Ergebnisse liegen zum derzeitigen Projekt-Status noch nicht vor, die bisherigen Untersuchungen deuten aber für die Baumart Fichte auf zufriedenstellende Ergebnisse hin.

#### 4.4 Zusammenführung der abgeleiteten forstwirtschaftlichen Parameter

Im ersten Arbeitsschritt wird analysiert, welche Einflußgröße (Baumhöhe oder Kronenschirmfläche) der BHD-Formel (3 oder 4) die wichtigere bzw. einflußreichere erklärende Variable für die Schätzung des BHD ist. Für diese Untersuchung werden die 78 richtig segmentierten Fichten (vgl.

Variable	Koeff. (3)	Koeff. (4)	untere Grenze Konfid.int. (3)	obere Grenze Konfid.int. (3)	untere Grenze Konfid.int (4)	obere Grenze Konfid.int (4)
Konstante	-11,0178	-31,96	-79,941	16,024	-25,0449	2,0093
Koeff. h	1,1006	1,33	1,106	1,553	1,0215	1,1797
Koeff. s	4,5258	5,19	3,708	6,668	4,1052	4,9464

Tabelle 3: Konfidenzintervalle der BHD-Modelle (3) und (4)

4.1) aus den Verifizierungsdaten Hohentauern herangezogen. Die Analyse zeigt zunächst, daß die segmentierten Kronenfläche im Mittel um 5 m<sup>2</sup> größer als die tatsächlichen Kronenflächen sind (vgl. 4.1 die segmentierte Baumhöhe ist im Mittel um 62 cm geringer als die tatsächliche Baumhöhe). Abbildung 6 zeigt die tatsächlichen Kronenflächen aufgetragen gegen die segmentierten Kronenflächen. Die Bäume 1116 und 1205 werden in weiterer Folge nicht als Ausreißer klassifiziert, und werden daher bei den nachfolgenden Berechnungen berücksichtigt.

Um den Einfluß der einzelnen erklärenden Variablen (Baumhöhe *h* und Kronenschirmfläche *s*) auf die Schätzung des BHD zu bestimmen, werden die standardisierten Koeffizienten der linearen Regression (4) berechnet. Dabei ist der standardisierte Koeffizient der Baumhöhe 2 mal größer als jener der Kronenfläche (0,584 für Baumhöhe, 0,297 für Kronenfläche). Das bedeutet, daß sich eine Verbesserung der Messgenauigkeit der Baumhöhe stärker auf die Bestimmung des BHD auswirkt als eine Verbesserung bei der segmentierten Kronenfläche. Da die Verifizierungsergebnisse für die Baumhöhen schon zufriedenstellend sind und der Aufwand für Verbesserungen unverhältnismäßig hoch ist (vgl. 3.1), das Verifizierungsergebnis der Kronenflächen-segmentierung (vgl. 4.2) aber noch Verbesserungspotential in diesem Bereich aufzeigt, ist eine Genauigkeitssteigerung in diesem Fall bei der Kronendelinierung anzustreben.

In den nächsten Arbeitsschritten muß nun für die unter Punkt 4.3 ausgewählten Fichten-Reinbestände aus den errechneten BHD der Holzvorrat (Schaftholz) nach bekannten Formeln [11] aus der Ertragskunde ermittelt werden. Danach folgt die Verifizierung mit vorliegenden Forstinventurdaten. Diese Ergebnisse sollen zu Projektende (Juli 2001) vorliegen.

### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Auswertungen von Laserscanner Daten zur Ableitung forstwirtschaftlich relevanter Daten zeigen vielversprechende Ergebnisse.

Der Anwendungsbereich Forstwirtschaft stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeiten des digitalen Geländemodells, da alle weiteren Berechnungen davon abhängen (z. B. Baumhöhe). Für die vorliegenden Untersuchungen aus dem Projekt HIGHSCAN werden bei der Geländemodellerstellung zufriedenstellende Resultate erzielt. Die Arbeiten im Bereich Geländemodellierung aus Laserscanner Daten werden aber am Institut für digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research weiter fortgesetzt, da unter anderem für die Vermessung die Genauigkeiten verbessert werden sollen.

Die vorliegende Studie zeigt, daß die Baumhöhen im Testgebiet Hohentauern bereits mit ausreichend hoher Genauigkeit errechnet werden

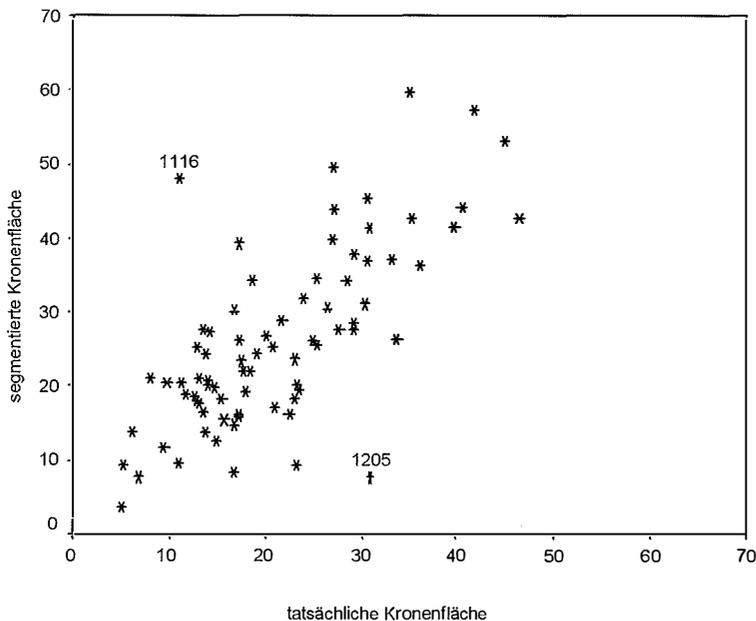


Abb. 6: tatsächliche Kronenfläche versus segmentierte Kronenfläche

können bei der Kronensegmentierung aber noch Verbesserungspotential besteht. In den nächsten Arbeitsschritten ist unter anderem abzuklären, inwieweit sich falsch segmentierte Kronen, v.a. Segmente, die mehr als einen tatsächlichen Baum umfassen, auf die bestandesweise Holzvorratsberechnung auswirken. Weiters wird derzeit die Kenntnis der Baumart vorausgesetzt – im speziellen Fall Fichte, da die Klassifizierung von Baumarten aus Laserscanner Daten noch zu untersuchen ist. Hier wird aber auch daran gearbeitet, Laserscanner Daten mit hochauflösenden Satellitenbilddaten – z. B. IKONOS - zu kombinieren. Aus

den hochauflösenden Satellitenbilddaten können Baumart, Baumalter und Überschrumpfung klassifiziert werden [12]. Darüberhinaus soll die entwickelte Methode der Kronenabgrenzung und Ableitung von forstwirtschaftlich relevanten Parametern auf Laubwald und Laub-Mischwald angewendet werden. Dies erfolgt in den Testgebieten des oststeirischen Hügellandes. Es ist zu erwarten, daß hier nicht einzelne Kronen sondern lediglich Baumgruppen ausgeschieden werden können.

Eine neue Technik der Fernerkundung steht am Anfang einer Entwicklung, die hoffentlich auch für die Forstwirtschaft und hier speziell für die Forsteinrichtung im Laufe der Weiterentwicklung Vorteile und auch Kosteneinsparungen bringen wird.

#### Dank

Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern – HUT Finnland, FELIS Uni Freiburg, Fa. TopoSys Deutschland, Ingenieurbüro Scherrer Schweiz – für die gute und intensive Zusammenarbeit sowie bei K. Schrefler, R. Wack, A. Straka und Ch. Sevcik für die durchgeführten Geländearbeiten.

#### Literatur

- [1] *Hyypäe, J., 1998: Assessing forest stand attributes by integrated use of high-resolution satellite imagery and laser scanner, Technical Annex, EU-Project High-Scan, ENV4-CT98-0747*
- [2] *Wehr A., Lohr U., 1999: Airborne laser scanning – an introduction and overview, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (1999), pp. 68 – 82*
- [3] *Ruppert G., Wimmer A., Beichel R., Ziegler M., 2000: An adaptive multi-resolucional algorithm for high precision fo-*

- rest floor DTM generation, Proceedings of SPIE Aerosense 2000, Lasar Radar Technology V, Orlando /Florida
- [4] *Wack R., 2000: Verifizierung von digitalen Geländemodellen aus Laserscannerdaten, Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz*
  - [5] *Ziegler M., Konrad H., Hofrichter J., Wimmer A., Ruppert G., Schardt M., Hyypäe J., 2000: Assessment of forest attributes and single-tree segmentation by means of laser scanning, , Proceedings of SPIE Aerosense 2000, Lasar Radar Technology V, Orlando /Florida*
  - [6] *Lindeberg T., Romeny B.M.H., 1994: Linear scale-space, Kluwer Academic Publishers, Netherlands*
  - [7] *Lindeberg T., 1993: On Scale Selection for Differential Operators, computational Vision and Active Perception Laboratory, Royal Institute of Technology, Sweden*
  - [8] *Soille P., 1999: Morphological Image Analysis, Springer*
  - [9] *Roerdink J., Meijster A., 1999: The Watershed Transform: Definitions, Algorithms and Parallelization Strategies, University of Groningen, Netherlands*
  - [10] *Konrad H., 2000: Segmentierung von Einzelbaumkronen aus hochauflösenden Laserscannerdaten, Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz*
  - [11] *Pollanschütz J., 1974: Formzahlfunktionen der Hauptbaumarten, Österreichische Allg. Forstzeitung 85 (12)*
  - [12] *Wimmer A., Schardt M., Ziegler M., Ruppert G., Granica K., Schmitt U., Gallaun H., Hyypäe J., 2000: Forest inventory by means of satellite remote sensing and laser scanning, ISPRS Vol. XXXIII, Amsterdam*

#### Anschrift der Autoren

Mag. Michaela Ziegler, Andreas Wimmer, Dr. Mathias Schardt, Joanneum Research, Institut für digitale Bildverarbeitung, Wastiangasse 6, 8010 Graz, e-mail: michaela.ziegler@joanneum.ac.at; Dr. Otto Eckmüller, Institut für Waldwachstumsforschung, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordanstr. 82, 1190 Wien, e-mail: OTTOECKM@edv1.boku.ac.at; DI Johannes Hofrichter, Institut für angewandte Statistik, Joanneum Research, Steyrergasse 25, 8010 Graz, e-mail: johannes.hofrichter@joanneum.ac.at

## Dissertationen und Diplomarbeiten

### Slepians – An Alternative Family of Orthonormal Base Functions on the Sphere

*Gernot Plank*

Diplomarbeit: Institut für Theoretische Geodäsie, Abteilung für Mathematische Geodäsie und Geoinformatik, TU Graz, 2000.

Betreuer: O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Hans Sünkel

Bei der Bestimmung des Gravitationsfeldes der Erde mit Hilfe von Satellitenmessungen tauchen (neben anderen) zwei Probleme auf: diskrete Datenverteilung einerseits, und Löcher in der Datenverteilung andererseits.

In der hier vorgelegten Arbeit wird eine Alternative zu den Kugelfunktionen (die sogenannten Slepians) entwickelt, die nur auf Teilbereichen der Kugel definiert sind. Als zweiter Schritt wird der traditionelle Ausgleich nach kleinsten Quadraten durch Einführung einer nicht euklidischen Norm erweitert, um die Probleme der diskreten Datenverteilung zu reduzieren.

Die gesamte entwickelte Theorie ist in FORTRAN 90 und C implementiert, wobei die zeitaufwendigen Teile mit Hilfe eines internationalen Standards (Message Passing Interface) parallelisiert sind.

### Konzepte zur Herstellung von Studien- und Freizeitkarten für Westkreta auf der Basis von Satellitenbilddaten

*Lukas Rohrer*

Diplomarbeit: Institut für Angewandte Geodäsie, Abteilung für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Graz, 2000.

Betreuer: Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Robert Kostka

Neben einer Übersichtskarte von Westkreta, Richtmaßstab 1:150000, war die Herstellung einer Kulturgutkarte für die Halbinsel Akrotiri und einer Wanderkarte im Bereich der Hochebene von Omalos jeweils im Maßstab 1:50000, sowie von drei Karten für archäologische Arbeiten in Südkreta in den Maßstäben 1:25000 bis