

Band 18

2009



Vorträge

29. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF

24. – 26. März 2009
in Jena

Zukunft mit Tradition

First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern

JOSEF REITBERGER, PETER KRZYSTEK & UWE STILLA

Zusammenfassung: Der Beitrag stellt aktuelle Forschungsergebnisse zur Einzelbaumsegmentierung und Baumartenklassifikation mit Hilfe von konventionellem First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning vor. Eine neuartige 3D Segmentierung erbringt mit Full Waveform Daten eine deutliche Steigerung der Erkennungsrate von 13%. Die Klassifikationsgenauigkeit von Laub- und Nadelbäumen kann durch Ausnutzung der Full Waveform Information auf 95% gesteigert werden. Die Punktdichte und der Belaubungszustand haben auf die Ergebnisse nur einen geringen Einfluss.

1 Einleitung

Airborne Laserscanning (ALS) hat sich in den letzten 15 Jahren als effizientes Verfahren zur Erfassung und Kartierung der Erdoberfläche entwickelt und schnell ein breites Anwendungsspektrum erreicht. Durch die rasante Entwicklung von elektronischen Bauteilen konnte die Leistungsfähigkeit der Systeme insbesondere im Bereich der Pulsrate und der Messgeschwindigkeit deutlich gesteigert werden (Abb. 1). Neuartige „Multiple Pulses in the Air“-Systeme (ROTH & THOMPSON, 2008) nutzen die erhöhte Pulsrate aus und senden einen neuen Laserpuls aus bevor das reflektierte Signal des vorherigen Laserpulses empfangen wird. Dies ermöglicht eine größere Flughöhe bei gleichem Punktabstand (HUG, 2008). Gleichzeitig führte die Pulsatenerhöhung zu einem Zuwachs in der Punktrate und der aufgezeichneten Datenmenge (Abb. 2).

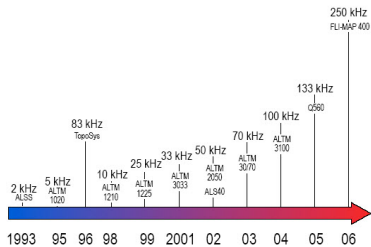


Abb. 1: Effektive Messrate bei ALS (Hug, 2008)

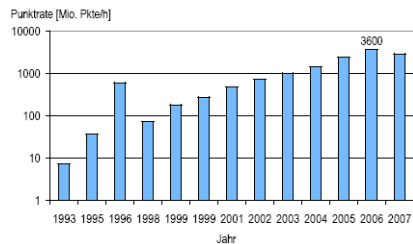


Abb. 2: Datenzuwachsrate bei ALS (Hug, 2008)

Neben der Pulsratensteigerung konnte eine vollständige Aufzeichnung des reflektierten Laserimpulses erreicht werden. Das als Funktion der Aufnahmezeit aufgetragene Signal wird typischerweise Echoprofil oder „Waveform“ genannt. Im Gegensatz zu den konventionellen

- 1) Josef Reitberger, Hochschule München, Karlstr. 6, 80333 München; E-Mail: jreitberger@web.de
- 2) Peter Krzystek, Hochschule München, Karlstr. 6, 80333 München; E-Mail: krzystek@hm.edu
- 3) Uwe Stilla, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München; E-Mail: stilla@tum.de

First/Last Pulse Systemen (FL), die die erste und letzte Reflektion des Laserstrahls registrieren (Abb. 3), ermöglicht diese neue Technologie eine Analyse der im Empfänger ankommenden Signalform (Abb. 4). Seit 2004 gibt es kommerzielle Full Waveform Systeme (FW), die das gesamte reflektierte Signal registrieren (Details über Systeme siehe MALLET & BRETAR, 2008). Die im Echoprofil digitalisierte Empfangsenergie ist ein Maß für die vertikale Verteilung der beleuchteten Oberflächen, die in Richtung des Beobachtungsvektors und in Abhängigkeit der Reflektivität bzgl. der Wellenlänge den Laserstrahl zurückwerfen. Falls die Waldoberfläche sehr dicht mit einzelnen Echoprofilen abgedeckt werden kann, lassen sich somit Rückschlüsse über die gesamte räumliche Verteilung und Charakterisierung der Waldstruktur unter einer geschlossenen Waldoberfläche ziehen.

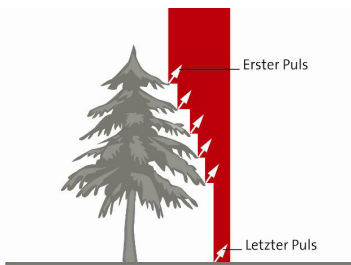


Abb. 3: First/Last Pulse Erfassung von Bäumen

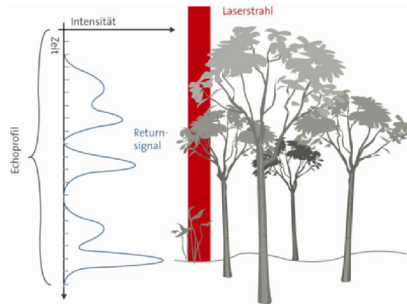


Abb. 4: Full Waveform Erfassung von Bäumen

Zwei Vorgehensweisen erscheinen dabei denkbar. Die erste Strategie nutzt direkt die Rohdaten entweder als einzelne Waveforms oder in einem vorgegebenen Raumbereich (z.B. Einzelbaum) summierte Waveforms. Da die Waveforms eine Funktion von Baumparametern (z.B. Baumalter, -art, -höhe, -krone) sind, können gemessene Waveforms mit theoretischen Modellen verglichen werden. Denkbar ist sogar eine Anpassung der theoretischen Modelle an die Messungen durch Optimierungsmethoden. Aktuelle Arbeiten, die in diese Richtung gehen, sind z.B. KÖTZ (2006) oder MORSDORF et al. (2008). Eine zweite Strategie zur Auswertung von Waveforms liegt in der Zerlegung der Waveforms in die einzelnen Reflektionsanteile. Dabei erhält man neben den 3D Positionen der einzelnen Reflektionen die Pulsenergie und die Pulsbreite des empfangenen Impulses als zusätzliche Punktattribute. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in einer erhöhten räumlichen Punktdichte, einer verbesserten Entfernungsgenauigkeit und den zusätzlichen Punktinformationen, die für eine Segmentierung und Klassifizierung verwendet werden können.

ALS wurde in den letzten Jahren zur Ableitung von Forstparametern für die Waldinventur umfangreich untersucht. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen flächenbasierten Methoden und Ansätzen, die den Einzelbaum als 3D Objekt detektieren und klassifizieren. Hauptfokus dieser Ansätze ist die Bestimmung der für eine Waldinventur wichtigen Parameter Holzvorrat, Holzzuwachs und Baumartenverteilung. Da die Punktrate in den letzten Jahren ständig zunahm, rückten zunehmend auch Einzelbaumverfahren in den Vordergrund der Forschungsarbeiten. Stellvertretend seien hierfür die Arbeiten von HOLMGREN et al. (2004), PERSSON et al. (2002), KOCH et al. (2006), HEURICH (2006) und MALTAMO et al. (2007) genannt. Der Nachteil der

bisherigen Einzelbaumansätze ist, dass aus den lokalen Maxima eines Oberflächenmodells (DOM) Bäume segmentiert werden. Von der Oberschicht verdeckte Bäume können dabei nicht erkannt werden. Weiterhin werden die Bäume nicht als einzelne 3D Objekte detektiert. Die Berechnung des Holzvolumens erfolgt z.B. dabei über die Parameter Baumhöhe, Baumkronendurchmesser und Baumart. Diese Größen beschreiben die Baumkrone jedoch nur unvollständig. Die Berechnung des Holzvolumens, das ein wichtiger Zielparameter der Waldinventur ist, ist daher mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet. Weiterhin ist die Erkennung von Verjüngungen ein ungelöstes Problem. Ansätze, die die Baumstammverteilung über Verteilungsfunktionen schätzen, müssen aufwändig mit Felddaten kalibriert werden.

Der vorliegende Beitrag vergleicht das Potenzial der FL und FW Technologie zur Einzelbaumdetektion und Baumartenklassifizierung im Naturwald der Nationalparks Bayerischer Wald. Im Kapitel 2 wird auf der Basis einer Waveformzerlegung eine neuartige 3D Segmentierung vorgestellt. Kapitel 4 stellt Ergebnisse der Einzelbaumsegmentierung und der Baumartenklassifizierung mit FL-Daten und FW-Daten vor.

2 Waveformzerlegung

Eine Waveform $w(t)$ wird als eine Überlagerung mehrerer Gaußfunktionen modelliert (Abb. 7)

$$w(t) = \varepsilon + \sum_{m=1}^{N_p} A_m \exp\left[-\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma_m^2}\right] \quad (1)$$

mit

N_p : Anzahl von Gaußfunktionen A_m : Amplitude des mten Peaks
 ε : Rauchspegel in der Waveform t_m : Zeitposition des mten Peaks
 σ_m : Halbe Breite des mten Peaks bei $\frac{A_m}{\sqrt{e}}$ (= Standardabweichung)

Die unbekannt Parameter werden in einer iterativen Ausgleichung geschätzt. Aus der Waveform kann für jede Reflektion i ein Vektor $X_i^T = (x_i, y_i, z_i, W_i, I_i)$ ($i=1, \dots, N_R$) mit (x_i, y_i, z_i) als den 3D Koordinaten der Reflektion berechnet werden. Zusätzlich erhält man die Pulsbreite $W_i = 2 \cdot \sigma_i$ und die Intensität $I_i = \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_i \cdot A_i$ des reflektierten Strahls mit σ_i als Standardabweichung und A_i als der Amplitude der Reflektion i (JUTZI & STILLA, 2006; REITBERGER et al., 2008a). Bemerkenswert ist, dass durch die Auswertung der Waveform praktisch jede Reflektion im Postprocessing erkannt werden kann. Im Gegensatz dazu können konventionelle Systeme maximal nur bis zu 5 Reflektionen erfassen und sind nach einer Reflektion wegen der Totzeit des Empfängers in einem Bereich von ca. 3 m praktisch blind. Dies gilt auch für die eingangs erwähnten MPiA-Systeme.

Auf der Basis der Waveformzerlegung konnte nachgewiesen werden, dass (i) Reflektionen mit einem Abstand von 40 cm noch aufgelöst werden können, (ii) die Genauigkeit der Höhenbestimmung ca. 2 cm (=1/7 der Auflösung von 15 cm) beträgt, (iii) im Vergleich zum konventionellen First/Last Pulse Verfahren 2 – 3 mal mehr 3D-Punkte im Vegetationsbereich zur Verfügung stehen, (iv) durch die hohe Punktdichte Mikrostrukturen von Bäumen (z.B.

Baumstamm, Baumäste) erfasst werden (siehe Abb. 8.1 und 8.2) und (v) dominierte Bäume, d.h. Bäume in der Unterschicht, erfasst werden können. Die Untersuchungen unterstreichen damit deutlich, dass FL-Systeme wegen der Detektionsmethode und der Totzone viele Reflektionen in der Baumstruktur ignorieren. Die Abbildungen 9.1 und 9.2 zeigen eine Baumgruppe von zwei Fichten, die mit einem FL-System (TopoSys Falcon II) und einem FW-System (Riegl LMS Q560) bei gleicher nominaler Punktdichte aufgenommen wurden. Die Baumkrone wird von dem FW-System mit einer wesentlich höheren räumlichen Punktdichte erfasst, da kurz hintereinander auftretende Reflektionen (Abb. 9.3) durch die Waveformzerlegung detektiert werden (Abb. 9.4).

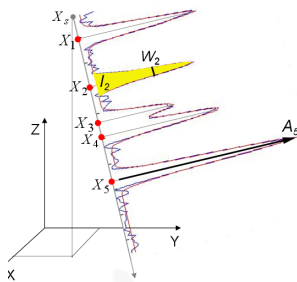


Abb. 7: Waveformzerlegung

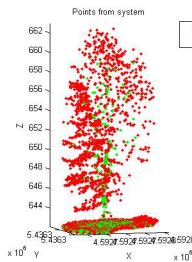


Abb. 8.1: Einzelbaum (mit FL erfasst)

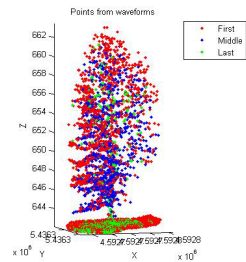


Abb. 8.2: Einzelbaum (mit FW erfasst)

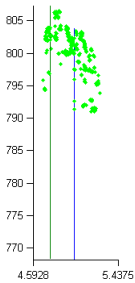


Abb. 9.1: Baumgruppe (mit FL erfasst)

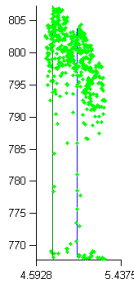


Abb. 9.2: Baumgruppe (mit FW erfasst)

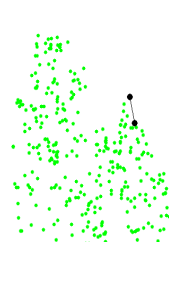


Abb. 9.3: Detail der Baumkrone (mit FW)

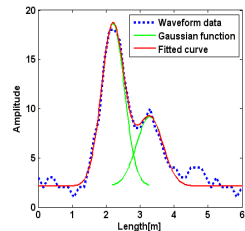


Abb. 9.4: Waveform zweier Reflektionen

2.1 3D Segmentierung

Die Grundidee der 3D Segmentierung ist es, die aus der Bildanalyse bekannte Normalized Cut Segmentierung (SHI & MALIK, 2000) in einer Voxelrepräsentierung anzuwenden und Einzelbäume in 3D zu segmentieren. Die 3D Segmentierung nutzt die Positionen (x_i, y_i, z_i) der Reflektionen sowie die Pulsbreite W_i und die Pulsenergie I_i aus der Waveformzerlegung. Die Normalized Cut Segmentierung im Voxelraum basiert auf einem Graph G . Segmente A und B im Graph werden durch die Forderung gefunden, dass die Ähnlichkeit der Voxel in den Segmenten maximiert und die Ähnlichkeit zwischen den Segmenten minimiert wird. Die Segmente werden gefunden durch die Kostenfunktion

$$NCut(A,B) = \frac{Cut(A,B)}{Assoc(A,V)} + \frac{Cut(A,B)}{Assoc(B,V)} \quad (2)$$

mit $Cut(A,B) = \sum_{i \in A, j \in B} w_{ij}$ als Summe der Gewichte zwischen den Segmenten und $Assoc(A,V) = \sum_{i \in A, j \in V} w_{ij}$ als Summe der Gewichte aller Kanten, die im Segment A enden (Abb. 10.1).

Die Gewichte legen die Ähnlichkeit zwischen den Voxeln fest und sind eine Funktion der Punktverteilung und der Merkmalen, die man über I_i und W_i berechnen kann. Eine Minimumlösung wird über ein korrespondierendes Eigenwertproblem gefunden (REITBERGER et al., 2008b).

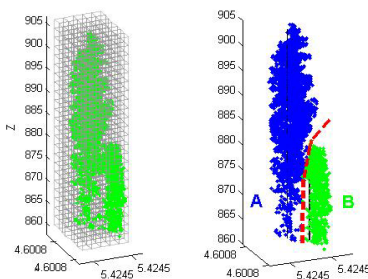


Abb. 10.1. Voxelunterteilung und Segmentierung von 2 Bäumen

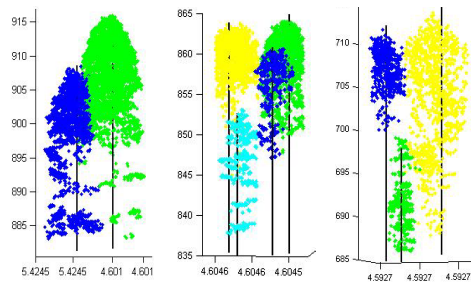


Abb. 10.2. Beispiele der Normalized Cut Segmentierung

Die 3D Segmentierung wird stark durch die a-priori Position von Bäumen gestützt, die wiederum durch eine vorgeschaltete Wasserscheidensegmentierung und Stammerkennung berechnet werden kann. Interessant ist weiterhin, dass der Ansatz nicht unbedingt von FW-Daten abhängt. Auch konventionelle FL-Daten können verwendet werden. Die Abbildungen 10.2 zeigen komplexe Situationen, in denen die 3D Segmentierung sehr gute Ergebnisse liefert. Zu beachten ist vor Allem, dass dominierte Bäume gut erkannt werden. Eine konventionelle Wasserscheidensegmentierung auf der Basis eines DOM würde diese Bäume nicht „sehen“.

3 Datenmaterial

Die Experimente konnten mit Unterstützung des Nationalparks Bayerischer Wald in den dort angelegten Referenzgebieten durchgeführt werden. Insgesamt 18 Referenzgebiete mit einer Größe zwischen 1000 m² und 3600 m² in den zwei Testgebieten E und C wurden ausgewählt. Insgesamt 688 Fichten (*Picea abies*), 812 Buchen (*Fagus sylvatica*), 70 Tannen (*Abies alba*), 71 Bergahorne (*Acer pseudoplatanus*), 21 Spitzahorne (*Acer platanoides*) und 2 Linden (*Tilia Europaea*) mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) größer 7 cm wurden ausgewählt. Baumparameter wie der BHD, Baumhöhe, Stammposition und Baumart wurden mit Tachymetrie, GPS und Vertex III bestimmt. Weiterhin wurden die Bäume bzgl. der Bestandshöhe in drei Baumschichten unterteilt. Insgesamt standen Daten von 3 FW-Befliegungen (belaubt und unbelaubt) und einer konventionellen FL-Befliegung (belaubt) zur Verfügung (HEURICH, 2006; REITBERGER et al., 2008b).

Befliegungszeit	Sept. '02	Mai '06	Mai '07	Mai '07
Datensatz	I	II	III	IV
Belaubung	belaubt	unbelaubt	belaubt	belaubt
Scanner	TopoSys Falcon II	Riegl LMS-Q560	Riegl LMS-Q560	Riegl LMS-Q560
Punkte/m ²	10	25	25	10
Höhe über Grund	850	400	400	500
Footprint [cm]	85	20	20	25
Referenzgebiete	Alle	Alle	Alle	Nur Gebiet E

Tab. 1. Verschiedene Befliegungen mit FL und FW Scanner

4 Experimente

4.1 3D Segmentierung

Im Folgenden werden die Segmentierungsergebnisse für eine konventionelle 2D (Wasserscheiden-)Segmentierung („W“) und die neue 3D Segmentierung („Ncut“) gegenübergestellt (Tab. 2). Bei allen Datensätzen sieht man, dass die 2D Segmentierung insbesondere in den unteren beiden Schichten sehr schlechte Erkennungsraten liefert. Hier ergeben sich bei der 3D Segmentierung Verbesserungen im Bereich von 12% bis 20%. In der obersten Schicht gibt es bei den FW-Daten Verbesserungen im Bereich von 3% bis 10%. Insgesamt, d.h. für alle Schichten, liegen die Verbesserung bei 3% bis 12%, wobei der kleinste Wert bei den FL-Daten auftritt.

Äußerst interessant ist weiterhin der Vergleich zwischen FL-Pulse Daten und FW-Daten, die sich auf gleiche nominale Punktdichten beziehen (Datensätze I und IV). Die Kombination von FW-Daten mit der 3D Segmentierung verbessert die Erkennungsrate in den unteren beiden Schichten um 21% und insgesamt um 13%. Die Schlüsselfaktoren zu diesem Durchbruch sind einerseits die hohe räumliche Punktdichte und die neue 3D Segmentierung, die nicht die Waldoberfläche segmentiert sondern einen echten räumlichen Ansatz verfolgt. Die Abbildungen 11 verdeutlichen diese Zusammenhänge beispielhaft an einer Baumgruppe. Die 2D Segmentierung mit FL-Daten kann die Baumgruppe nicht trennen. Wenn man FW-Daten verwendet, kann die 2D Segmentierung die Baumgruppe auch nur unzureichend trennen. Erst die Kombination von FW-Daten und der 3D Segmentierung führt zu einer befriedigenden Trennung der Einzelbäume.

Der einzigartige Datensatz erlaubt auch noch andere Aussagen bzgl. der Punktdichte und des Belaubungszustands. Wenn man den Datensatz III auf das Gebiet E beschränkt und mit Datensatz IV vergleicht, ändern sich die Erkennungsraten praktisch nicht. Offensichtlich werden die wichtigsten Baumstrukturen auch bei einer reduzierten nominalen Punktdichte durch die Waveformzerlegung noch erfasst. Schließlich kann der Einfluss des Belaubungszustands analysiert werden. Aus dem Vergleich der Datensätze II (keine Belaubung) und Datensatz III (mit Belaubung) ist zu ersehen, dass – wie auch erwartet – die Erkennungsrate bei Belaubung in

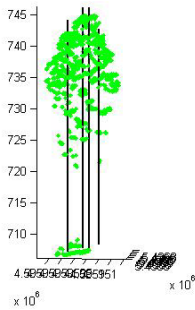


Abb. 11.1: Baumgruppe (mit FL erfasst)

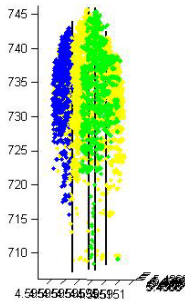


Abb. 11.3: Baumgruppe (mit FW erfasst)

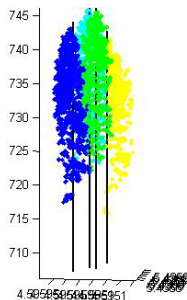


Abb. 11.5: Baumgruppe (mit FW erfasst)

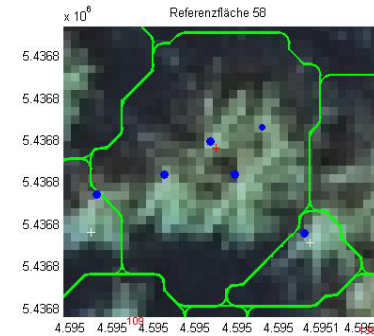


Abb. 11.2: Konventionelle Wasserscheidensegmentierung

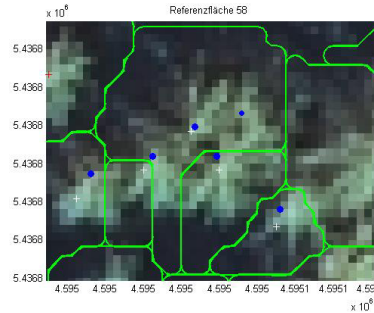


Abb. 11.4: Konventionelle Wasserscheidensegmentierung

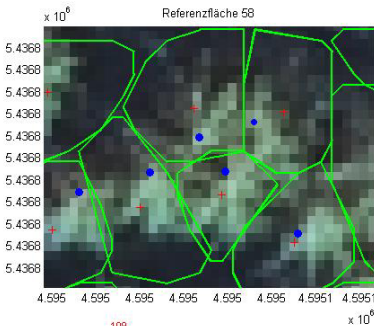


Abb. 11.6: 3D Segmentierung

den beiden unteren Schichten um ca. 4 % schlechter ist. Jedoch in der oberen Schicht sind die Ergebnisse der Normalized Cut Segmentierung fast gleich. Insgesamt ist nur ein minimaler Genauigkeitsverlust von 2 % nachzuweisen.

Datensatz	Methode	Erkannte Bäume in Höhengschicht [%]			
		unten	mittel	oben	gesamt
I (nur Gebiet E) belaubt	W	2	12	80	52
	NCut	15	27	77	55
II unbelaubt	W	5	21	77	48
	NCut	21	38	87	60
III belaubt	W	5	20	79	48
	NCut	17	32	86	58
IV (nur Gebiet E) belaubt	W	6	21	84	57
	NCut	26	33	87	65

Tab. 2. Ergebnisse der Segmentierung mit den Datensätzen I, II, III und IV

4.2 Baumartenklassifikation

In der nachfolgenden Tab. 4 sind die Ergebnisse einer überwachten Baumartenklassifikation für die 3D Segmente zusammengefasst. Folgende Merkmale („M“) wurden in einer Maximum-Likelihood Klassifikation verwendet (Details siehe REITBERGER et al., 2008a).

M	Definition	M	Definition
s_g	Mittlere horizontale Entfernung der Layerpunkte zum Baumstamm	s_w	Mittlere Pulsbreite von Einzel- und Erstreflektionen
s_i	Mittlere Intensität im gesamten Baumsegment	s_n	Verhältnis der Anzahl von Einzel- zu Mehrfachreflektionen

Tab. 3. Merkmalsdefinition für Baumartenklassifizierung

Interessanterweise erweist sich das Intensitätsmerkmal s_i als das beste Merkmal im Belaubungszustand (Datensätze III und IV). Allerdings verliert dieses Merkmal im belaubungsfreien Zustand an Bedeutung. In diesem Fall kann aber das Merkmal s_n , das die Durchdringungscharakteristik beschreibt, die Klassifikation positiv beeinflussen. Das Merkmal s_w , das die Pulsbreite der Reflektionen nutzt, wirkt im belaubungsfreien Zustand besser als im Belaubungszustand. Das Baumkronenmerkmal s_g , das die äußere Form der Baumkrone beschreibt, hat einen fast gleichbleibenden Einfluss auf das Ergebnis im Belaubungszustand und im belaubungsfreien Zustand. Die Genauigkeit ist sogar für Datensatz I (FL-Daten bei einer Punktdichte von 10 Punkten/m²) die gleiche als bei FW-Daten. Dieses Merkmal ist also auch für niedrige Punktdichten signifikant. Schließlich noch einige Bemerkungen zum Einfluss des Belaubungszustands auf das Klassifikationsergebnis. Die Datensätze II und III zeigen etwa gleiche Klassifikationsergebnisse, wobei die Signifikanz der einzelnen Merkmale unterschiedlich ist. Interessanterweise beeinflusst die Punktdichte auch kaum die Ergebnisse (siehe Datensatz III (nur Gebiet E) und Datensatz IV (nur Gebiet E)). Ebenso zeigt der Vergleich zwischen Datensatz I und Datensatz IV (nur Gebiet E), die beide eine Punktdichte von 10 Punkten/m² aufweisen, dass die Klassifikation mit FL-Daten um 19 % schlechter ist als mit FW-Daten. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass nur die 3D Koordinaten der Reflektionen zur Verfügung stehen und damit nur das Baumgeometriemerkmal s_g verwendet werden konnte.

Merkmal	Overall accuracy (%) für Datensätze I - IV (3D Segmente)				
	I (nur Gebiet E)	II	III	III (nur Gebiet E)	IV (nur Gebiet E)
	belaubt	unbelaubt	belaubt	belaubt	belaubt
s_g	78	78	82	82	81
s_l	-	81	94	96	97
s_W	-	79	51	56	64
s_n	-	93	63	65	57
$s_g + s_l$	-	86	94	97	97
$s_g + s_l + s_W + s_n$	-	94	95	97	97

Tab. 4. Ergebnisse einer überwachten Baumartenklassifizierung mit 3D Segmenten

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz der Full Waveform Technologie in Kombination mit einer neuartigen 3D Segmentierung einen entscheidenden Durchbruch erbringt. Im Einzelnen lässt sich feststellen, dass (i) das neue 3D Segmentierungsverfahren eine deutliche Verbesserung der Erkennungsrate von Einzelbäumen erbringt, (ii) eine Steigerung der Erkennungsrate in der Unterschicht von mehr als 20 % nachweisbar ist, (iii) die Klassifikation der Einzelbäume in Nadel- und Laubbäume für die über die 3D Segmentierung gefundenen Einzelbäume sowohl im belaubten und nichtbelaubten Zustand mit ausreichender Genauigkeit von 95% gelingt und (iv) die Intensität der 3D Punkte die Klassifikation deutlich unterstützt.

Die vorgestellte 3D Segmentierung ist noch über eine gezielte Nachbearbeitung verbesserungsfähig. Zum Beispiel könnten Segmente, die eine bestimmte Größe überschreiten, detailliert im Hinblick auf eine mögliche weitere Zerlegung untersucht werden. Desweiteren muss die baumartenspezifische Interaktion des Laserstrahls genauer analysiert werden, um die Information der FW-Daten besser auszunutzen. Weiterhin erscheint eine Fusion von FW-Daten mit Multispektral- oder Hyperspektraldaten vielversprechend.

6 Danksagung

Die Autoren möchten sich für die Unterstützung und die Bereitstellung der FL-Daten durch den Nationalpark Bayerischer Wald (Dr. M. Heurich) bedanken. Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 1702403 gefördert.

7 Literaturverzeichnis

HEURICH, M., 2006: Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren. Forstlicher

- Forschungsbericht München, Nr. 202, ISBN 3-933506-33-6. <http://meadiatum2.ub.tum.de/> (Zugriff 16. Dezember, 2008).
- HOLMGREN, J. & PERSSON, A., 2004: Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90, pp. 415–423.
- HUG, CH., 2008: Neue Trends in Airborne Laser Scanning. Forum Geoinformation “Airborne Laserscanning”, Hochschule München, Fakultät für Geoinformation, 06.06.2008, http://www.fh-muenchen.de/home/fb/fb08/archiv/forum_geoinfo/08-06-06_laserscann/download/FG_2008_Hug.pdf (Zugriff 12. Januar, 2009).
- JUTZI, B. & STILLA, U., 2006: Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61, pp. 95–107.
- KOCH, B.; HEYDER, U. & WEINACKER, H., 2006: Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72, 4: 357-363.
- KÖTZ, B., 2006: Estimating biophysical and biochemical properties over heterogeneous vegetation canopies - Radiative transfer modeling in forest canopies based on imaging spectrometry and LIDAR. Dissertation, ETH Zürich. <http://www.dissertationen.unizh.ch/2006/koetz/diss.pdf> (Zugriff 16. Dezember, 2008).
- MALLET, C. & BRETAR, F., 2008: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (2009), S. 1 – 16.
- MALTAMO, M.; PACKALÉN, P.; PEUHKURINEN, J.; SUVANTO, A.; PESONEN, A. & HYYPPÄ, J., 2007: Experiences and Possibilities of ALS Based Forest Inventory in Finland. *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Volume XXXVI, PART 3/W52, 12 – 14th September 2007, Espoo, pp. 270 – 279.
- MORSORD, F.; NICHOL, C.; MALTHUS, T.J.; PATENAUDE, G. & WOODHOUSE, I.H., 2008: Modelling multi-spectral LIDAR vegetation backscatter – assessing structural and physiological information content. *SilviLaser 2008*, Sept. 17-19, Edinburgh, UK.
- PERSSON, A.; HOLMGREN, J. & SÖDERMAN, U., 2002: Detecting and measuring individual trees using an airborne laserscanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68(9), pp. 925–932.
- REITBERGER, J.; KRZYSZEK, P. & STILLA, U., 2008a: Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 29, No. 5, March 2008 , pp. 1407 – 1431.
- REITBERGER, J.; KRZYSZEK, P. & STILLA, U., 2008B: 3D segmentation and classification of single trees with full waveform LiDAR data. *Proceedings of SilviLaser 2008*, 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory, Edinburgh, UK, pp. 216 – 226.
- ROTH, R.B. & THOMPSON, J., 2008: Practical application of multiple-pulse in the air. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (Part), S. 183-188.
- SHI, J. & MALIK, J., 2000: Normalized cuts and image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22, pp. 888-905.