

# Full Waveform Laserscanning - Auswertemethoden und Anwendungen

Uwe Stilla<sup>Δ</sup>, Boris Jutzi, Josef Reitberger, Wei Yao, Peter Krzystek  
<sup>Δ</sup>Photogrammetrie und Fernerkundung  
Technische Universität München  
Arcisstr. 21  
80333 München  
stilla@tum.de

## 1 Einleitung

Luftbildphotogrammetrie und flugzeuggetragenes Laserscanning (ALS) sind die am häufigsten verwendeten Methoden zur Generierung von digitalen Höhenmodellen. Bei den bildbasierten Verfahren wird die Distanz zu einer räumlichen Oberfläche typischerweise indirekt durch Triangulation korrespondierender Punkte von zwei oder mehreren überlappenden Bildern der Oberfläche abgeleitet. Diese Punkte können manuell oder durch digitale Analyse der Bildstrukturen abgeleitet werden. Im Gegensatz zu dieser Vorgehensweise erlauben aktive Laserscanner eine direkte und beleuchtungsunabhängige Messung der Entfernung zur Oberfläche. Natürlich gibt es auch bei der terrestrischen Erfassung von Objekten, wie z.B. Fassaden, die Möglichkeit mehrere Stereobilder oder Laserscandaten zur Aufnahme zu verwenden.

In der Photogrammetrie und Fernerkundung wurden im letzten Jahrzehnt intensiv die Vor- und Nachteile der häufig als konkurrierend angesehenen Methoden von Luftbildphotogrammetrie und ALS diskutiert. Zur Auswahl der optimalen Methode für eine bestimmte Campagne sind verschiedene Faktoren der Datenaufnahme (z.B. Abdeckung, Wetterbedingungen, Kosten) und der Oberflächenrekonstruktion (z. B. Genauigkeit, Redundanz, Verarbeitungszeit) zu berücksichtigen. Ein Beispiel für eine Studie, die photogrammetrische Auswertung gegenüber dem Laserscanning zur Generierung von hochqualitativen DHMs zum Gletschermonitoring vergleicht, ist in Wuerlaender et al. (2004) gegeben. Im Gegensatz zur Auswahl einer der beiden Methoden, ist in einigen Anwendungsbereichen eine kombinierte Verarbeitung von Laserdaten und Stereobildern vorteilhaft wie z.B. bei der Generierung extraterrestrischer digitaler Geländemodellen vom Mars (Albertz et al., 2005; Spiegel et al., 2006). Aber auch bei ter-

restrischen Aufnahmen von Gebäudefassaden oder Innenbereichen werden zunehmend photogrammetrische Auswertungen und Laserscanning kombiniert.

Konventionelle gepulste Lasersysteme basieren auf einer Laufzeitmessung um die Entfernung zum beleuchteten Objekt zu messen. Die Laufzeit wird durch die verstrichene Zeit zwischen dem gesendeten und dem zurückgestreuten Puls gemessen. Die Signalanalyse zur Bestimmung der Zeit arbeitet typischerweise mit analogen Schwellwerten. Für beleuchtete Ziele, die Oberflächen mit verschiedenen Entfernungen besitzen, können pro gesendeten Puls mehrere Pulse rückgestreut werden. Die meisten ALS-Systeme sind in der Lage mindestens die Entfernung des ersten und letzten rückgestreuten Pulses zu erfassen. Manche Systeme nehmen Entfernungen von mehreren rückgestreuten Pulsen auf, z.B. bis zu fünf Entfernungswerte pro gesendeten Puls. Die Detektion des ersten Pulses (first pulse) ist die optimale Wahl um die Hülle von teilweise durchdrungenen Objekten oder sogenannten Volumenstreuern (z.B. Baumkronen) zu messen. Die Detektion des letzten Pulses (last pulse) sollte gewählt werden, wenn nicht durchdringbare Flächen (z.B. Bodenflächen) gemessen werden sollen.

Heutzutage erfassen einige kommerzielle ALS Systeme nicht nur die Entfernung für mehrfache Reflektionen, sondern digitalisieren und zeichnen das empfangene Signal der reflektierten Energie auf, was eine sogenannte „*Full Waveform*“-Analyse ermöglicht. Dies bietet die Möglichkeit die Signalform (Echoprofil, *Waveform*) offline mit Methoden der digitalen Signalverarbeitung zu analysieren, um verschiedene Oberflächenattribute, die sich in der Form des reflektierten Pulses zeigen, vom empfangenen Signal zu extrahieren.

Im letzten Jahrzehnt wurden einige Untersuchungen zur *Waveform*-Analyse durchgeführt um Strukturen der Vegetation zu untersuchen und die Biomasse über dem Boden zu schätzen. Beispielsweise hat die NASA den „Laser Vegetation Imaging Sensor“ (LVIS) entwickelt um aus der aufgezeichneten Signalform auf vertikale Dichteprofile in Wäldern zu schließen (Blair et al., 1999). Dieses experimentelle flugzeuggetragene System arbeitet in Höhen bis zu 10 km und nimmt *Waveforms* von Beleuchtungskegeln mit großem Footprints (Durchmesser etwa 20 m) auf. Ein weiteres System der NASA mit „Large Footprint“ ist das satellitengetragene „Geoscience Laser Altimeter System“ (GLAS), das auf dem Ice, Cloud and Land Elevation Satellite (ICESat) montiert ist. GLAS misst Höhenverteilungen von atmosphärischen Wolken und Aerosolen und Oberflächenhöhen von Eisbedeckungen, Landoberflächen und Vegetationen. Es arbeitet mit einem Footprint von 70 m und misst Höhenänderungen mit Dezimetergenauigkeit.

Bei der Datenanalyse beider Systeme werden Oberflächeneigenschaften durch Vergleich von parametrischen Beschreibungen des gesendeten und empfangenen Signals bestimmt. Aufgrund des großen Footprints werden mehrere Oberflächen beleuchtet, die durch die Integration im empfangenen Signal nicht aufgelöst werden können.

Im Gegensatz zu Systemen mit großem Footprint beleuchten Systeme mit kleinem Footprint häufig nur wenige Oberflächen, was zu Signalen mit ausgeprägten Pulsen führt, die zu speziellen Oberflächen korrespondieren. Eines der ersten entwickelten „small footprint waveform“-Systeme ist das „Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey (SHOALS)“, welches seit 1994 operationell zur Beobachtung für küstennahe Wasserbereiche eingesetzt wird.

In den letzten Jahren wurden kommerzielle ALS Systeme entwickelt, die mit einer Pulsweite des Sendepulses von 4-10 ns arbeiten und eine Abtastung und Aufnahme der *Waveform* von ungefähr 0.5-1 GSample/s erlauben (Jutzi & Stilla, 2006b),(Mallet & Bretar, 2009).

## 2 Modellierung

Die empfangene *Waveform* hängt von der übertragenen *Waveform* des ausgesendeten Pulses, der räumlichen Energieverteilung der Laserstrahls und der Geometrie und Reflektionseigenschaften der Oberfläche ab. Um die zeitlichen und räumlichen Eigenschaften des Pulses zu beschreiben, sind geeignete Modelle zur parametrisierten Beschreibung einzuführen.

### 2.1 Waveform des Laserpulses

Zur näherungsweisen Beschreibung der *Waveform* können mathematische Funktionen verwendet werden. Abhängig vom System kann dies z.B. durch eine Rechteck-, Exponential- oder Gaußfunktion beschrieben werden. Ein einfaches Modell ist durch eine Rechteckfunktion  $s(t)$  mit einer Amplitude  $a$ , Pulsweite  $w$  und der Zeitverzögerung  $\tau$  gegeben:

$$s(t) = a \cdot \text{rect}\left\{-\frac{(t-\tau)}{w}\right\} = \begin{cases} a & \text{for } -\tau \leq t \leq w-\tau \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Besonders für kurze Laserpulse weicht die rechteckige Funktion von der gemessenen Form ab. Steinvall (2000) hat daher eine Modellierung durch einen exponentiellen Verlauf verwendet:

$$s(t) = t^2 \cdot \exp\left\{-\frac{(t-\tau)}{w}\right\}$$

Eine zeitlich symmetrische Gaußfunktion zur Modellierung der *Waveform* des satellitengestützten GLAS wird von Brenner et al. (2003) vorgeschlagen. Die grundlegende *Waveform*  $s(t)$  des verwendeten Lasersystems kann wie folgt beschrieben werden:

$$s(t) = \frac{2a}{w} \cdot \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} \cdot \exp\left\{-4 \cdot \ln(2) \cdot \frac{(t-\tau)^2}{2w^2}\right\}$$

Die Breite  $w$  eines Pulses wird bei der Hälfte des Maximums der Amplitude eines Pulses gemessen, bekannt als FWHM (Full Width at Half Maximum).

## 2.2 Räumliche Energieverteilung

Die räumliche Energieverteilung eines Lasers (auch bekannt als Strahlprofil) hängt von der Anregungsquelle (Pumpe), dem optischen Resonator und dem Lasermedium ab. Im Allgemeinen werden Strahlprofile durch zylindrische oder zweidimensionale symmetrische Gaußverteilungen beschrieben (Kamermann, 1993). Eine gemessene zylindrische Strahlverteilung eines gepulsten Erbium Faser Lasers der mit einer Wellenlänge von 1550 nm arbeitet, ist in Abb. 1a dargestellt. Die Gaußsche Strahlverteilung eines Raman-verschobenen Nd-YAG Lasers, der mit einer Wellenlänge von 1543 nm arbeitet, ist in Abb. 1b gezeigt. Beide Messungen weichen mehr oder weniger von der idealisierten Form ab.

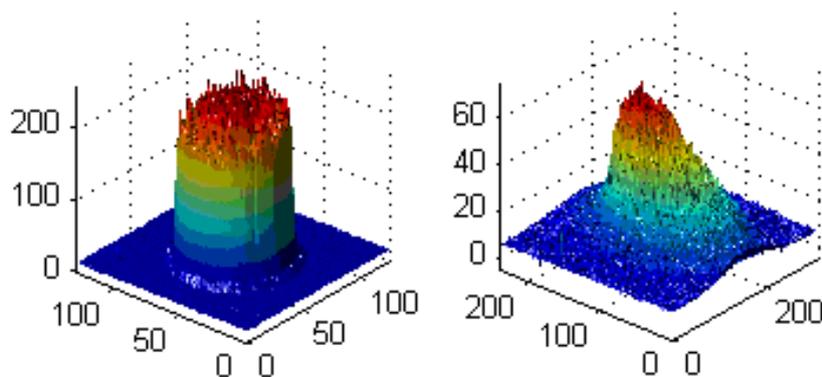


Abb. 1: Gemessene Strahlverteilungen. a) zylindrisch, b) gaußförmig

## 2.3 Analyse der Waveform

Um aus der *Waveform* Attribute der reflektierenden Oberfläche abzuleiten, können verschiedene Detektionsmethoden verwendet werden. Wird eine raue Oberfläche von einem Laserpuls getroffen, so streut sie diesen teilweise zum Empfänger zurück. Um den Puls im Empfänger zu detektieren und aus dem Signal zu separieren wird ein Schwellwert verwendet, der aus dem Rauschen des Signals geschätzt werden kann. Für eine Detektion kann z.B. als Kriterium festgelegt werden, dass die Intensität der *Waveform* das Dreifache der Standardabweichung des Rauschens für mindestens eine Dauer  $t$ , die der Breite (FWHM) des gesendeten Pulses entspricht, vorliegen muss. Der Signalabschnitt (*Waveform*) um den Bereich des detektierten Pulses wird dann einer nachfolgenden Verarbeitung zugeführt.

Typische Oberflächenattribute, die aus der *Waveform* extrahiert werden, sind Entfernung, Höhenvariation und Reflektivität. Sie stehen in Zusammenhang mit den Attributen Zeit, Breite und Amplitude der *Waveform*. Eine zur Ausbreitungsrichtung des Pulses geneigte Oberfläche oder eine Oberfläche mit starker Höhenvariation wird bei der Reflektion den Puls aufweiten. Daher könnte die Weite des Pulses als Messung für die Höhenvariation der Oberfläche verwendet werden. Zusätzlich führt die Aufweitung des Pulses zu einer Streuung der reflektierten Photonen über einen größeren Zeitbereich, was zu einer Reduktion der Amplitudenspitze führt. Um die Höhenvariation oder die Reflektionseigenschaft der Oberfläche zu schätzen, ist daher die Pulsbreite mit der Amplitude zu berücksichtigen.

Die Bestimmung der Entfernung zu einer Oberfläche kann mit verschiedenen Konzepten erfolgen, wie z.B. der sogenannten Peak-Detection, Leading-Edge-Detection, Constant-Fraction-Detection, Center-of-Gravity-Detection oder Gaussian-Decomposition und Entfaltung.

### 2.3.1 Peak-Detection

Der Entfernungswert  $r_p$  und die Amplitude  $a_{p,s}$  wird an der Stelle des Maximums des Pulses bestimmt (Abb. 2). Die Breite  $w_{p,s}$  wird bei halber Amplitude des Pulses bestimmt (FWHM). Dem Puls überlagerte lokale Spitzen (Störungen) beeinflussen stark die Extraktion der Attribute. Daher wird für verrauschte Signale eine Glättung

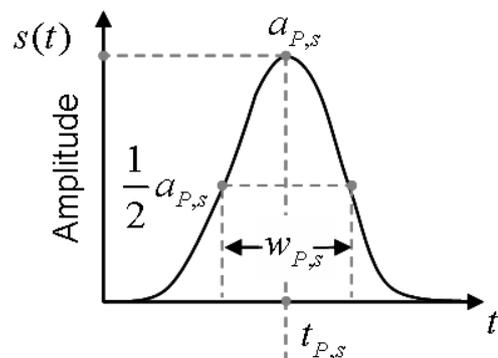


Abb. 2: Peak-Detection

zur Bestimmung des Maximums empfohlen.

### 2.3.2 Leading-Edge-Detection

Zur Bestimmung des Entfernungswertes  $r_{LE}$  wird die führende Flanke mit einem Schwellwert verglichen (Abb. 3). Der Schwellwert kann durch einen vordefinierten Wert gegeben sein, wodurch jedoch der ermittelte Wert für die Entfernung stark von der Amplitude und Weite des Pulses abhängt. Unterschiedliche Amplituden können sich bei der gesendeten *Waveform* durch systembedingte Intensitätsfluktuationen und bei der empfangenen *Waveform* durch unterschiedliche Reflektionseigenschaften des Materials ergeben. Günstiger ist es daher, für den Schwellwert die Hälfte der maximalen Amplitude  $a_{LE}$  anzusetzen.

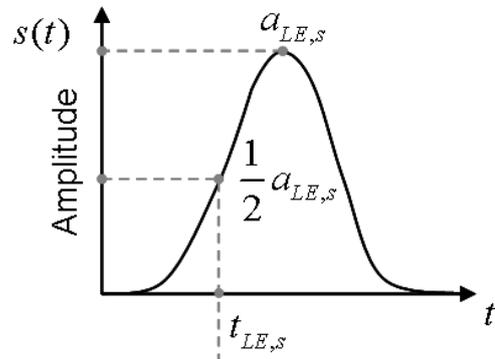


Abb. 3: Leading-Edge-Detection

### 2.3.3 Constant-Fraction-Detection

Um unempfindlich gegenüber Amplitudenänderungen zu sein, wurde eine Entfernungsbestimmung entworfen, die als Constant-Fraction-Detection bekannt ist. Dabei wird die empfangene *Waveform*  $s(t)$  invertiert, um eine feste Zeit  $\tau$  verzögert und dann wiederum zu  $s(t)$  addiert (Abb. 4).

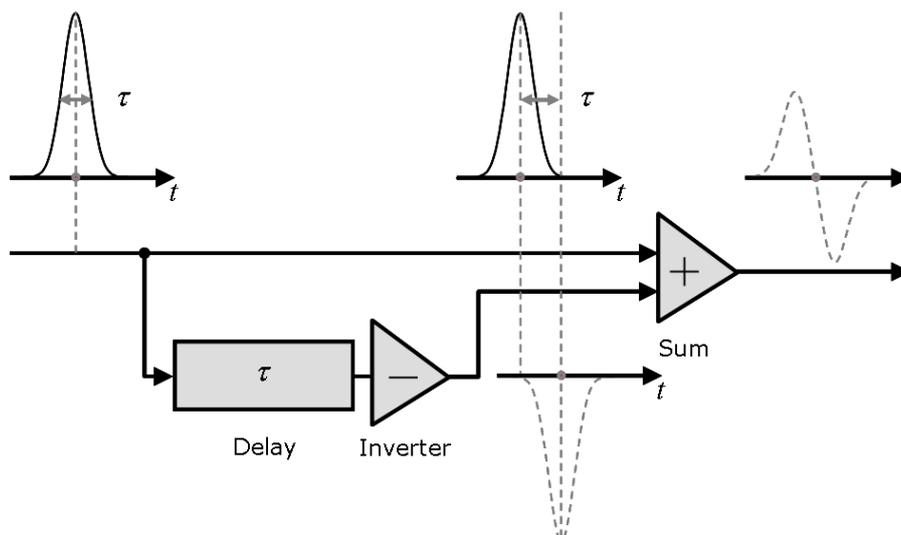


Abb. 4: Schematische Darstellung der Verfahrensschritte bei Constant-Fraction-Detection

Das kombinierte Signal  $s_{CFD}(t)$  besitzt einen Nulldurchgang bei  $t_{CFD}$  (Abb. 5)

$$s_{CFD}(t_{CFD}) = 0 \quad \text{mit} \quad s_{CFD}(t) = s(t) - s(t + \tau)$$

Der Wert  $t_{CFD}$  ist unempfindlich bezüglich der Pulsamplitude, hängt aber von der Form und Breite des Pulses ab. Ein geeigneter Wert für die Verzögerungszeit  $\tau$  ergibt sich aus der Pulsbreite bei halber Amplitudenhöhe (FWHM). Für symmetrische *Waveforms* liefert dieser traditionelle Algorithmus gute Entfernungsergebnisse. Für asymmetrische verrauschte *Waveforms* sollte das verzögerte Signal auch in der Zeit invertiert werden.

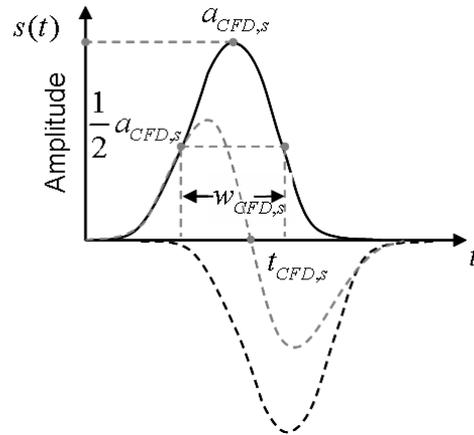


Abb. 5: Constant-Fraction-Detection

### 2.3.4 Center-of-Gravity-Detection

Zur Entfernungsmessung wird der zeitliche Schwerpunkt  $t_{CoG}$  der *Waveform* gewählt (Abb. 6). Den Wert für die Zeit (Entfernungswert) erhält man durch Integration der *Waveform*  $s(t)$ :

$$t_{CoG,s} = \frac{\int_{t_{CoG_1,s}}^{t_{CoG_2,s}} t s(t) dt}{\int_{t_{CoG_1,s}}^{t_{CoG_2,s}} s(t) dt}$$

Das Verfahren liefert bei geringem Rauschen gute Ergebnisse für Pulse mit variierenden Pulsamplituden und Pulsweiten. Für Pulse mit zu längeren Entfernungen verschobenen asymmetrischem Verlauf liefert das Verfahren geringfügig längere Entfernungen als solche, die mit Peak-Detection bestimmt wurden.

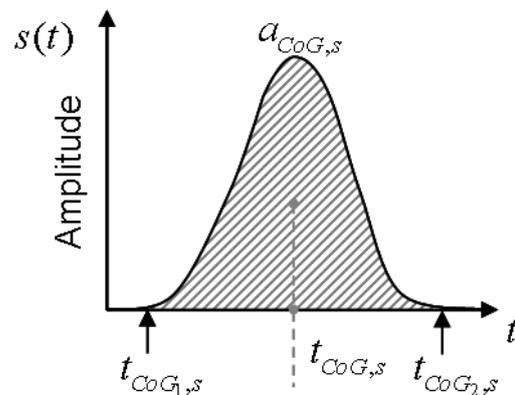


Abb. 6: Center-of-Gravity-Detection

### 2.3.5 Gaussian Decomposition

Nimmt man an, dass die *Waveform* einen gaußförmigen Verlauf hat, so können die Oberflächenattribute auch durch Schätzung der Parameter einer entsprechend angepassten Funktion extrahieren werden:

$$s(t) = a_{GD,s} \cdot \exp\left\{-4 \cdot \ln(2) \cdot \frac{(t - t_{GD,s})^2}{(w_{GD,s})^2}\right\}$$

Um parametrische Beschreibungen der Pulseigenschaften von Mehrfachreflektionen durchzuführen, wird eine Zerlegung der *Waveform* in Gaußfunktionen vorgenommen (Gaussian Decomposition). Hierzu sind verschiedene Methoden bekannt, z.B. das Expectation Maximation (EM) Verfahren (Persson et al., 2005) und Gauß-Newton oder Levenberg-Marquardt Verfahren (Hofton et al., 2000),(Jutzi & Stilla, 2006a),(Reitberger et al., 2006).

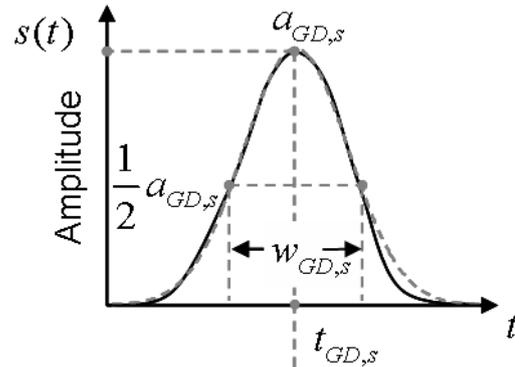


Abb. 7: Gaussian Decomposition

### 2.3.6 Entfaltung

Die Gewinnung von Attributen der beleuchteten Oberfläche durch Analyse der empfangenen *Waveform* ist eine schwierige Aufgabe, da verschiedene Prozesse auf das Aussehen der *Waveform* Einfluß haben. Die empfangene *Waveform*  $s(t)$  hängt von der gesendeten *Waveform*  $r(t)$ , der Impulsantwort des Empfängers, der räumlichen Strahlverteilung des Laserpulses und der Geometrie sowie den Reflexionseigenschaften der beleuchteten Oberfläche ab. Die Impulsantwort des Empfängers ist hauptsächlich durch die Photodiode und den Verstärker bestimmt, und für die räumliche Strahlverteilung kann häufig eine Gaußsche Verteilung angenommen werden. Nimmt man weiter an, dass der Empfänger aus einer idealen Photodiode besteht und der Verstärker eine unendliche Bandbreite mit linearem Verhalten besitzt, dann hängt die empfangene *Waveform*  $s(t)$  hauptsächlich von der gesendeten *Waveform*  $r(t)$  und den Eigenschaften der beleuchteten Oberfläche ab. Die 3D Charakteristik der Oberfläche kann man nun durch eine zeitabhängige Oberflächenrepräsentation beschreiben, die als Oberflächenantwort  $h(t)$  bezeichnet wird. In diesem Fall ergibt sich die empfangene *Waveform*  $s(t)$  aus

$$s(t) = h(t) * r(t),$$

wobei (\*) die Faltungsoperation ist. Durch Transformation von  $s(t)$  in den Fourierbereich und Lösung der sich ergebenden Gleichung für die spektrale Oberflächenfunktion  $\underline{H}(f)$  ergibt sich durch

$$\underline{H}(f) = \underline{S}(f) / \underline{R}(f).$$

Die Oberflächenantwort  $h(t)$  erhält man durch Transformation von  $\underline{H}(f)$  in den Zeitbereich. Durch Zerlegung der Oberflächenantwort in Gaußfunktionen gewinnt man dann die Oberflächenattribute. Die Entfaltung entfernt sozusagen die Charakteristik des gesendeten Signals von dem empfangenen Signal und ermöglicht so eine „bereinigte“ Beschreibung der beobachteten Oberfläche.

Für eine verlässliche Entfaltung ist ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) der empfangenen *Waveform* wichtig. Außerdem ist die *Waveform* mit hoher Bandbreite und entsprechender Abtastrate des Analog-Digital-Wandlers zu erfassen. Weiterhin ist zu erwähnen, dass große numerische Fehler abhängig vom Empfängerrauschen auftreten können. Ein Wiener Filter reduziert das Rauschen der zu bestimmenden Oberflächenantwort (Jutzi and Stilla, 2006a). Diese Vorgehensweise erlaubt die Unterscheidung von Entfernungsdifferenzen der Oberfläche (z.B. gegeben durch eine Stufe im Strahlengang), die kleiner als die Länge des Laserpulses ist (Abb.8). Experimente haben gezeigt, dass eine Stufe, die nur ein Zehntel der Pulslänge beträgt, noch aufgelöst werden kann.

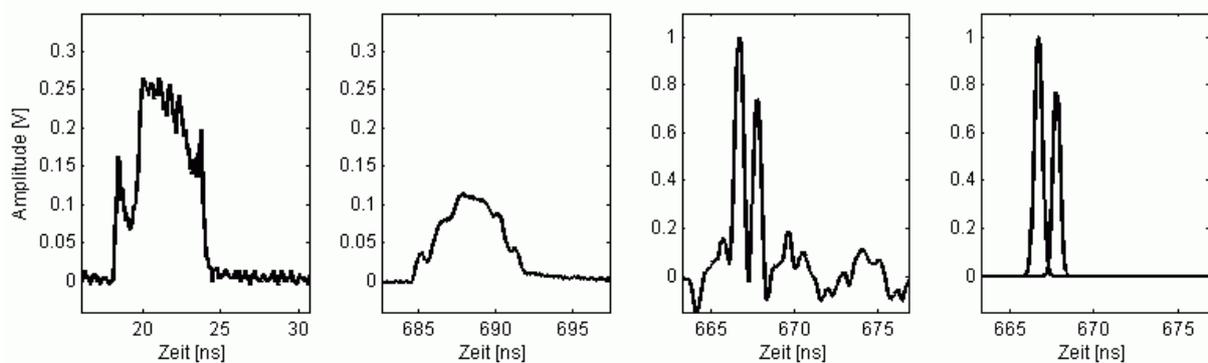


Abb. 8: Entfernungsmessung einer Stufe (15 cm) in 100m Entfernung durch Entfaltung und Gaussian Decompositio. a) Gesendete Waveform, b) Empfangene Waveform, c) Entfaltete Waveform, d) in Gaußfunktion zerlegte Waveform

## 2.4 Extraktion der Attribute

Ein Beispiel für einen Signalverlauf, in dem mehrere Pulse detektiert und analysiert wurden, ist in Abb. 9 dargestellt. Für jeden detektierten Puls wurden die Parameter der *Waveform* durch eine Zerlegung in Gaußkurven unter Verwendung des Verfahrens nach Levenberg-Marquardt geschätzt.

Schaut man sich die Entfernungswerte an, so sieht man, dass die Distanz zwischen dem ersten und letzten Puls ungefähr 10 m und zwischen dem dritten und vierten Puls ungefähr 2,5 m beträgt. Der dritte Puls zeigt die höchste Amplitude, und die Pulsweite von dem ersten und zweiten Puls ist geringfügig niedriger als von dem dritten und vierten Puls. Aufgrund der alleinigen Informationen zu Amplitude, Pulsweite und Entfernung ist es jedoch nicht möglich auf den Typ der im Strahl beleuchteten Oberfläche zu schließen. Um solche Zuordnungen treffen zu können, ist die Extraktion weiterer Informationen über die dreidimensionalen geometrischen Zusammenhänge von benachbarten Messungen nötig.

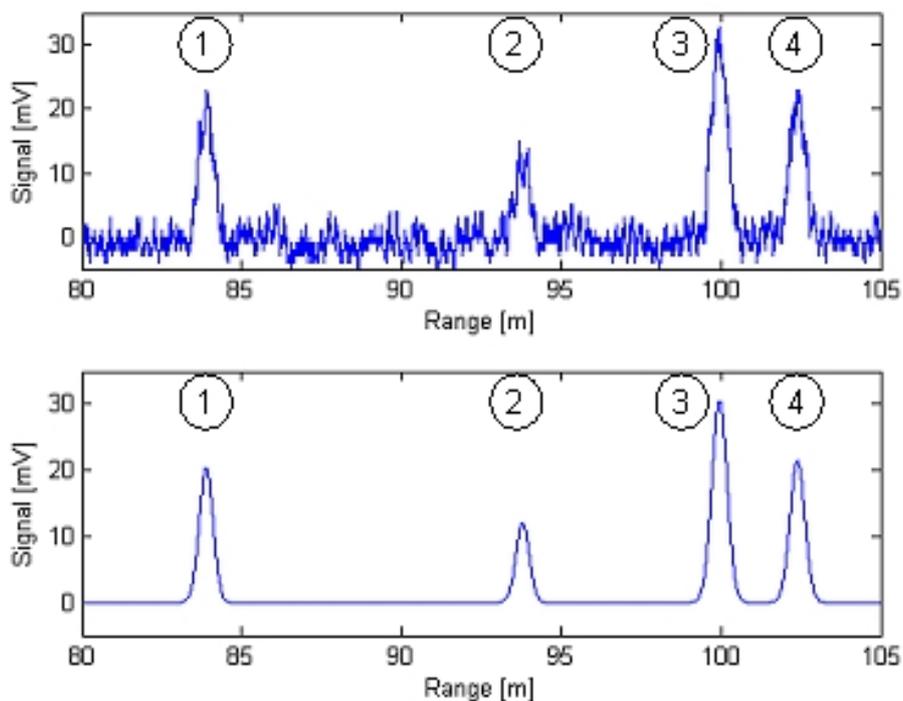


Abb. 9: Signalverlauf mit mehrfachen Reflektionen.

## 3 Anwendungen

Im Folgenden soll an Beispielen auf die Auswertung von *Full Waveform* Laserdaten eingegangen werden, nämlich zur Waldinventur (Reitberger et al., 2008) (Reitberger et al., 2009a) (Reitberger et al., 2009b) und zum terrestrischen Laserscanning (Kirchhof et al., 2007) (Stilla et al., 2007).

### 3.1 Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern

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.

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.

Auf Basis der Zerlegung von *Waveforms* konnte gezeigt werden, dass (i) Reflexionen 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. 10a und 10b) und (v) dominierte Bäume, d.h. Bäume in der Unterschicht, erfasst werden können. Die Untersuchungen unterstreichen damit deutlich, dass First/Last-Pulse-Systeme wegen der Detektionsmethode und der Totzone viele Reflexionen in der Baumstruktur ignorieren.

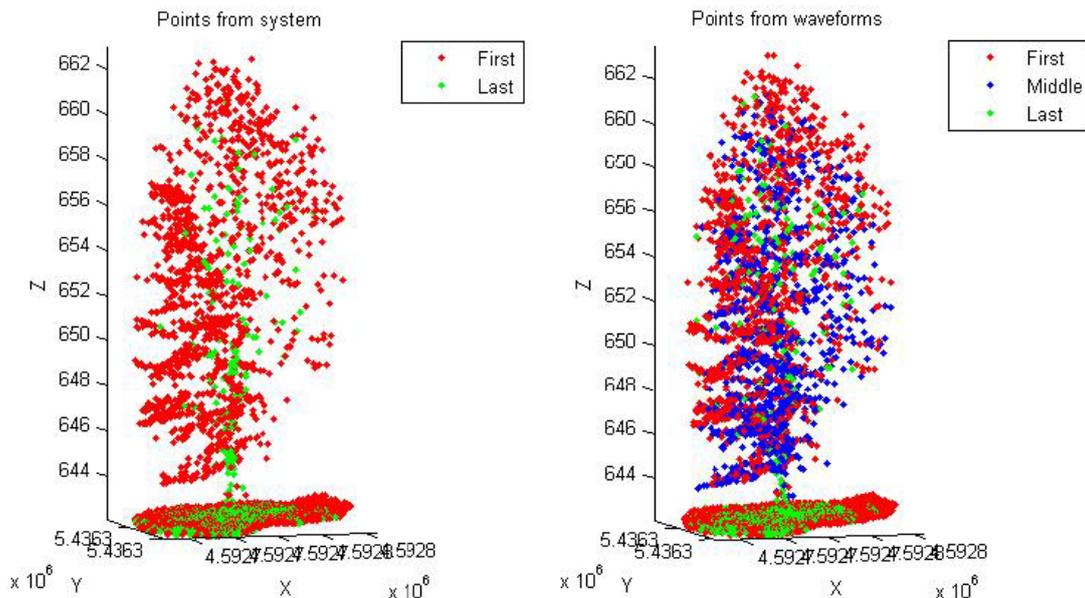


Abb. 10: Punktwolke für einen Einzelbaum a) First/Last Pulse Scanner b) Full Waveform Scanner

Die Abbildungen 11a und 11b zeigen eine Baumgruppe von zwei Fichten, die mit einem First/Last-Pulse-System (TopoSys Falcon II) und einem Full Waveform-System (Riegl LMS Q560) bei gleicher nominaler Punktdichte aufgenommen wurden. Die Baumkrone wird von dem Full Waveform-System mit einer wesentlich höheren räumlichen Punktdichte erfasst, da kurz hintereinander auftretende Reflektionen durch die Zerlegung der Waveform detektiert werden.

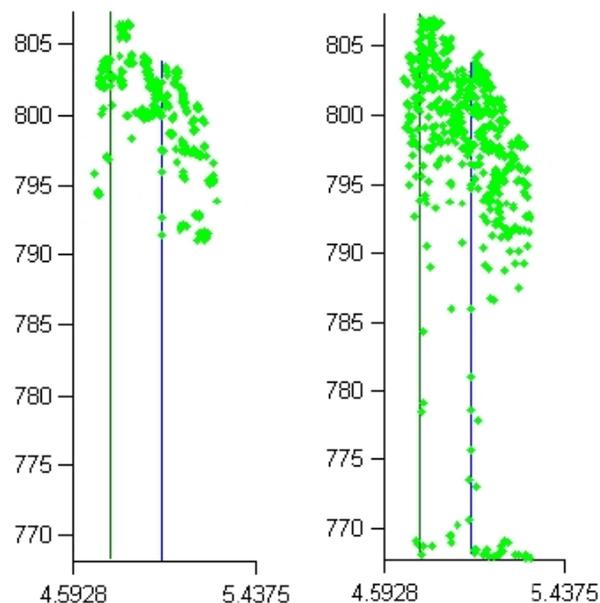
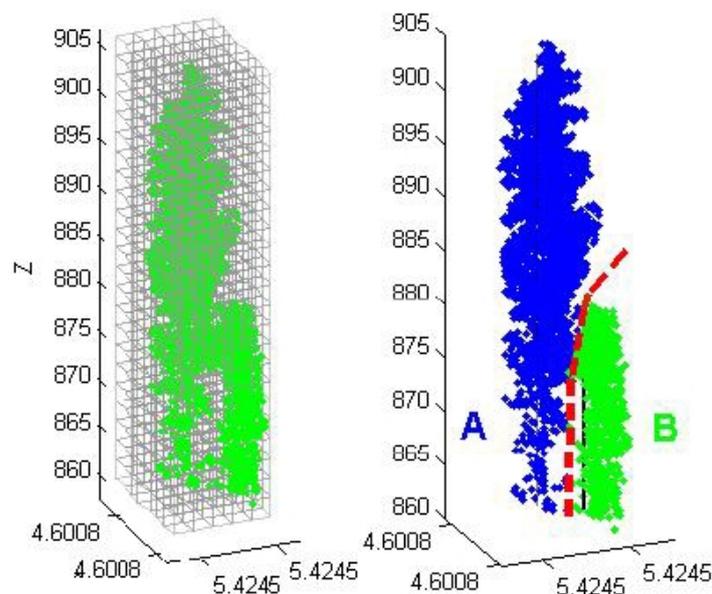


Abb. 11: Zwei Fichten, erfasst mit a) First/last-Puls, b) Full Waveform

Um die Punktwolken zu trennen und Einzelbäume in 3D zu segmentieren, wird die aus der Bildanalyse bekannte Normalized Cut Segmentierung in einem Voxelraum angewendet (Abb. 12). Die 3D Segmentierung nutzt die Positionen der Reflektionen sowie die Pulsbreite und die Pulsintensität 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 Aufteilung der Segmente wird über eine Kostenfunktion beschrieben. Die Ähnlichkeit zwischen den Voxeln wird durch Gewichte festgelegt, die eine Funktion der Punktverteilung und der Merkmalen sind, die man über Intensität und Pulsbreite berechnen kann. Eine Minimumslösung wird über ein korrespondierendes Eigenwertproblem gefunden (Reitberger et al., 2009a).



*Abb. 12: Voxelunterteilung und Segmentierung von 2 Bäumen*

Die 3D Segmentierung wird stark durch die a-priori Position von Bäumen gestützt, die wiederum durch eine vorgeschaltete Wasserscheidensegmentierung und Stammerkennung berechnet werden kann. Die Abbildung 13 zeigt 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“.

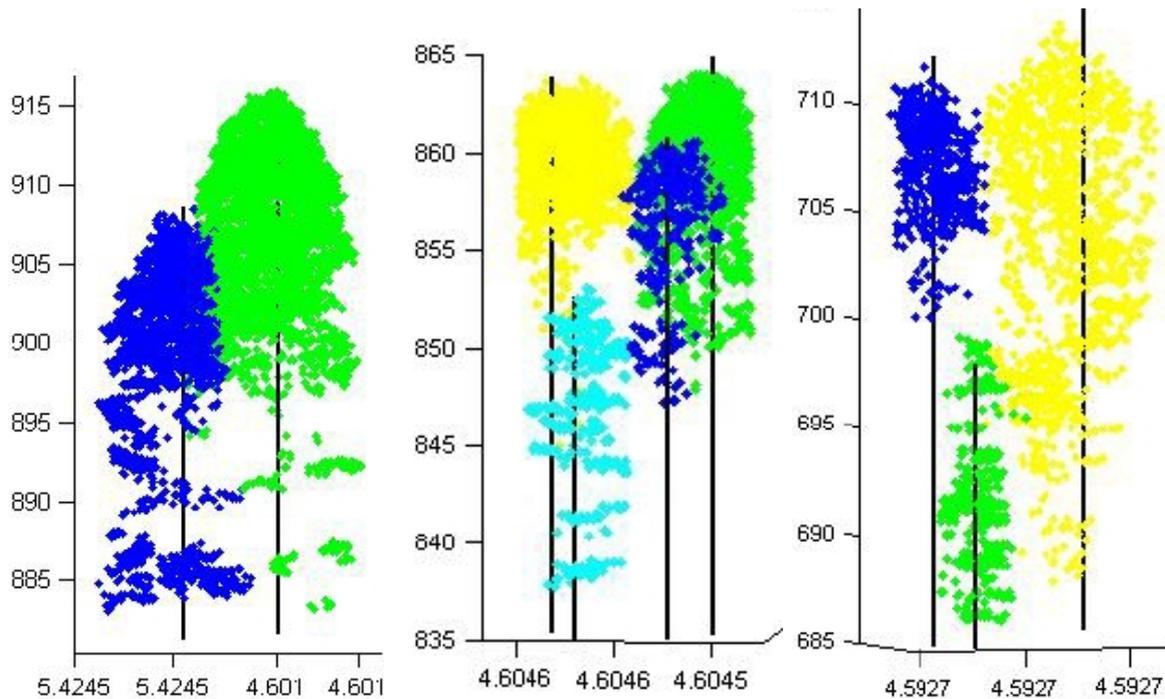


Abb. 13: Beispiele der Normalized Cut Segmentierung

### 3.2 Terrestrische Aufnahmen und erweiterte Prozessierung

Es ist bereits am vorherigen Beispiel gezeigt worden, dass bei einer *Full waveform* Analyse mehr Information extrahiert werden kann als bei klassischen analogen Pulsdetektionsmethoden, die lediglich Entfernungswerte liefern. Zunächst erlaubt die Aufzeichnung der empfangenen *Waveform* die Möglichkeit, offline verschiedene Methoden zur Bestimmung der Entfernung anzuwenden (siehe Kap. 2.3). Die Form des Pulses und das gesamte Signal kann zu einer genaueren Entfernungsbestimmung mit berücksichtigt werden. Weitere Verbesserungen ergeben sich durch Signalverarbeitungsmethoden, die auf der gesendeten und empfangenen *Waveform* basieren, wie etwa die Entfaltung (siehe Kap. 2.3.6).

Zusätzlich lassen sich aus der parametrischen Beschreibung der *Waveform* Attribute zur Charakterisierung der Oberfläche bestimmen (siehe Abb.14). Die Attribute „Maximale Amplitude“, „Fläche unter dem Puls“, „Pulsbreite“ und „Anzahl der Reflektionen“ können die Unterscheidung zwischen Volumenstreuern (Vegetation) und festen Objekten (z.B. man-made) unterstützen (Kirchhof et al., 2007).

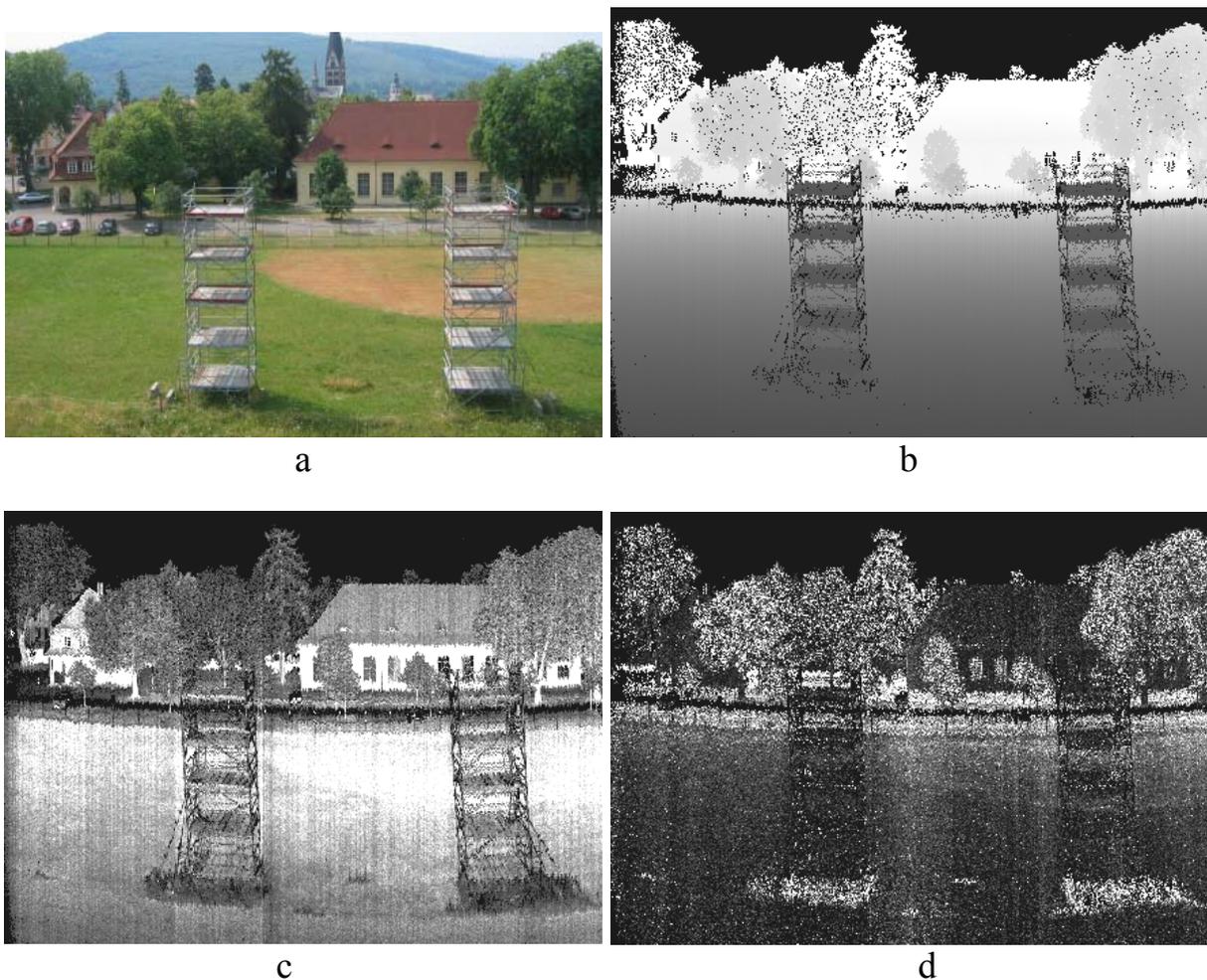


Abb. 14: Darstellung von *Waveform*-Attributen durch Grauwertbilder. a) Photo der Szene, b) Entfernung, c) Maximale Pulsamplitude, d) Pulsbreite.

In der vorhergehenden Darstellung wurden *Waveforms* ohne Berücksichtigung der Information benachbarter Messungen ausgewertet.

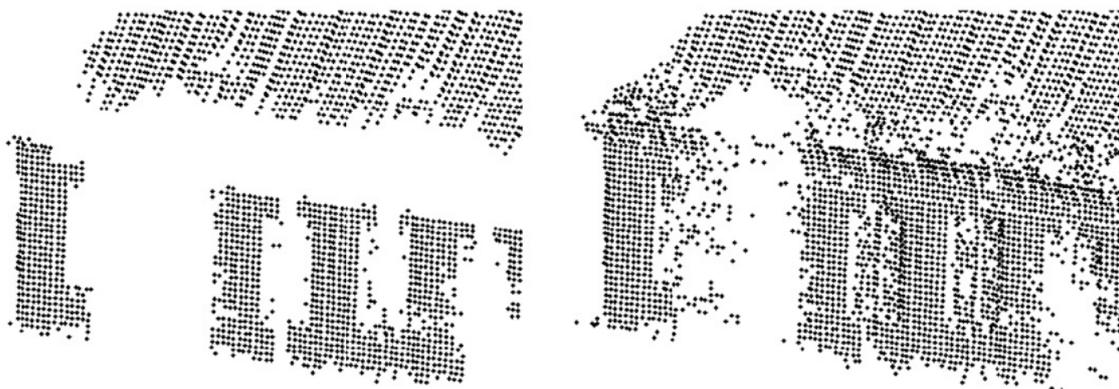
Zur Rekonstruktion von „man-made“-Objekten kann die Einführung und Überprüfung von Hypothesen zur Form der Oberfläche (z.B. eben oder gekrümmt) sehr effizient die Analyse einzelner *Waveforms* unterstützen. Dazu sollen zwei verschiedene Strategien, die in der lokalen Nachbarschaft eine ebene Form der Oberfläche annehmen und diese Annahme in die Signalverarbeitung einführen, erwähnt werden. Beide Strategien kombinieren Informationen top-down (Oberflächenprimitive) und bottom-up (Signalverarbeitung) für eine erweiterte Analyse von *Full Waveform*-Laserdaten.

Die erste Strategie (Kirchhof et al., 2007) benutzt eine iterative Verarbeitung von *Waveforms* unter Berücksichtigung einer vorhergesagten Form der *Waveforms*, die aus der Nachbarschaft abgeleitet wird. Zunächst wird eine Vorsegmentierung durchgeführt, um zwischen teilweise durchdringbaren Objekten (z.B. Bäume, Büsche) und nichtdurchdringbaren Oberflächen (z.B. Dach, Wand) zu unterscheiden (Abb. 15).



*Abb. 15: Vorsegmentierung der Punktwolke einer Szene. a) mit teilweise durchdringbaren Objekten, b) von planaren Oberflächen*

Es werden dann Entfernungswerte aus den vorsegmentierten Bereichen verwendet um automatisch Oberflächenprimitive (z.B. Ebenen) zu generieren. Dies erlaubt unter Berücksichtigung der Oberflächengeometrie der näheren Umgebung eine Verbesserung der einzelnen Entfernungswerte. So kann beispielsweise eine Pulsverformung beim Auftreffen der *Waveform* auf sehr schräg ausgerichtete Flächen bei der Entfernungsbestimmung mit berücksichtigt werden.



*Abb. 16: Punktwolke eines Gebäudes, teilweise verdeckt durch einen Baum. a) vor der Prozessierung, b) nach der Prozessierung*

Weiterhin werden teilweise verdeckte Flächen durch eine Vorhersage von erwarteten Entfernungswerten erweitert. Diese Vorhersage wird durch Berücksichtigung der Oberflächenneigung zur Schätzung der erwarteten *Waveform* weiter verfeinert. Erwartete *Waveforms* werden simuliert und mit den empfangenen *Waveforms* korreliert. Akzeptierte Punkte, die im ersten Verarbeitungsschritt durch eine schwache Pulsantwort gefehlt haben, werden der Punktwolke hinzugefügt. Die Prozedur wird mehrere Male wiederholt, bis alle geeigneten Entfernungswerte zur Schätzung der Oberfläche berücksichtigt sind (Abb. 16).

Die zweite Strategie (Stilla et al., 2007) benutzt eine neigungskompensierte Stapelung von *Waveforms*. Schwache aufgenommene Pulse mit einem niedrigen Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) bleiben bei klassischen Schwellwertmethoden unberücksichtigt und gehen verloren. In der Signal- und Bildverarbeitung gibt es verschiedene Stapeltechniken um das SNR zu verbessern. Zur Detektion von schwachen Laserpulsen werden Hypothesen für Ebenen mit verschiedenen Neigungen (z.B. Winkeldifferenz  $5^\circ$ ) aufgestellt. Entsprechend der Neigung der Hypothese wird die *Waveform* in der Entfernung relativ zur Nachbarschaft verschoben. Aus den verschobenen *Waveforms* dieser Nachbarschaft wird eine überlagerte *Waveform* des Stapels berechnet. Die Maxima der *überlagerten Waveforms* aller Hypothesen werden miteinander verglichen um eine der Hypothesen für eine spezielle Neigung der Ebene zu bestätigen. Daraufhin wird jede *Waveform* durch ein Ähnlichkeitsmaß bezüglich ihres Beitrags zur Stützung der Hypothese bewertet. Damit soll vermieden werden, dass einzelne Messungen, die nicht zur Hypothese beitragen, ignoriert und durch die Hypothese aus der Umgebung ersetzt werden.

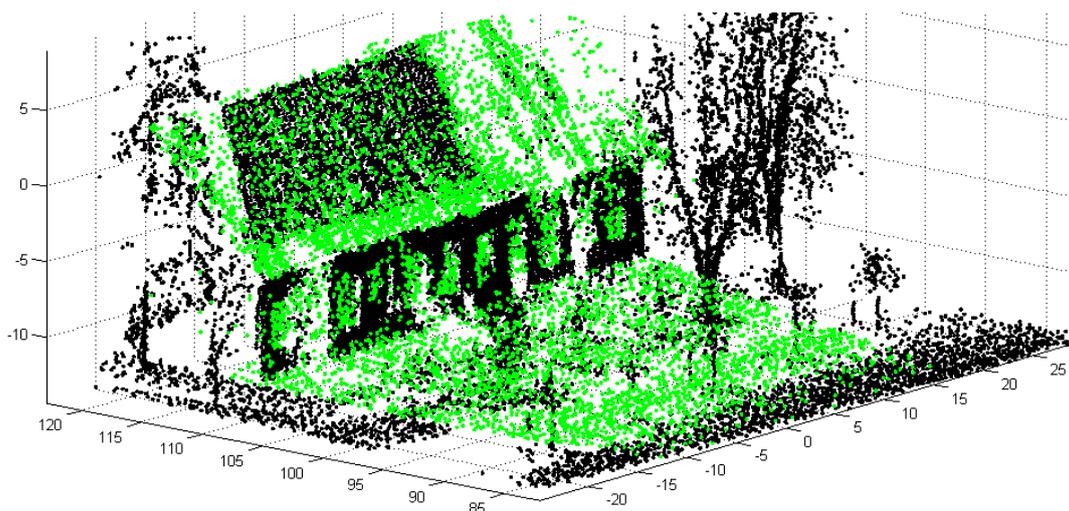


Abb. 17: Nach der Prozessierung Zusätzlich in die Punktwolke aufgenommene Punkte (grün).

Schließlich werden die *Waveforms* entsprechend ihrer Ähnlichkeitswerte durch zwei Schwellwerte klassifiziert und durch eine Ampel-Darstellung (rot, gelb, grün) visualisiert. Das Ergebnis enthält detektierte Entfernungswerte (grün), die aus der zuvor detektierten Punktwolke nicht vorhergesagt werden konnten.

Beide Strategien zeigen vielversprechende Ergebnisse, die zu einer Weiterführung der Arbeiten auf dem Gebiet der Analyse von *Full Waveform*-Daten ermutigen.

## Literatur

- Albertz J, Attwenger M, Barrett J, Casley S, Dorninger P, Dorrer E, Ebner H, Gehrke S, Giese B, Gwinner K, Heipke C, Howington-Kraus E, Kirk RL, Lehmann H, Mayer H, Muller J-P, Oberst J, Ostrovskiy A, Renter J, Reznik S, Schmidt R, Scholten F, Spiegel M, Stilla U, Waehlich M, Neukum G (2005) HRSC on Mars Express - Photogrammetric and Cartographic Research. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 71(10): 1153-1166.
- Blair JB, Rabine DL, Hofton MA (1999) The Laser Vegetation Imaging Sensor (LVIS): A Medium-Altitude, Digitization-Only, Airborne Laser Altimeter for Mapping Vegetation and Topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 (2-3): 112-122.
- Brenner AC, Zwally HJ, Bentley CR, Csatho BM, Harding DJ, Hofton MA, Minster JB, Roberts LA, Saba JL, Thomas RH, Yi D (2003) Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) - Derivation of Range and Range Distributions from Laser Pulse Waveform Analysis for Surface Elevations, Roughness, Slope, and Vegetation Heights. Algorithm Theoretical Basis Document - Version 4.1.
- Hofton MA, Minster JB, Blair JB (2000) Decomposition of Laser Altimeter Waveforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38 (4): 1989-1996.
- Jutzi B, Stilla U (2006a) Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(2):95-107 [doi:10.1016/j.isprsjprs.2006.09.001]
- Jutzi B, Stilla U (2006b) Characteristics of the measurement unit of a full-waveform laser system. Symposium of ISPRS Commission I: From Sensors to Imagery. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 1/A).
- Kamermann GW (1993) Laser Radar. In: Fox CS (ed) *Active Electro-Optical Systems, The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*. SPIE Optical Engineering Press, Michigan.

- Kirchhof M, Jutzi B, Stilla U (2007) Iterative processing of laser scanning data by full waveform analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62 [doi:10.1016/j.isprsjprs.2007.08.006]
- Mallet C, Bretar F (2009) Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 [doi:10.1016/j.isprsjprs.2008.09.007]
- Persson Å, Söderman U, Töpel J, Ahlberg S (2005) Visualization and Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanner Data. In: Vosselman G, Brenner C (eds) *Laserscanning 2005*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W19): 109-114.
- Reitberger J, Krzystek P, Stilla U (2008) Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1407-1431 [doi: 10.1080/01431160701736448]
- Reitberger J, Schnoerr Cl, Krzystek P, Stilla U (2009a) 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.04.002]
- Reitberger J, Krzystek P, Stilla U (2009b) First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern. 29. Wissenschaftliche-Technische Jahrestagung der DGPF. 355-364
- Spiegel, M., Stilla, U., Neukum, G. 2006. Improving the exterior orientation of Mars Express regarding different imaging cases. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(4).
- Steinvall O (2000) Effects of Target Shape and Reflection on Laser Radar Cross Sections. *Applied Optics* 39 (24): 4381-4391.
- Stilla U, Yao W, Jutzi B (2007) Detection of weak laser pulses by full waveform stacking. In: Stilla U, Meyer H, Rottensteiner F, Heipke C, Hinz S (eds) *PIA07 Photogrammetric Image Analysis 2007*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences, Vol 36(3/W49A):25-30
- Stilla U, Jutzi B (2008) Waveform Analysis for Small-Footprint Pulsed Laser Systems. In: *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 215-234
- Wuerlaender R, Eder K, Geist T (2004) High quality DEMs for glacier monitoring: Image matching versus laser scanning. In: Altan, M.O. (ed) *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 35, Part B7, 753-758.