



Full-Waveform-Laserscanning: Moment(e), da geht noch mehr!*)

Full-waveform laser scanning – wait some moment(s), it's getting better!

Andreas Roncat, Wien

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Full-Waveform-Laserscanning erlaubt es, sowohl geometrische wie auch radiometrische Information von Oberflächen in der gleichen räumlichen Auflösung zu erhalten, die noch dazu zeitgleich und vom selben Standpunkt erfasst wurden. Daher hat diese Datenerfassungsmethode innerhalb der letzten zehn Jahre eine wachsende Aufmerksamkeit in der 3D-Fernerkundung und verwandten Disziplinen erhalten. Diese radiometrische Information kann einerseits auf ein einzelnes Echo bezogen sein, oder andererseits auf die erfasste Oberfläche selbst, wie etwa der sogenannte Rückstreuquerschnitt. Echoparameter, welche meist durch eine Gauß'sche Zerlegung der Echowellenform bestimmt werden, sowie Oberflächeneigenschaften, die (geo-)physikalische Größen darstellen und daher unabhängig von den Parametern der Datenerfassung sind, werden zu den Zusatzattributen einer Laserscanning-3DPunktwolke gezählt.

Der Rückstreuquerschnitt wird gewöhnlich durch eine Rückfaltung ermittelt, deren Resultat die Ableitung des Rückstreuquerschnitts nach der Zeit darstellt, also den differentiellen Rückstreuquerschnitt. Der Rückstreuquerschnitt wird daher durch anschließende Integration errechnet. Bisher fand der zeitliche Verlauf des differentiellen Rückstreuquerschnitts wenig Beachtung in der Literatur. In diesem Artikel wird die Ableitung zusätzlicher Oberflächenparameter auf Basis der statistischen Momente des differentiellen Rückstreuquerschnitts behandelt. Simulierte Beispiele sowie Beispieldatensätze aus ausgedehnten Laserscanning-Kampagnen im hochalpinen Gebiet zeigen das Potential dieses Ansatzes auf.

Schlüsselwörter: Laserscanning/Lidar, Full-Waveform, radiometrische Kalibrierung, statistische Momente

Abstract

Full-waveform laser scanning allows for retrieval of geometric and radiometric information in the same spatial resolution. Moreover, this two-fold information is recorded simultaneously and from the same point of view. This method has therefore gained increasing attention in 3D remote sensing and related fields. Such radiometric information can both be related to a single echo and to the scanned surface itself, i. e. by the backscatter cross-section.

Echo parameters which are mostly determined by a Gaussian decomposition of the echo waveform as well as surface properties that are independent of the parameters of data acquisition, are regarded as additional attributes of a 3D laser scanning point cloud.

The backscatter cross-section is commonly determined by a deconvolution. Its result is the derivative of the backscatter cross-section w.r.t. time. The backscatter cross-section is therefore determined by subsequent integration. So far, the differential backscatter cross-section has gained only little attention in literature. This article treats the derivation of additional surface parameters based on statistical moments of the differential backscatter cross-section. Simulated examples accompanied by real-world examples stemming from extended laser scanning campaigns in alpine environments illustrate the potential of this method.

Keywords: Laser scanning/lidar, full-waveform, radiometric calibration, statistical moments

1. Einleitung

Eine Vielzahl von Anwendungen in unterschiedlichen Bereichen hat Bedarf nach hochaufgelöster dreidimensionaler topographischer Information. In diesem Feld hat sich flugzeuggetragenes Laserscanning (engl. Airborne Laser Scanning, ALS) im Verlauf der letzten zwei Jahrzehnte als

eine der meistgenutzten Methoden etabliert. Die dreidimensionale Erfassung, resultierend in einer 3D-Punktwolke, aus der unterschiedliche Folgeprodukte abgeleitet werden können, ergibt sich folgendermaßen [21]:

- Bestimmung der Entfernung zwischen Instrument und Ziel durch (Zwei-Weg-) Laufzeitmessung eines ausgesandten Laserpulses,
- Ablenkung des Laserstrahls, z. B. mit einer Spiegelvorrichtung,

*) Überarbeitete und ergänzte Version eines am 27. Oktober 2015 im Rahmen der Verleihung des Karl-Rinner-Preises und der OVG-Vortragsreihe in Graz gehaltenen Vortrags.

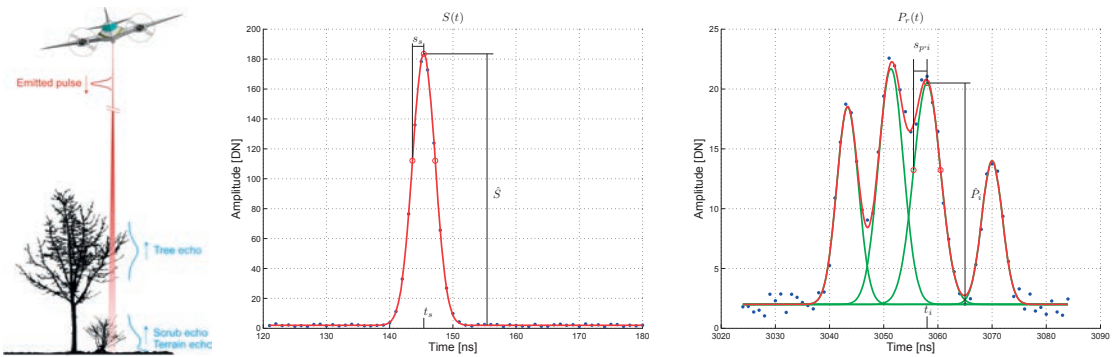


Abb. 1: Prinzip des Full-Waveform-Laserscannings (links), Wellenformen, die einen ausgesandten Laserpuls (Mitte) und seine Echos repräsentieren (rechts) [2]. Die einzelnen Echos sind durch die grünen Linien markiert.

■ Bewegung der Plattform, d. h. des Flugzeugs.

In diesem Artikel wird besonders auf die erste Komponente eingegangen. Die Bestimmung der dritten Komponente, also die Verortung des Laserstrahls und damit der 3D-Punkte, erfolgt mittels direkter Georeferenzierung. Hier kommen GNSS (Global Navigation Satellite Systems) und Inertialmesssysteme (engl. Inertial Measurement Units, IMU) zum Einsatz.

Das Prinzip des Full-Waveform-Laserscannings zielt primär darauf ab, eine genauere bzw. verlässlichere Entfernungsbestimmung im Post-Processing zu ermöglichen, als dies in Echtzeit vom Instrument geleistet werden kann. Full-Waveform (FWF) bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine abgetastete Wellenform sowohl des ausgesandten Laserpulses wie auch seines Echos gespeichert wird [18]. Jeder abgetastete Amplitudenwert der Wellenform besitzt einen Zeitstempel, der üblicherweise in Nanosekunden-Auflösung gegeben ist; siehe Abbildung 1. Somit liegt für das Post-Processing praktisch die selbe Information vor wie im Instrument zum Zeitpunkt der Aufnahme.

Woraus besteht nun diese Information genau? Die Wellenformen des ausgesandten Pulses $P_t(t)$ und seines Echos $P_e(t)$ werden üblicherweise im Bereich von 1–2 GHz abgetastet (siehe Abbildung 1); das entspricht einem räumlichen Abstand von ca. 7,5–15 cm. Je nach Hersteller und Gerät variiert die Bittiefe der aufgezeichneten Amplitudenwerte zwischen 8 und 12 Bit [3].

Genauer gesagt durchlaufen sowohl der ausgesandte Puls $P_t(t)$ wie auch sein Echo $P_e(t)$ eine Signalprozessierung im Gerät, bevor sie in abgetasteter Form als System-Wellenform $S(t)$ bzw. aufgezeichnete Echo-Wellenform $P_r(t)$ ver-

speichert werden [20]. Dies macht jedoch in der weiteren Betrachtung keinen Unterschied, wie in Kapitel 2 genauer beschrieben wird.

Das genannte Kapitel enthält weiters die Präsentation der radiometrischen Eigenschaften von FWF-Daten. Der darauffolgende Abschnitt behandelt die Extraktion statistischer Momente aus FWF-Daten. Kapitel 4 zeigt Beispiele für simulierte Fälle und für Ausschnitte aus realen FWF-ALS-Kampagnen. Das Kapitel 5 enthält die Schlussbetrachtungen.

2. Theorie

In diesem Kapitel werden die mathematisch-physikalischen Zusammenhänge in Bezug auf FWF-Laserscanning präsentiert. Für die genauen Herleitungen sei auf [12] und [19] verwiesen.

Die Radar-Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen dem ausgesandten Puls $P_t(t)$ und seinem Echo $P_e(t)$ [4, 20]. Bei N Zieloberflächen, die von einem Laserpuls erfasst werden, ergibt sich

$$P_e(t) = \frac{D_r^2}{4\pi\beta_t^2} \eta_{SYS} \eta_{ATM} \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i^4} P_t(t) \otimes \sigma'_i(t). \quad (1)$$

Ein praktisch identer Zusammenhang besteht zwischen System-Wellenform $S(t)$ und der aufgezeichneten Echo-Wellenform $P_r(t)$, nämlich

$$P_r(t) = \frac{D_r^2}{4\pi\beta_t^2} \eta_{SYS} \eta_{ATM} \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i^4} S(t) \otimes \sigma'_i(t),$$

da beide durch Faltung (Operator „ \otimes “) mit einer Geräte-Übertragungsfunktion $\Gamma(t)$ aus der jeweilig zuerstgenannten Funktion entstehen [20]. Die weiteren Größen in der Radargleichung sind

- die Entfernung R_i [m] zwischen Instrument und Ziel,

- der Durchmesser der Empfängeroptik D_r [m],
- der Öffnungswinkel des ausgesandten Laserstrahls β_t [rad],
- der differentielle Rückstreuquerschnitt eines Ziels $\sigma'_i(t)$ [m],
- der atmosphärische Transmissionsfaktor η_{ATM} [0...1] und
- der System-Transmissionsfaktor η_{SYS} [0...1] des Instruments.

Widmen wir uns näher dem differentiellen Rückstreuquerschnitt $\sigma'(t)$. Er stellt die in geometrischer wie physikalischer Hinsicht genaueste Information dar, die ein Ziel auf Basis eines einzelnen Laserpulses von sich zu „erkennen“ gibt. Mit Hilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit v [m/s] des Lasers lässt sich σ' auch in Abhängigkeit der Entfernung R und in der Dimension einer Länge [m] darstellen. Da t die Zwei-Weg-Laufzeit ist, gilt $R = (vt)/2$ bzw. $dR = v/2 dt$. Das Integral von σ' ,

$$\sigma := \int \sigma'(t) dt = \frac{2}{v} \int \sigma'(R) dR, \quad (2)$$

ist der Rückstreuquerschnitt σ [m²], welcher die Dimension einer Fläche besitzt. Der Zusammenhang zwischen σ und der Reflektivität ρ der Zieloberfläche ist durch

$$\sigma := \frac{4\pi}{\Omega_S} \rho A_L \cos \vartheta$$

gegeben, wobei Ω_S [sr] der effektive Raumwinkel der Streuung auf der Zieloberfläche ist, A_L die Fläche normal zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls am Ziel und ϑ der Winkel zwischen dem Laserstrahl und der Normale der Zieloberfläche, siehe Abbildung 2. Im Falle eines diffusen Reflexionsverhaltens ist der effektive Raumwinkel $\Omega = \pi$.

Ein wesentliches Element der Radargleichung ist der erwähnte Faltungsoperator \otimes . Eine Faltung zweier Funktionen ist kommutativ und entspricht dem gleitenden Integral des Produktes dieser Funktionen. Ein aus dem Alltag bekannter Vorgang, der mathematisch als Faltung beschrieben werden kann, ist das Fokussieren bzw. Defokussieren mit einer Kamera.

Diese Analogie ist auch im FWF-Laserscanning zulässig: Die aufgezeichnete Echo-Wellenform $P_r(t)$ enthält also den differentiellen Rückstreuquerschnitt $\sigma'_i(t)$, allerdings wegen der zeitlichen Dauer der System-Wellenform $S(t)$ mit einer gewissen Unschärfe behaftet. Man ist daher daran interessiert, diese Unschärfe weitestgehend zu eliminieren und somit in geometrischer Hinsicht

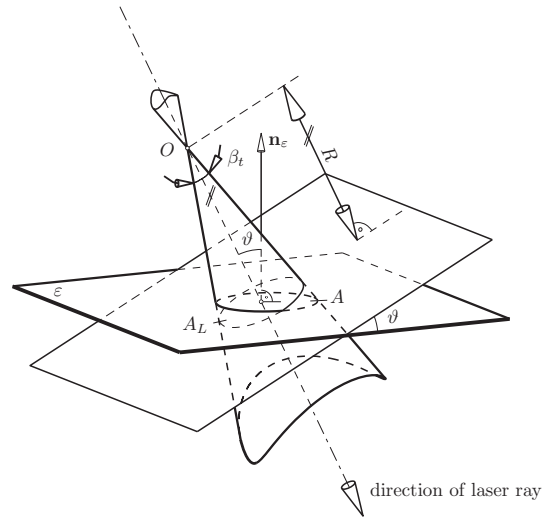


Abb. 2: Geometrische Größen, die für das FWF-Laserscanning relevant sind [16]: Entfernung R [m], Einfallswinkel ϑ , Öffnungswinkel β_t des Laserstrahls, Querschnittsfläche A_L [m²] und beleuchtete Fläche A [m²] auf der Zieloberfläche

(a) eine repräsentative Laufzeit, damit Entfernung und Ort für das Ziel abzuleiten, (b) eine Aussage über die räumliche Ausdehnung des Ziels in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls zu treffen, sowie in physikalischer Hinsicht (c) Rückschlüsse über die Oberflächenreflektivität des Ziels ziehen zu können.

Die Methode, einen Faltungsoperanden aus dem Ergebnis der Faltung zu eliminieren und somit die Faltung quasi rückabzuwickeln, nennt man *Rückfaltung* (Operator „ \otimes^{-1} “). Dabei handelt es sich um ein im mathematischen Sinne unterbestimmtes Problem; eine Lösung bedarf daher noch zusätzlicher Annahmen. Die im Feld des FWF-Laserscannings wohl bekannteste und am meisten verwendete Rückfaltungsmethode ist die Gauß'sche Zerlegung (engl. Gaussian Decomposition) [20]. Hier werden in einer nicht-linearen Optimierung für System-Wellenform und aufgezeichnete Echo-Wellenform Superpositionen von Gauß-Funktionen, d.h. skalierte Normalverteilungen, angenommen und deren Parameter ermittelt. Das Ergebnis einer solchen Gauß'schen Zerlegung ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Skalierungsfaktor wird meist in abgewandelter Form als Amplitude angegeben. Die Rückfaltung basiert auf der Tatsache, dass die Faltung zweier (skalierter) Normalverteilungen wieder eine (skalierte) Normalverteilung ergibt, wobei sich

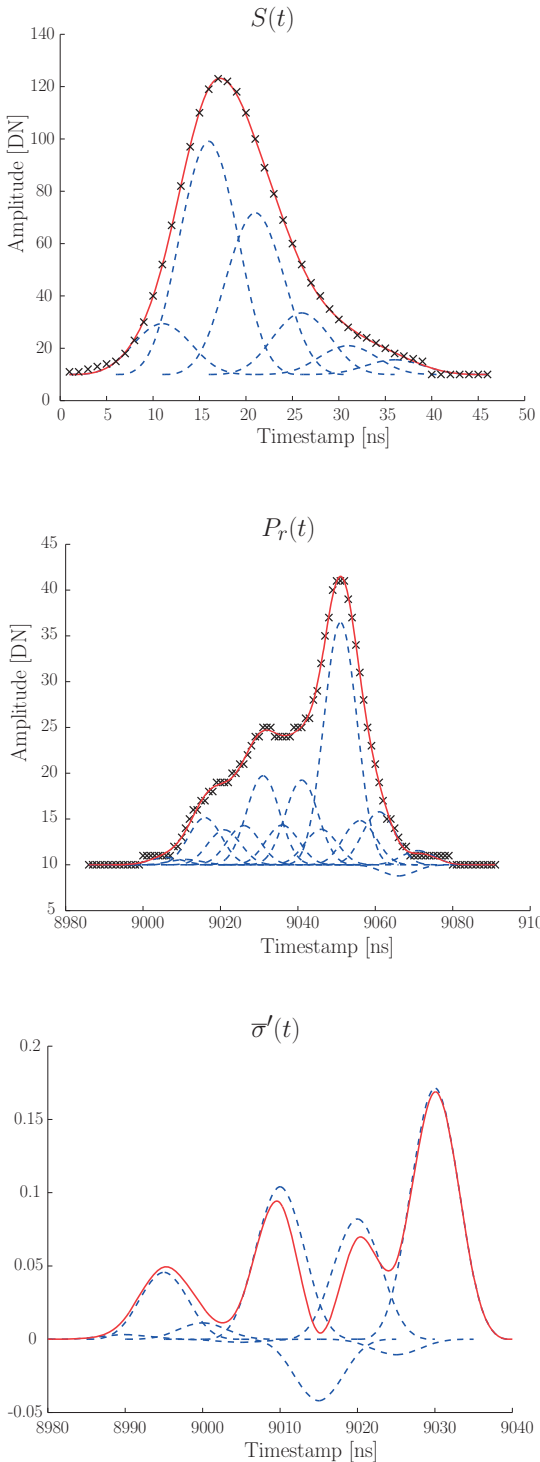


Abb. 3: Beispiel einer Rückfaltung mit uniformen B-Splines [16]. Oben: System-Wellenform $S(t)$; Mitte: aufgezogene Echo-Wellenform $P_r(t)$; unten: Ergebnis der Rückfaltung, $\sigma'(t) = P_r(t) \otimes^{-1} S(t)$.

- die Mittelwerte der Operanden addieren,
- die Varianzen der Operanden ebenfalls addieren und
- die Skalierungsfaktoren multiplizieren.

Somit ist die Rückfaltung implizit durch einfache Subtraktion und Division lösbar; allerdings werden sehr strikte Annahmen betreffend die Symmetrie der System-Wellenform und des differentiellen Rückstreuquerschnitts getroffen.

Weiters seien aus der Literatur im Bereich des FWF-Laserscannings die Rückfaltung mittels uniformer B-Splines [13], die Rückfaltung mittels Wiener-Filter [6] und die EM-Rückfaltung (Expectation/Maximization) [10] erwähnt. Ein Beispiel für die Rückfaltung eines komplexen FWF-ALS-Signals mittels uniformer B-Splines ist in Abbildung 3 dargestellt.

Für die Ermittlung des Rückstreuquerschnitts σ bzw. der Oberflächenreflektivität ρ ist neben der Rückfaltung noch die Bestimmung einer Kalibrierkonstanten notwendig. In dieser werden jene Größen, die zwar unbekannt sind, aber für eine ALS-Kampagne bzw. zumindest für einen Flugstreifen als konstant betrachtet werden können, in der Radargleichung zusammengefasst [19]. Die Bestimmung dieser Konstanten erfolgt gewöhnlich über Schätzung bzw. In-Situ-Messung der Reflektivitätswerte homogener Oberflächen [1, 7, 20].

3. Statistische Momente

Die zuvor erwähnte Methode der Gauß'schen Zerlegung kann auch von einem statistischen Standpunkt aus betrachtet werden. Mit dieser Methode wird eine repräsentative Entfernung und damit der Ort eines Zieles aus dem Mittelwert μ des Ergebnisses der Rückfaltung abgeleitet. Der Mittelwert ist allgemein das *erste statistische Moment* einer Verteilungsfunktion. Hat eine reellwertige Funktion nur positive Werte und ist ihr Integral beschränkt, so lässt sich aus ihr durch Normierung mit diesem Integral eine Verteilungsfunktion ermitteln und somit auch deren Mittelwert berechnen. Im Falle von σ' ist das erste Kriterium durch physikalische Notwendigkeit gegeben; die Normierung erfolgt mittels Division durch σ .

Also ergibt sich für den Mittelwert:

$$\mu = m_1 := \frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} R \sigma'(R) dR. \quad (3)$$

Die zentralen Momente \bar{m}_n höherer Ordnung ergeben sich aus

$$\bar{m}_n := \frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} (R - m_1)^n \sigma'(R) dR, \quad (4)$$

wobei in der Gauß'schen Zerlegung ebenfalls das Moment zweiter Ordnung, die Varianz $s^2 = \bar{m}_2$, als Maß für die Breite ermittelt wird¹⁾. Diese Größe ist unter Anderem ein wichtiger Parameter, um Boden- von Nicht-Bodenpunkten zu unterscheiden [9].

Gauß-Funktionen sind mit Mittelwert, Varianz und Skalierungsfaktor bereits vollständig beschrieben, d.h., die zentralen Momente höherer Ordnung enthalten keine weitere Information mehr. Für Ziele, deren differentieller Rückstreuquerschnitt nicht einer Gauß-Funktion entspricht, sind jedoch etwa noch die Schiefe γ und die Wölbung κ von Interesse, die sich aus den zentralen Momenten dritter bzw. vierter Ordnung folgendermaßen ergeben:

$$\gamma = \frac{\bar{m}_3}{s^3}, \quad \kappa = \frac{\bar{m}_4}{s^4}. \quad (5)$$

Zu den drei weiteren Rückfaltungsmethoden, die im vorigen Abschnitt erwähnt wurden, ist betreffend Berechnung der statistischen Momente zu sagen, dass

- die Rückfaltung mittels uniformer B-Splines stückweise stetige Polynomfunktionen ergibt; die Momente lassen sich also analytisch berechnen;
- die Rückfaltung mittels Wiener-Filter diskrete Werte ergibt; für die Berechnung der Momente muss das Integral durch eine Summe ersetzt werden;
- die EM-Rückfaltung darauf abzielt, als Ergebnis eine Serie von diskreten „Spikes“ zu erhalten, von denen jeder für ein Ziel steht. Eine Berechnung statistischer Momente höherer Ordnung ist also nicht als gewinnbringend zu erachten.

Im folgenden Abschnitt werden statistische Momente für verschiedene Typen von Zieloberflächen genauer untersucht.

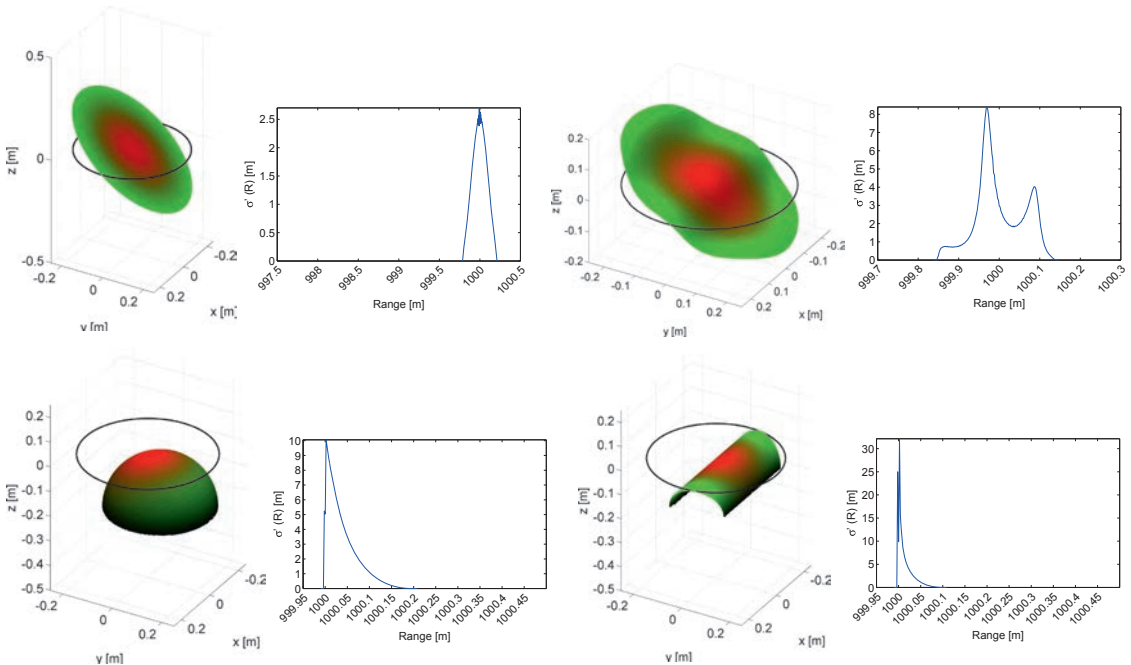


Abb. 4: Beispiele des differentiellen Rückstreuquerschnitts für ein ebenes (links oben), sinusoidales (rechts oben), kugelförmiges (links unten) und zylindrisches Ziel (rechts unten). In der linken Abbildung ist jeweils die lokale Beleuchtungs- und Reflektivitätssituation dargestellt.

1) Gewöhnlich wird als zusätzliches Attribut pro 3D-Punkt die Wurzel der Varianz, die Standardabweichung s , der aufgezzeichneten Echo-Wellenform angegeben.

4. Beispiele und Ergebnisse

Um zu ermitteln, wie der differentielle Rückstreuquerschnitt und seine statistischen Momente für verschiedene Oberflächen aussehen, wurden als einfache Beispiele Kugeln, Zylinder und (geteilte) Schrägebenen gewählt. Diese verdeutlichen die Unterschiede im Rückstreuverhalten von punktförmigen, linienförmigen bzw. flächig ausgedehnten Zielen (größer als der Querschnitt des Laserstrahls). Als vierten Oberflächentyp mit etwas komplexerer Reflexionscharakteristik betrachten wir noch sinusoidale Oberflächen.

In der Simulation wurden die geometrischen Parameter der Ziele variiert, d.h. ihre Größe sowie ihre Position und Ausrichtung zum Laserstrahl. Dieser wiederum wurde mit einer normalverteilten Strahlungsdichte modelliert, d.h. die Strahlungsdichte nimmt von der Mitte des Laserstrahls nach außen ab. Dies ist vor allem für das Fernfeld, also große Entfernungen zwischen Instrument und Ziel typisch [5].

Die in Abbildung 4 dargestellten Beispiele zeigen, dass nur für Schrägebenen eine Gauß-Form von σ' vorliegt; Kugel und Zylinder zeigen starke

Asymmetrien, während sinusoidale Oberflächen multimodale Formen für σ' aufweisen können. Für eine detaillierte Übersicht sei auf [12] verwiesen.

Wie bereits erwähnt, ist σ' für ebene Ziele gaußförmig, d.h. nur die Varianz bzw. deren Wurzel, die Standardabweichung s , ist im Fall eines ausgedehnten ebenen Zieles aussagekräftig; siehe Abbildung 5. Die Schiefe ist in allen Fällen Null, während die Wölbung von der Distanz der zwei Halbebenen zueinander abhängt, nicht aber vom Winkel ϑ zwischen Ebene und Laserstrahl. Im Falle einer getrennten Analyse der Anteile der beiden Halbebenen wäre auch hier wieder eine konstante Wölbung zu verzeichnen. Der Rückstreuquerschnitt σ hängt von $\cos \vartheta$ ab, nicht aber vom Abstand Δz der Halbebenen zueinander, wenn $\Delta z \ll R$.

Kugel- und zylinderförmige Ziele besitzen einen umso höheren Rückstreuquerschnitt, je näher sie an der Achse des Laserstrahls liegen, und je größer ihr Radius ist. Beide Kriterien zusammengekommen entsprechen der Annäherung an eine rechtwinklig zum Laserstrahl ausgerichtete Ebene; dies lässt sich auch gut in der Entwicklung der Standardabweichung in den Abbildungen 6 und 7

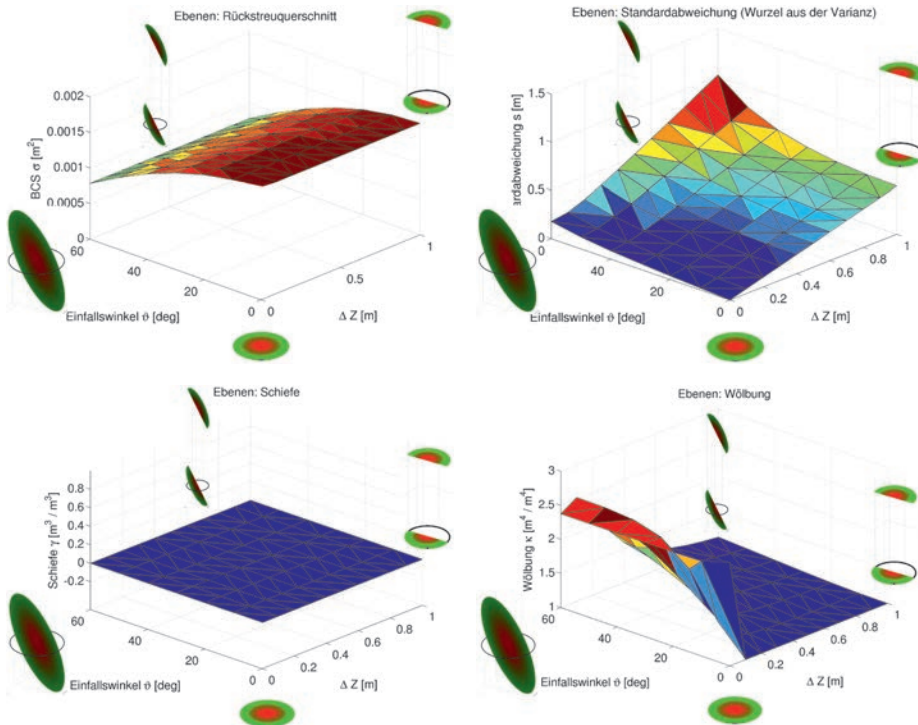


Abb. 5: Rückstreuquerschnitt σ [m^2] (links oben), Standardabweichung (rechts oben), Schiefe (links unten) und Wölbung (rechts unten) für ebene Ziele

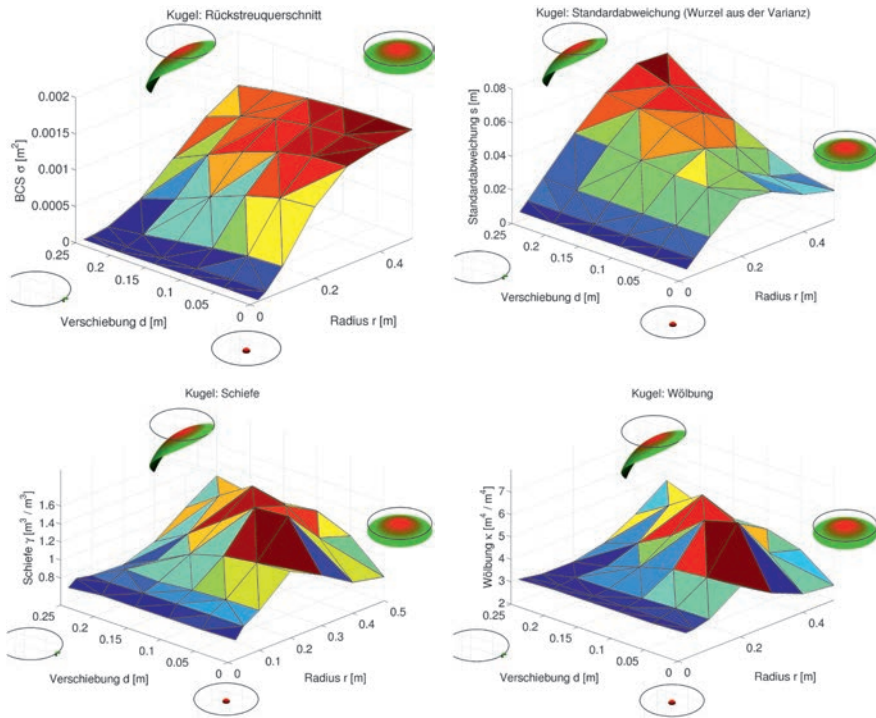


Abb. 6: Rückstreuquerschnitt σ [m^2] (links oben), Standardabweichung (rechts oben), Schiefe (links unten) und Wölbung (rechts unten) für kugelförmige Ziele

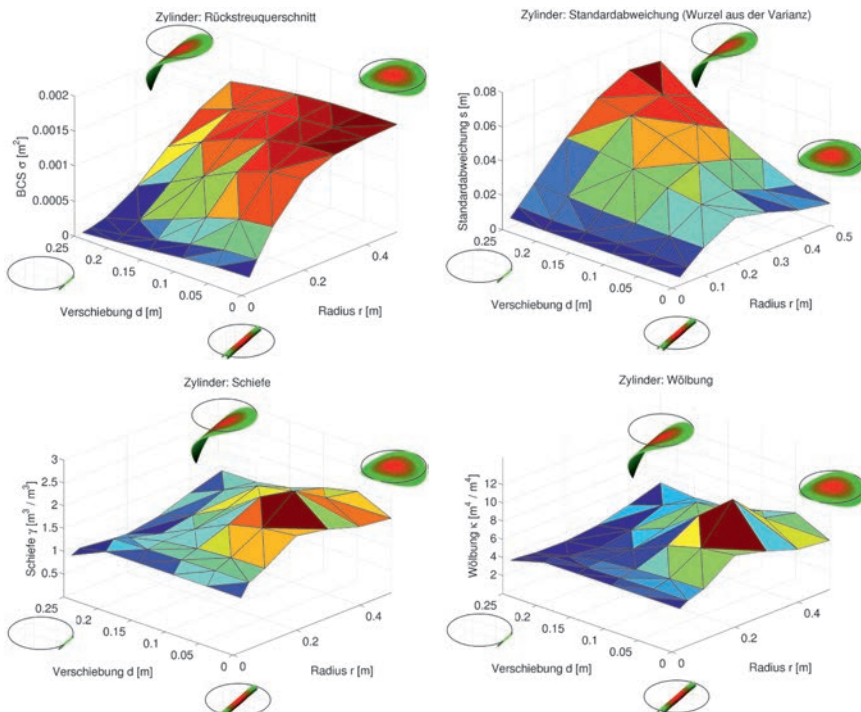


Abb. 7: Rückstreuquerschnitt σ [m^2] (links oben), Standardabweichung (rechts oben), Schiefe (links unten) und Wölbung (rechts unten) für zylindrische Ziele

erkennen. Schiefe und Wölbung ergeben sich hingegen aus einer komplexeren Kombination von Lage und Radius der Kugeln bzw. Zylinder, die auch lokal die Rückstreuung beeinflussen. Für beide Oberflächentypen ergibt sich für alle untersuchten Konfigurationen eine positive, d. h. eine Rechtsschiefe. Dadurch, dass ein Zylinder zumindest ein linienförmiges Ziel darstellt, sind diese Effekte für Zylinder weniger stark ausgeprägt als für Kugeln, welche bei kleinen Radien genähert punktförmigen Zielen entsprechen.

Der Fall der Halbebenen sowie der in Abbildung 3 dargestellte Fall werfen die Frage auf, wie mit Zielen zu verfahren ist, die einen Verlauf von $\sigma'(t)$ mit mehreren lokalen Maxima aufweisen. Zieht man auch die lokalen Minima zwischen diesen Maxima in Betracht, so bietet sich folgende Methode an [14]:

1. Unterteilung von $\sigma'(t)$ an lokalen Minima,
2. Berechnung von σ_i zwischen den Minima,
3. Normierung von $\sigma'_i(t)$ mittels Division durch σ_i ,
4. Berechnung des Mittelwertes (und damit der Entfernung) und höherer statistischer Momente für die normierten $\sigma'_i(t)$.

Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 8 exemplarisch für das Beispiel aus Abbildung 3 dargestellt.

Ein weiteres praktisches Beispiel ist einer FWF-ALS-Kampagne entnommen, die 2010 über den Öztaler Alpen durchgeführt wurde. Ein Ausschnitt eines Flugstreifens über Obergurgl wurde dabei näher untersucht [14]. Es ergab sich, dass der Rückstreuquerschnitt σ und die Varianz s^2 von σ'

besonders aufschlussreich waren; insbesondere ließen sich

- bebaute Flächen (Rückstreuquerschnitt sehr niedrig, Varianz niedrig),
- niedrige hochalpine Vegetation (Rückstreuquerschnitt niedrig, Varianz niedrig),
- hohe Vegetation (Rückstreuquerschnitt niedrig, Varianz hoch) und
- Grasland (Rückstreuquerschnitt hoch, Varianz niedrig)

rein aufgrund dieser zwei Parameter gut voneinander unterscheiden; siehe Abbildung 9. Weiters ergab sich eine merkliche Rechtsschiefe in hoher Vegetation, allerdings auch hohes Rauschen in der Schiefe für die anderen Bereiche.

Als beispielhaftes Detail aus diesem Datensatz sei abschließend eine Wellenform herausgegriffen, welche sowohl ein Echo enthält, das von einem „linearen“ Ziel stammt (Seilbahnseil der Hohe-Mut-Bahn), wie auch ein Echo eines flächigen Zieles (Boden; siehe Abbildung 10). Beide Echo-Wellenformen tragen die System-Wellenform „in sich“ und somit auch ihre Breite, die beim verwendeten Gerät, Optech ALTM 3100, ca. 5 ns beträgt (Standardabweichung s). Um dies zu verdeutlichen und damit die Motivation für Rückfaltung radiometrische Kalibrierung zu geben, zeigt Abbildung 11 ein ähnliches Beispiel (Freilandleitung in Zermatt/Schweiz), das jedoch mit einem anderen Gerät aufgenommen wurde, welches mit einer deutlich schmälere System-Wellenformen arbeitet (RIEGL LMS-Q680i, [11]); die Standardabweichung s beträgt für dieses Gerät ungefähr 1.7 ns.

5. Schlussbemerkung

Die Beispiele in diesem Artikel zeigen, dass bereits einfache Oberflächentypen im Sinne ihres differentiellen Rückstreuquerschnitts sich nicht mehr als symmetrisch annehmen lassen, und daher eine Motivation für die Untersuchung höherer statistischer Momente gegeben ist. Hierzu ist aber anzumerken, dass in der aufgezeichneten Wellenform oft die zeitliche Länge der System-Wellenform dominiert und somit die Bestimmung der statistischen Momente in hohem Rauschen resultieren kann.

Eine Möglichkeit, dies zu überwinden, stellt die Aggregation (Aufsummieren) von Wellenformen dar, deren Laserpulse aufeinanderfolgend und in ähnliche Richtung ausgesendet wurden. Solche Aggregationen (engl. Stacking) finden in der Geophysik schon seit längerem breite Anwendung

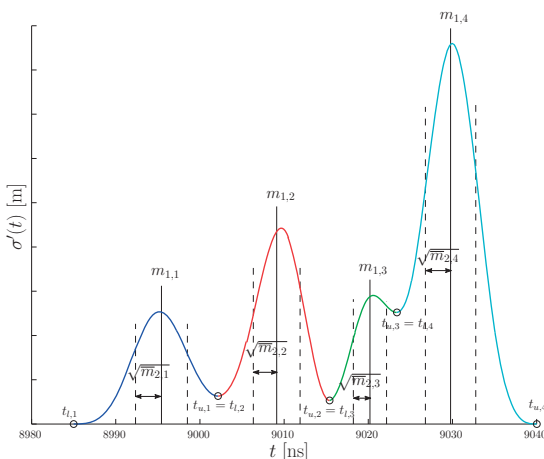


Abb. 8: Berechnung der Mittelwerte und Varianzen für das Beispiel von $\sigma'_i(t)$ aus Abbildung 3

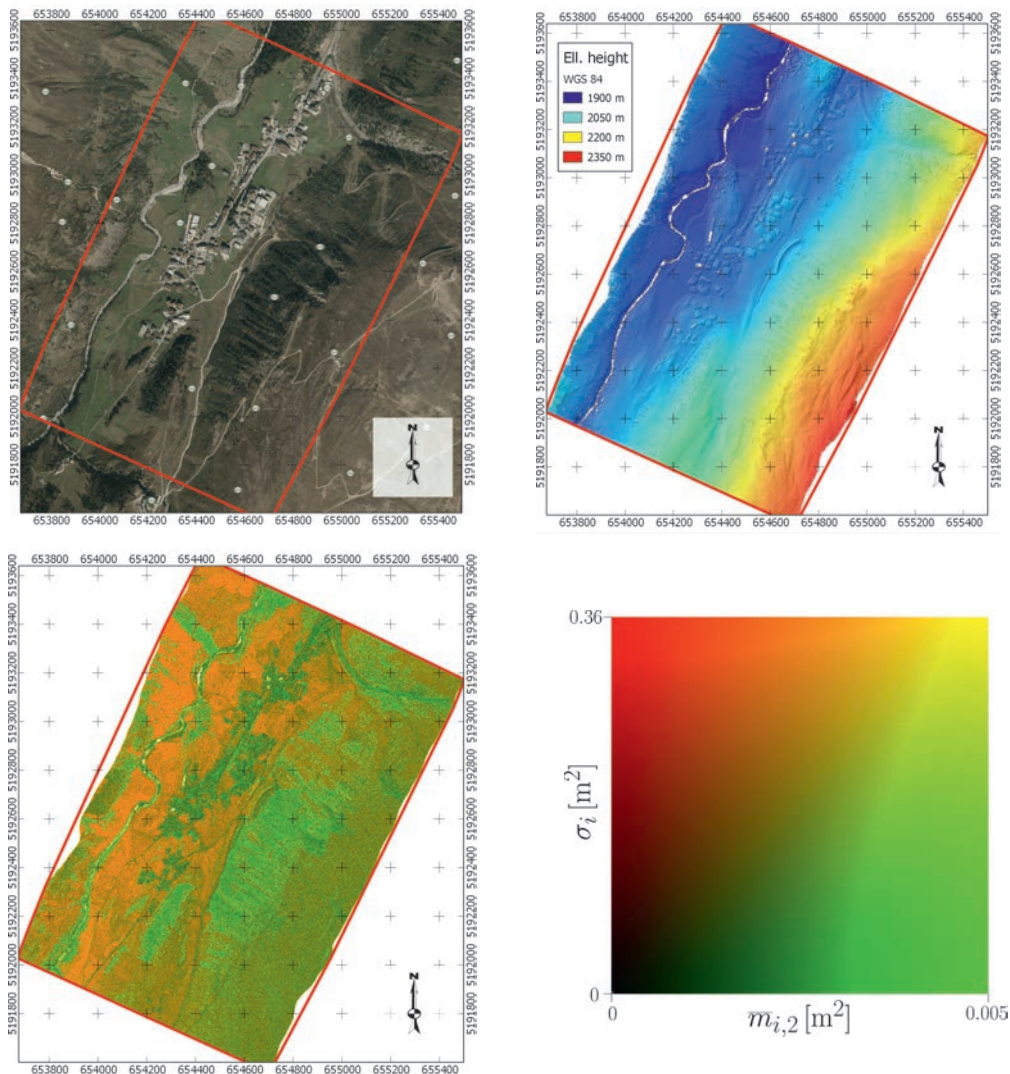


Abb. 9: Oben: Orthofoto und digitales Geländemodell des Testgebiets; Unten: kombinierte Darstellung von σ (Rotkanal) und s^2 (Grünkanal), Legende. Koordinaten: UTM 32N. Orthofoto: www.geoimage.at ©

[22]. Im FWF-Laserscanning entsprechen sie der virtuellen Vergrößerung des Durchmessers des Laserstrahls quer zur Ausbreitungsrichtung; damit werden aber auch größere Objekte entlang der Ausbreitungsrichtung simultan erfasst.

Werden in einer Aggregation die gleichen Zielobjekte erfasst, so verbessert sich das Signal-Rausch-Verhältnis, was auch die Detektion schwach reflektierender Ziele ermöglicht [17]. Dies ist unter anderem von Vorteil in der Laserbathymetrie, um die Wasseroberfläche stabiler zu bestimmen [15]. Es ergibt sich weiters auch Potential für die stabilere Ableitung statistischer Momente durch Aggregation von Wellenformen.

Eine potentielle Möglichkeit wäre die Aggregation von Wellenformen in bewaldetem Gebiet auf Einzelbaum-Niveau. Dies ist Gegenstand aktueller Forschungen.

Dankesworte

Ich möchte an dieser Stelle allen voran der Österreichischen Geodätischen Kommission und der Kammer der ZiviltechnikerInnen für Steiermark und Kärnten sehr herzlich für diese hohe Auszeichnung danken. Weiters sei meinen Ko-Autoren der ausgezeichneten Publikation, Christian Briese, Josef Jansa und Norbert Pfeifer, für die erfolgreiche Zusammenarbeit gedankt. Ebenfalls bedanke ich mich bei den Mitgliedern des Karl-Neumaier-Kuratoriums für das Dissertationsstipendium, in dessen Rahmen jene Publikation entstand. Herzlichen Dank auch an Werner Lienhart und Stefan

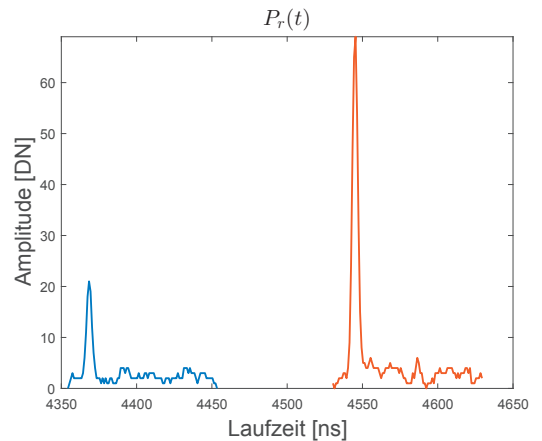
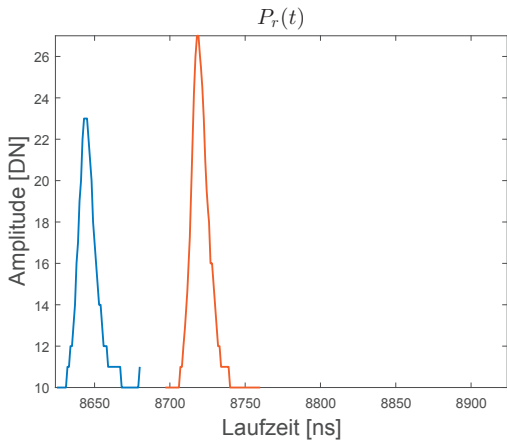
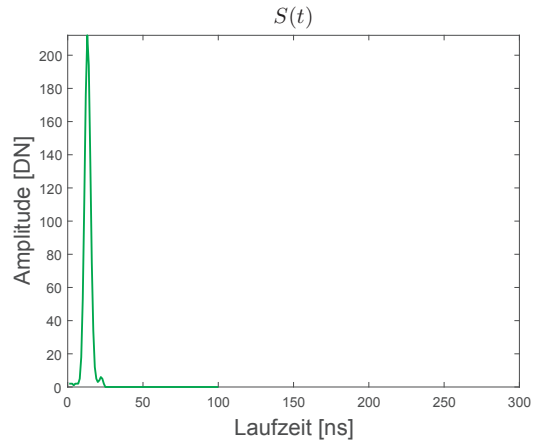
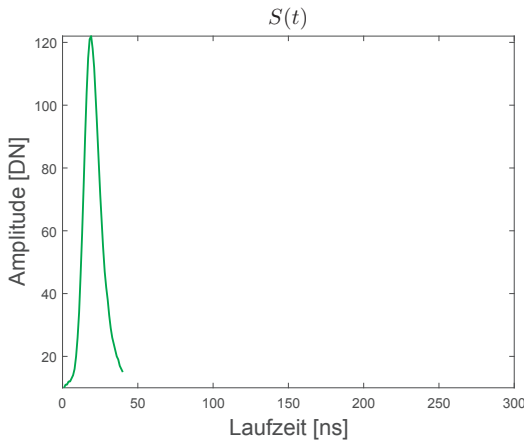
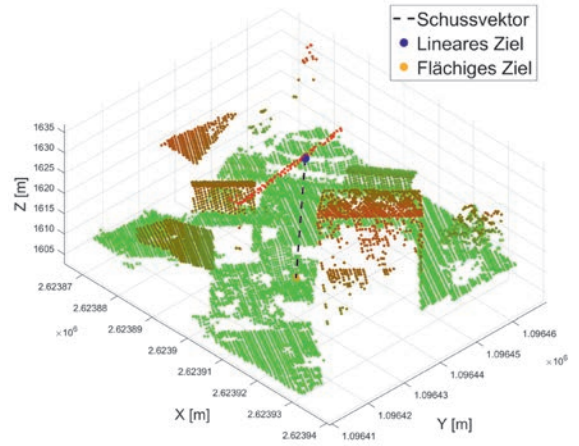
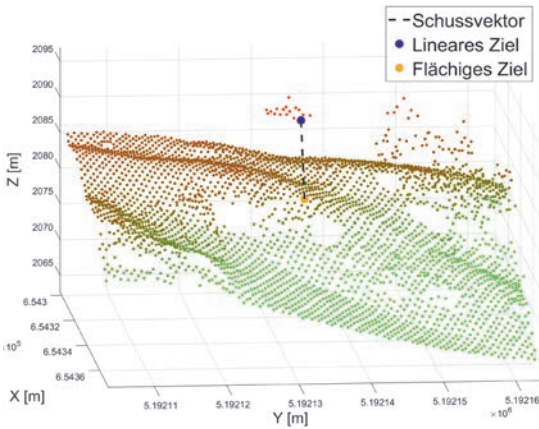


Abb. 10: Ein Beispiel für Echo-Wellenformen von linearen und flächigen Zielen. Oben: Punktwolke (Ausschnitt aus dem in Abbildung 9 dargestellten Datensatz). Mitte: System-Wellenform. Unten: Echo-Wellenform.

Abb. 11: Zweites Beispiel zu Echo-Wellenformen von linearen und flächigen Zielen (Zermatt, Schweiz). Oben: Punktwolke (Koordinaten: CH1903+/LV95). Mitte: System-Wellenform. Unten: Echo-Wellenform. Im Vergleich zu Abbildung 10 sind System-Wellenform und somit auch Echo-Wellenform deutlich schmaler.

Lackner für die Gastfreundschaft am Institut für Ingenieur-geodäsie und Messsysteme der TU Graz im Oktober 2015. Last, but not least bedanke ich mich bei meiner Familie, bei Freundinnen und Freunden sowie Kolleginnen und Kollegen für ihre Unterstützung.

Referenzen

- [1] BRIESE, Christian; HÖFLE, Bernhard; LEHNER, Hubert; WAGNER, Wolfgang; PFENNIGBAUER, Martin: Calibration of full-waveform airborne laser scanning data for object classification. In: SPIE: Laser Radar Technology and Applications XIII, 2008
- [2] GEO TU WIEN: Homepage of the Department of Geodesy and Geoinformation at TU Wien. <http://www.geo.tuwien.ac.at>. Version: 2017. – (27. Februar 2017)
- [3] HOLLAUS, Markus; MÜCKE, Werner; RONCAT, Andreas; PFEIFER, Norbert; BRIESE, Christian: Full-Waveform Airborne Laser Scanning Systems and Their Possibilities in Forest Applications; Kapitel 3. In: Bd. 27: Full-Waveform Airborne Laser Scanning Systems and Their Possibilities in Forest Applications (2014) in [8], S. 43–61
- [4] JELALIAN, Albert V.: Laser Radar Systems. Boston : Artech House, 1992
- [5] JUTZI, Boris: Analyse der zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpulsen, Technical University Munich, Diss., 2007. http://www.pf.bgu.tum.de/pub/2007/jutzi_phd07_dis.pdf
- [6] JUTZI, Boris; STILLA, Uwe: Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 61 (2006), Nr. 1, S. 95–107. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2006.09.001
- [7] KAASALAINEN, S.; HYYPPÄ, H.; KUKKO, A.; LITKEY, P.; AHOKAS, E.; HYYPPÄ, J.; LEHNER, H.; JAAKKOLA, A.; SUOMALAINEN, J.; AKUJARVI, A.; KAASALAINEN, M.; PYYSSALO, U.: Radiometric Calibration of LIDAR Intensity With Commercially Available Reference Targets. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47 (2009), Nr. 2, S. 588–598. – DOI 10.1109/TGRS.2008.2003351. – ISSN 0196–2892
- [8] MALTAMO, Matti (Hrsg.); NÆSSET, Erik (Hrsg.); VAUHKONEN, Jari (Hrsg.): Managing Forest Ecosystems. Bd. 27: Forestry Applications of Airborne Laser Scanning – Concepts and Case Studies. Dordrecht, The Netherlands : Springer Netherlands, 2014. – 464 S. – ISBN 978–94–017–8662–1
- [9] MÜCKE, Werner; BRIESE, Christian; HOLLAUS, Markus: Terrain Echo Probability Assignment Based On Full-Waveform Airborne Laser Scanning Observables. In: WAGNER, Wolfgang (Hrsg.); SZEKELY, Balazs (Hrsg.): ISPRS Technical Commission VII Symposium 2010: 100 Years ISPRS – Advancing Remote Sensing Science. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (Part 7A), 2010. – ISSN 1682–1777, 157–162
- [10] PARRISH, Christopher E.; NOWAK, Robert D.: Improved Approach to Lidar Airport Obstruction Surveying Using Full-Waveform Data. In: Journal of Engineering Surveying 135 (2009), Nr. 2, S. 72–82. – DOI 10.1061/(ASCE)0733–9453(2009)135:2(72)
- [11] RIEGL LMS: Homepage of the company RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. <http://www.riegl.com>. Version: 2017. – Letzter Zugriff: 28. Februar 2017
- [12] RONCAT, Andreas: Backscatter Signal Analysis of Small-Footprint Full-Waveform Lidar Data, Diss., 2014. <http://permalink.obvsg.at/AC12024353>. – Supervisors: Norbert Pfeifer (TU Vienna), Uwe Stilla (TU Munich).
- [13] RONCAT, Andreas; BERGAUER, Gunther; PFEIFER, Norbert: B-Spline Deconvolution for Differential Target Cross-Section Determination in Full-Waveform Laser Scanner Data. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66 (2011), Nr. 4, S. 418–428. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2011.02.002
- [14] RONCAT, Andreas; BRIESE, Christian; JANSÁ, Josef; PFEIFER, Norbert: Radiometrically Calibrated Features of Full-Waveform Lidar Point Clouds based on Statistical Moments. In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 11 (2014), Nr. 2, S. 549–553. – DOI 10.1109/LGRS.2013.2274557
- [15] RONCAT, Andreas; MANDLBURGER, Gottfried: Enhanced detection of water and ground surface in airborne laser bathymetry data using waveform stacking. In: European Geosciences Union General Assembly 2016. Vol. 18 : Geophysical Research Abstracts, 2016. – EGU 2016, Wien; 2016-04-17 – 2016-04-22
- [16] RONCAT, Andreas; PFEIFER, Norbert; BRIESE, Christian: A linear approach for radiometric calibration of full-waveform Lidar data. In: Proc. SPIE 8537, Image and Signal Processing for Remote Sensing XVIII, 2012
- [17] STILLA, Uwe; YAO, Wei; JUTZI, Boris: Detection of weak laser pulses by full waveform stacking. In: STILLA, Uwe (Hrsg.); MAYER, Helmut (Hrsg.); ROTTENSTEINER, Franz (Hrsg.); HEIPKE, Christian (Hrsg.); HINZ, Stephan (Hrsg.): PIA07 – Photogrammetric Image Analysis. ISPRS Technical Commission III Symposium. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W49A), 2007. – ISSN 1682–1777, 25–30
- [18] ULLRICH, Andreas; PFENNIGBAUER, Martin: Categorisation of Full Waveform Data Provided by Laser Scanning Devices. In: KAMERMAN, GaryW. (Hrsg.); STEINVALL, Ove (Hrsg.); LEWIS, Keith L. (Hrsg.); BISHOP, Gary J. (Hrsg.); GONGLEWSKI, John D. (Hrsg.): Proc. of SPIE Vol. 8186, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications, 2011
- [19] WAGNER, Wolfgang: Radiometric calibration of small-footprint full-waveform airborne laser scanner measurements: Basic physical concepts. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65 (2010), Nr. 6, ISPRS Centenary Celebration Issue, S. 505–513. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2010.06.007
- [20] WAGNER, Wolfgang; ULLRICH, Andreas; DUCIC, Vesna; MELZER, Thomas; STUDNICKA, Nikolaus: Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60 (2006), Nr. 2, S. 100–112. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2005.12.001
- [21] WEHR, Aloysius; LOHR, Uwe: Airborne laser scanning – an introduction and overview. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (1999), Nr. 2–3, S. 68–82. – DOI 10.1016/S0924–2716(99)00011–8
- [22] YILMAZ, Öz: Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. SEG Books, 2001 (Investigations in Geophysics 10). – 2027 S. – ISBN 1–560–80094–1

Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Mag. rer. nat. Dr. techn. Andreas Roncat, Forschungsgruppe Photogrammetrie, Department für Geodäsie und Geoinformation, TU Wien, Gußhausstraße 27–29/E120, 1040 Wien.

E-Mail: andreas.roncat@geo.tuwien.ac.at