

Untersuchungen zu Dämpfungseffekten in der Baumkrone bei Full-Waveform Laserscannerdaten

KATJA RICHTER¹, ROBERT BLASKOW¹, ANNE BIENERT¹,
NADINE STELLING¹ & HANS-GERD MAAS¹

Zusammenfassung: Die Charakterisierung der vertikalen Vegetationsstruktur und -dichte ist von großem Interesse für verschiedenste Forstanwendungen sowie für das Verständnis von Waldökosystemen. Seit einigen Jahren sind operationelle full-waveform Laserscannersysteme verfügbar, welche eine komplette zeitaufgelöste Digitalisierung des Echos jedes Laserpulses liefern. In Forstanwendungen liefern solche Scanner zusätzlich zum digitalen Gelände- und Kronenmodell wertvolle Information über die biophysikalische Struktur im Bestand, die mit geeigneten Analysemethoden abgeleitet werden kann. Voraussetzung für eine korrekte Bestimmung der Vegetationsstruktur ist die Berücksichtigung von Dämpfungseffekten in der Baumkrone, die durch Teilreflektionen auf dem Weg des Laserpulses durch die unterschiedlichen Schichten der Baumkrone entstehen. In diesem Paper werden in vorangegangenen Studien entwickelte Dämpfungskorrekturmodelle an Hand von realen Referenzdaten untersucht und die Ergebnisse einer Validierung unter kontrollierten Bedingungen präsentiert. Weiterhin wird diskutiert, inwiefern entwickelte Dämpfungsmodelle und physikalische Realität korrespondieren.

1 Einleitung

Die meisten bestehenden Methoden zur Analyse von full-waveform Laserscannerdaten basieren auf der Extraktion diskreter 3D Punkte mittels einer Gaußschen Dekomposition (z.B. WAGNER et al. 2006, REITBERGER et al. 2009, LEITERER et al. 2012, HOSOI et al. 2013). Für das Erreichen eines höheren Detailgrades und die Anwendung volumetrischer Analysemethoden erscheint es vielversprechend, die Daten in eine Voxelraumstruktur zu transformieren und Voxelattribute direkt aus der gesamten digitalisierten Waveform abzuleiten (PERSSON et al. 2005, BUDDENBAUM et al. 2013). Zu diesem Zweck muss der differentielle Rückstreuquerschnitt über eine Entfaltung bestimmt und in eine kartesische Voxelstruktur projiziert werden. Die Voxelbeiträge repräsentieren dabei die Amplituden des Rückstreuquerschnittes und können unter Annahmen über gleichmäßige Reflektivität als lokales Maß für die Biomasse im Strahlengang interpretiert werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass jede rückgestreute Waveform von Dämpfungseffekten beeinflusst ist, die von Reflektionen in höheren Kronenregionen verursacht werden. Dadurch ist die Amplitude von Signalen insbesondere im unteren Teil der Baumkrone deutlich kleiner als für eine identische Struktur ohne die vorangehenden Kroneninteraktionen und die Struktur im unteren Kronenbereich wird unterrepräsentiert.

Um eine radiometrisch korrekte Voxelraumrepräsentation zu erhalten, muss der durch Teilreflektionen auf dem Weg des Laserpulses durch die Baumkrone entstehende Signalverlust kompensiert werden. Dafür ist ein genaues Verständnis der Interaktion zwischen Laserpuls und

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, E-Mail: [katja.richter1, anne.bienert, nadine.stelling, hans-gerd.maas]@tu-dresden.de, robert.blaskow@mailbox.tu-dresden.de

Vegetation nötig. In vorangegangenen Studien (RICHTER et al. 2014a, RICHTER et al. 2014b) wurden mit Hilfe synthetischer Daten zwei Modelle entwickelt, welche die Dämpfung des Laserpulses beim Durchgang durch die Baumkrone beschreiben und korrigieren. Die Modelle basieren auf der Untersuchung der "Historie" jedes Laserpulses. Grundidee ist, dass die Abschwächung des Signals in den unteren Kronenbereichen vom Anteil der Pulsintensität, der in höheren Kronenbereichen reflektiert wurde, abhängt und entsprechend korrigiert werden muss (s. Kapitel 2).

Voraussetzung für eine Validierung der entwickelten Korrekturmodelle mit Hilfe von Referenzdaten ist die genaue Kenntnis der Objektgeometrie des gescannten Referenzziels. Aufgrund der Komplexität realer Bäume und der extrem aufwändigen vollständigen Erfassung aller Objektdetails wurde für diese Studie ein vereinfachtes Baummodell als Referenzobjekt entwickelt. Da für eine realistische Abbildung der genannten Effekte bestimmte Annahmen getroffen und eingehalten werden müssen, sind die Konstruktion und die Flugwegplanung einer dementsprechenden Befliegung immer noch sehr aufwändig und kostenintensiv. Aus diesem Grund wurde ein vereinfachter Versuchsaufbau für die Verwendung eines full-waveform fähigen terrestrischen Laserscanners erarbeitet und durchgeführt.

2 Dämpfungskorrekturmodelle

Auf dem Weg durch die Baumkrone trifft der emittierte Laserpuls auf Blätter, Zweige und Äste, eventuell auch auf den Stamm und letztendlich auf den Waldboden. Abhängig vom Material ist jede Interaktion durch Reflektions-, Transmissions-, Absorptions- und Streuungsprozesse gekennzeichnet, wodurch auch die Anzahl der für nachfolgende Interaktionen zur Verfügung stehenden Photonen reduziert wird. Folglich sind die Amplituden der reflektierten Waveform im inneren der Krone geringer als für eine identische Struktur ohne die vorangegangenen Interaktionen. Die digitalisierten Echos in der Waveform sind somit von der Historie des Laserpulses abhängig.

Die Korrektur der Dämpfung kann entweder diskret oder integral erfolgen (Abb. 1) (RICHTER et al. 2014a, RICHTER et al. 2014b). Dazu wird das Integral unter jedem Peak (diskrete Korrektur) bzw. die Amplitude jedes Samples (integrale Korrektur) mit einem Referenzwert verglichen, um den in den höheren Bereichen der Krone reflektierten Anteil des Laserpulses zu ermitteln und die nachfolgenden Samples mit einem passenden Korrekturfaktor c_i entsprechend anzuheben. In realen Messdaten muss der Referenzwert aus dem Datensatz selbst näherungsweise abgeleitet werden. Der nachfolgende Versuchsaufbau erlaubt einen direkten Zugriff auf den Referenzwert.

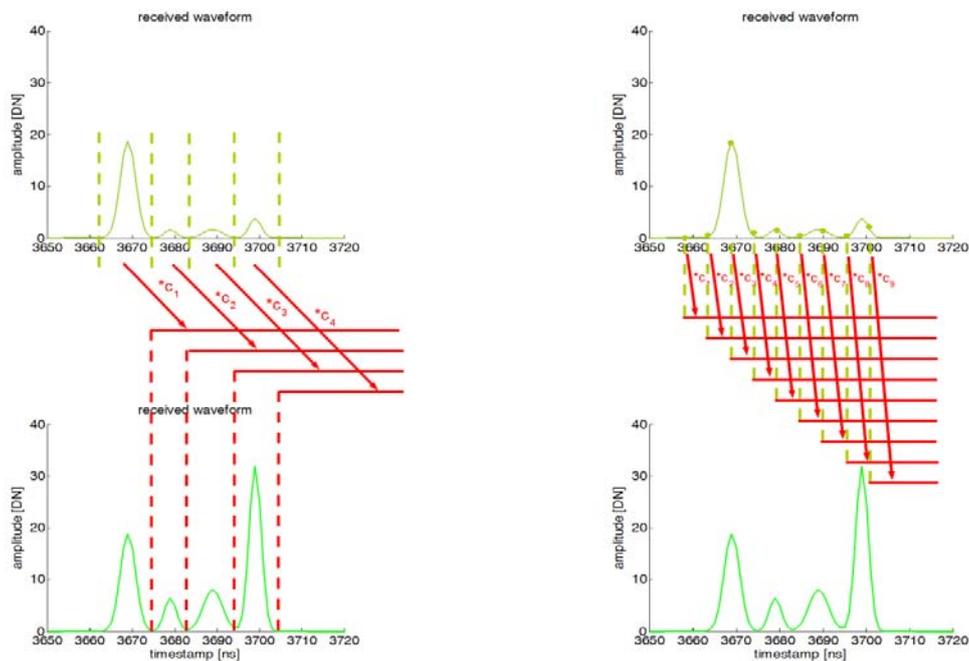


Abb. 1: Modelle zur Dämpfungskorrektur, links: diskrete Korrektur, rechts: integrale Korrektur

3 Versuchsaufbau und Datenaufnahme

Um die Dämpfungseffekte beim Durchgang des Laserpulses durch die Baumkrone mit vertretbarem Aufwand zu untersuchen sowie die entwickelten Korrekturmodelle zu verifizieren, wurde die Messanordnung in die Horizontale verlagert und ein stark vereinfachtes Baummodell als Referenzziel verwendet. Bei der Konstruktion des Referenzziels und dem Versuchsaufbau wurde auf eine maßstäbliche Anpassung in Bezug zur Messentfernung und Divergenz des terrestrischen Laserscanners geachtet. So konnte eine zur Airborne Laserscanner Messung äquivalente Größe des Laserfootprints erreicht werden.

Das stark vereinfachte Baummodell zur Validierung der Modelle zur Korrektur der Pulshistorie besteht aus zwei im Abstand von einem Meter hintereinander angeordneten Gittern sowie einer Platte, die den Waldboden repräsentiert (Abb. 2a). Dabei wurde eine gleiche Reflektivität aller Modellteile angestrebt. Um verschiedene Abschattungsszenarien zu simulieren, sind die zur Dämpfung des Signals gedachten Gitter zueinander verschiebbar. Alle Komponenten wurden senkrecht zum Scanner ausgerichtet und in verschiedenen Kombinationen mit einer Auflösung von $0,005^\circ$ gescannt, was einem Abstand der einzelnen Messungen von 2cm entspricht (Abb. 2b-e).

Für die Datenaufnahme wurde ein Riegl VZ-400 TLS mit full-waveform recording verwendet. Die Pulsbreite des an einem ausgedehnten Ziel reflektierten Signals beträgt 5-7ns, je nach

Amplitude des Peaks (HARTZELL et al. 2015). Das Signal wird mit 500 MHz digitalisiert, was einer Abtastrate von 2 ns entspricht.

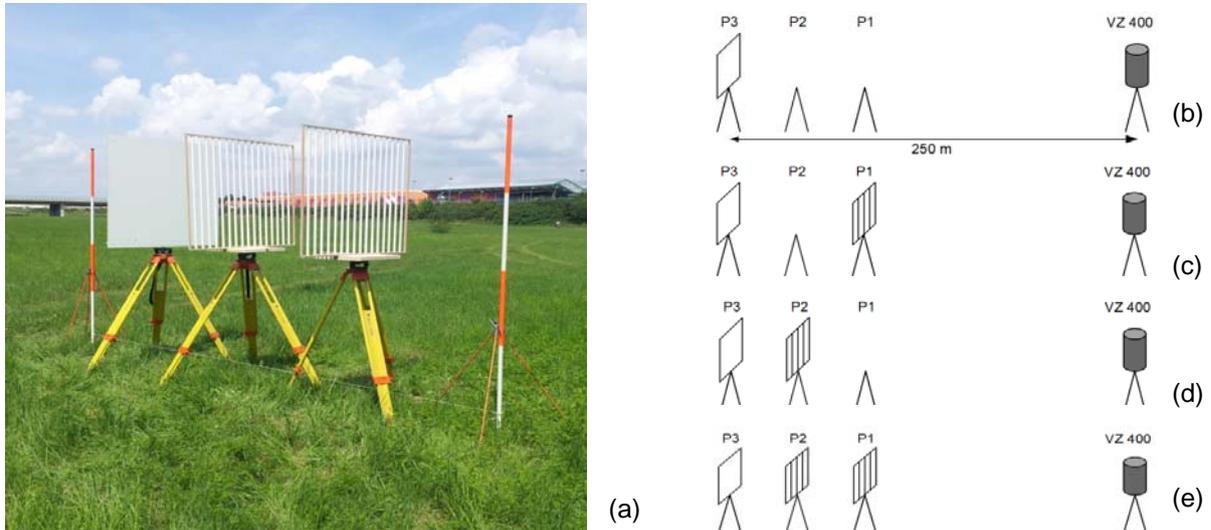


Abb. 2: (a) stark vereinfachtes Baummodell; (b)-(e) Aufnahmeanordnungen (bei (e) wird P2 partiell von P1 verdeckt, in Analogie zur Echodämpfung in den oberen Schichten einer Baumkrone)

4 Datenaufbereitung

Der terrestrische Laserscanner Riegl VZ 400 erzeugt aus den digitalisierten Echosignalen standardmäßig mittels *online waveform processing* eine Punktwolke, die mit der Software *RiScan Pro* visualisiert werden kann. Zusätzlich werden die Waveform-Rohdaten vom optional verfügbaren *waveform data output* als wfm-Datei bereitgestellt, auf die mit der zugehörigen Riegl Software-Bibliothek *RiWAVELib* zugegriffen werden kann.

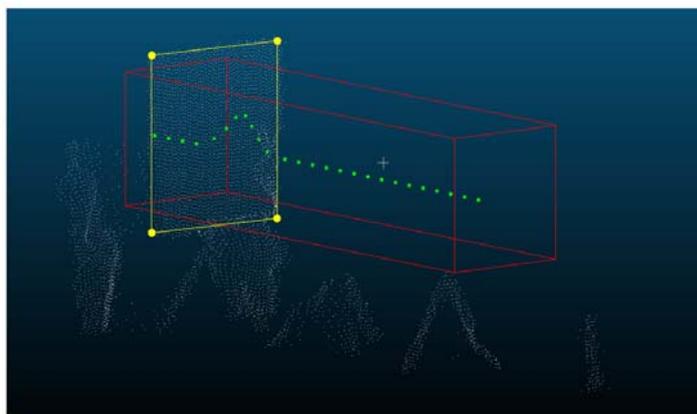


Abb. 3: Ausschneiden relevanter Waveforms aus Rohdaten, Punktwolke (weiß), Eckpunkte Platte (gelb), Bereich (rot) in dem alle Samples (grün) liegen müssen

Der erste Schritt in der Datenaufbereitung ist die Entfernung aller nicht von Reflektionen am Baummodell stammenden Waveforms aus dem Rohdatensatz. Dazu wurden die Koordinaten der Eckpunkte der Platte in der bei der Messung automatisch erzeugten Punktwolke ermittelt und mit dem Richtungsvektor zum Scanner eine bounding box definiert, in der alle Samples der gesuchten Waveforms liegen. Die Größe der Box wurde so gewählt, dass Waveforms, bei denen der Footprint des Laserpulses nicht vollständig auf Platte und Gitter lag, entfernt wurden (Abb. 3).

Wie in Abbildung 4a ersichtlich, werden die Lage eines Peaks sowie dessen Amplitude lediglich durch 5-6 Samples definiert. Um für die Untersuchung der Signaldämpfung eine dichtere Repräsentation der reflektierten Signalform zu erhalten, wurden alle Waveforms eines Scans zu einer mittleren Waveform zusammengefasst (HARTZELL et al. 2015). Dazu wurde auf jedes Waveform-Set ein gleitender Mittelwert Filter angewandt. Durch Abtastung der mittleren Waveform im Abstand von 1 ns und Entfernung des instrumenteninternen Amplitudenoffsets erhält man zum Flugzeuglaserscanning vergleichbare Messdaten, die für die Validierung der Dämpfungskorrekturmodelle verwendet werden können (Abbildung 4b).

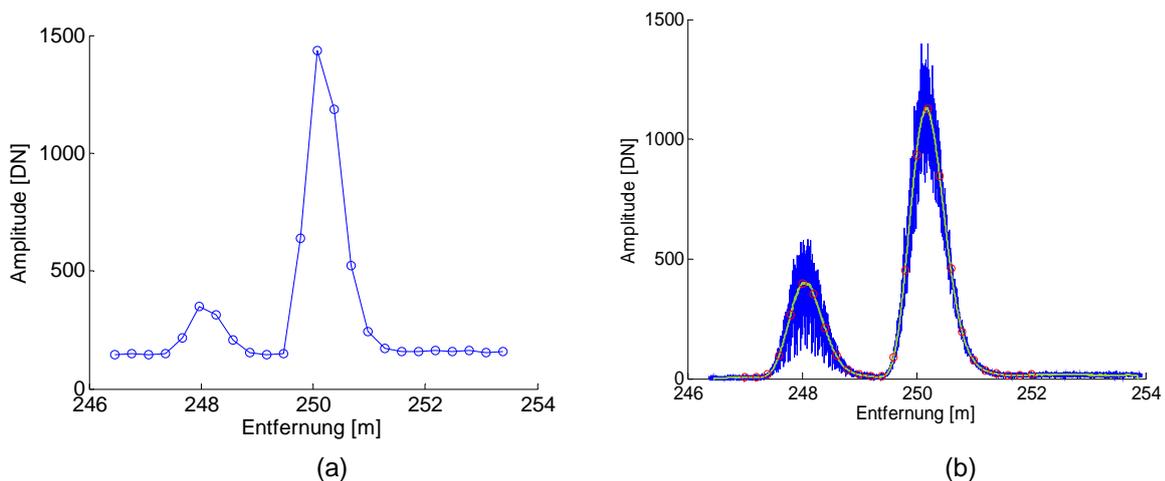


Abb. 4: a) einzelne Waveform Gitter P1, Platte P3; b) Waveform-Set (blau) mit mittlerer Waveform (grün) und daraus abgeleiteter Abtastung (rot)

5 Untersuchung der Signaldämpfung

Abbildung 5 zeigt die aus der Datenaufbereitung resultierenden Waveforms für verschiedene Aufnahme Konfigurationen. Der Vergleich der jeweils letzten Peaks (Signale an der Platte) zeigt, dass die Gitter eine Signaldämpfung verursachen. Die Prozentangaben stehen für den in Relation zur Referenzmessung bei der jeweiligen Interaktion reflektierten Anteil des Laserpulses. In der Theorie müssen die Integrale der Waveforms identisch sein und die Prozentangaben in der Summe 100 ergeben. In der Realität ist das nicht der Fall, da die Platte kein idealer diffuser Streuer ist. Durch den nachgewiesenen Anteil an gerichteter Reflektion (BLASKOW) in Kombination mit windinduzierten Plattenbewegungen und der endlich genauen Ausrichtung der

Platte zum Scanner geht ein Teil der einfallenden Strahlung verloren. Der ermittelte Referenzwert fällt somit tendenziell zu klein aus.

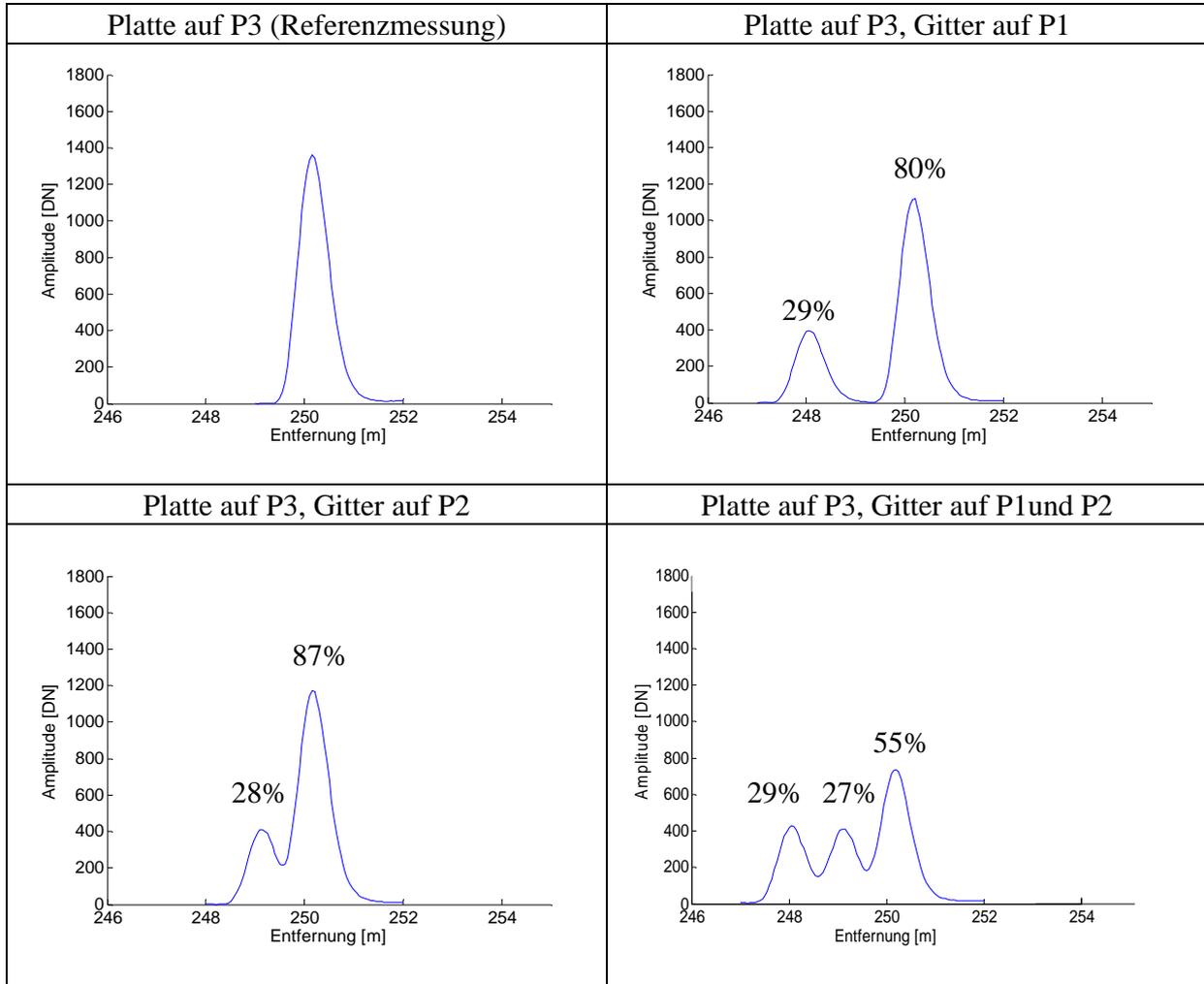


Abb. 5: mittlere Waveforms für verschiedene Aufnahmekonfigurationen

Aus der bekannten Objektgeometrie lässt sich genau ableiten, wie viel Prozent des Laserpulses am Gitter reflektiert wurden. Je nachdem, an welcher Stelle der Laserfootprint (Durchmesser 8 cm) auf das Gitter (Stabbreite 2 cm, Stababstand 4 cm) trifft, variiert dieser Wert. Das wird auch an der Streuung der Amplituden im Waveformset (Abb. 4b) deutlich. Da die Position des Laserfootprints auf dem Gitter unbekannt ist und alle Waveforms im Set zu einer mittleren Waveform zusammengefasst werden, muss ein Durchschnittswert für den am Gitter reflektierten Anteil des Laserpulses abgeschätzt werden. Dazu wurden für alle möglichen Auftreffpositionen des Laserfootprints auf dem Gitter im horizontalen Abstand von 1 mm die Rückstreulfläche berechnet und für ein Abtastintervall von 2 cm und beliebige "Anfangspositionen" ein Mittelwert berechnet (Abb. 6).

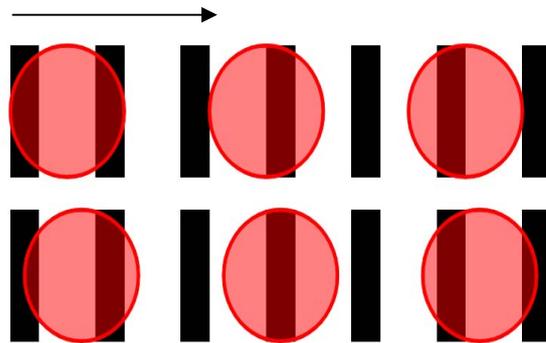


Abb. 6: Beispiele für verschiedene Reflektionsvarianten, oben: Laserpuls trifft genau zwischen zwei Gitterstäbe (entspricht Startpunkt = 0 mm), unten: Startpunkt = 10 mm

Geht man vereinfacht von einer gleichmäßigen Verteilung der Photonen im Puls aus (Abb. 7a), ergibt sich unabhängig von der Auftreffposition des ersten Laserpulses ein Durchschnittswert von 33,15%. Dieser Wert korrespondiert nicht mit den im Experiment ermittelten Werten. Die räumliche Intensität der Photonen im Puls kann für die meisten Lasersysteme mit einer Gaußverteilung beschrieben werden (JUTZI et al. 2007). Berücksichtigt man diese Verteilung (Abb. 7b), variieren die Werte je nach Startpunkt zwischen 29,9% und 34,8%. Im praktischen Versuch liegen die Werte zwischen 26% und 29% und würden bei genauerer Referenzwertbestimmung sogar noch kleiner ausfallen. Das deutet darauf hin, dass auch die Reflexion am Gitter nicht ideal ist.

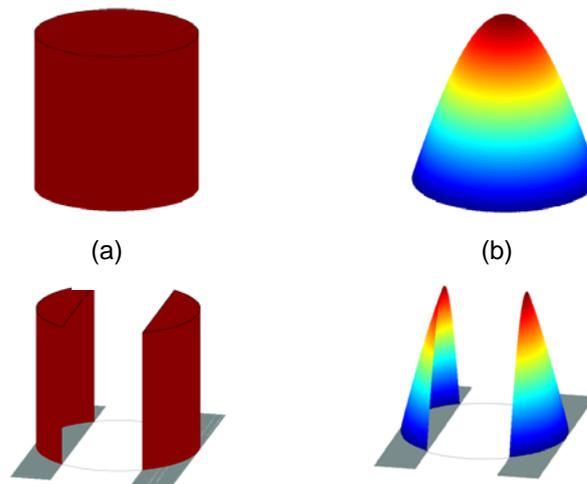


Abb. 7: Gegenüberstellung radial gleichmäßige Verteilung (a) und Gauß'sche Verteilung der Photonen im Laserpuls (Amplitude = 1, Streuung = $\text{Strahldurchmesser} / (2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln 2})$) (b) am Beispiel der Interaktion an der Platte (oben) und am Gitter (unten)

6 Validierung der Korrekturmodelle

Die Ergebnisse der Validierung für die drei untersuchten Aufnahmeconfigurationen sind in Abb. 8 dargestellt. Deutlich erkennbar ist die Abhängigkeit der Korrektur von der Referenzwertbestimmung. Nach der diskreten Dämpfungskorrektur sollte das Signal an der Platte dem Referenzsignal entsprechen, so als ob die vorangegangene Interaktion nicht stattgefunden hätte. Im Versuch fällt sie allerdings tendenziell 10% zu groß aus (Überkompensation), da der Referenzwert zu klein ermittelt wurde.

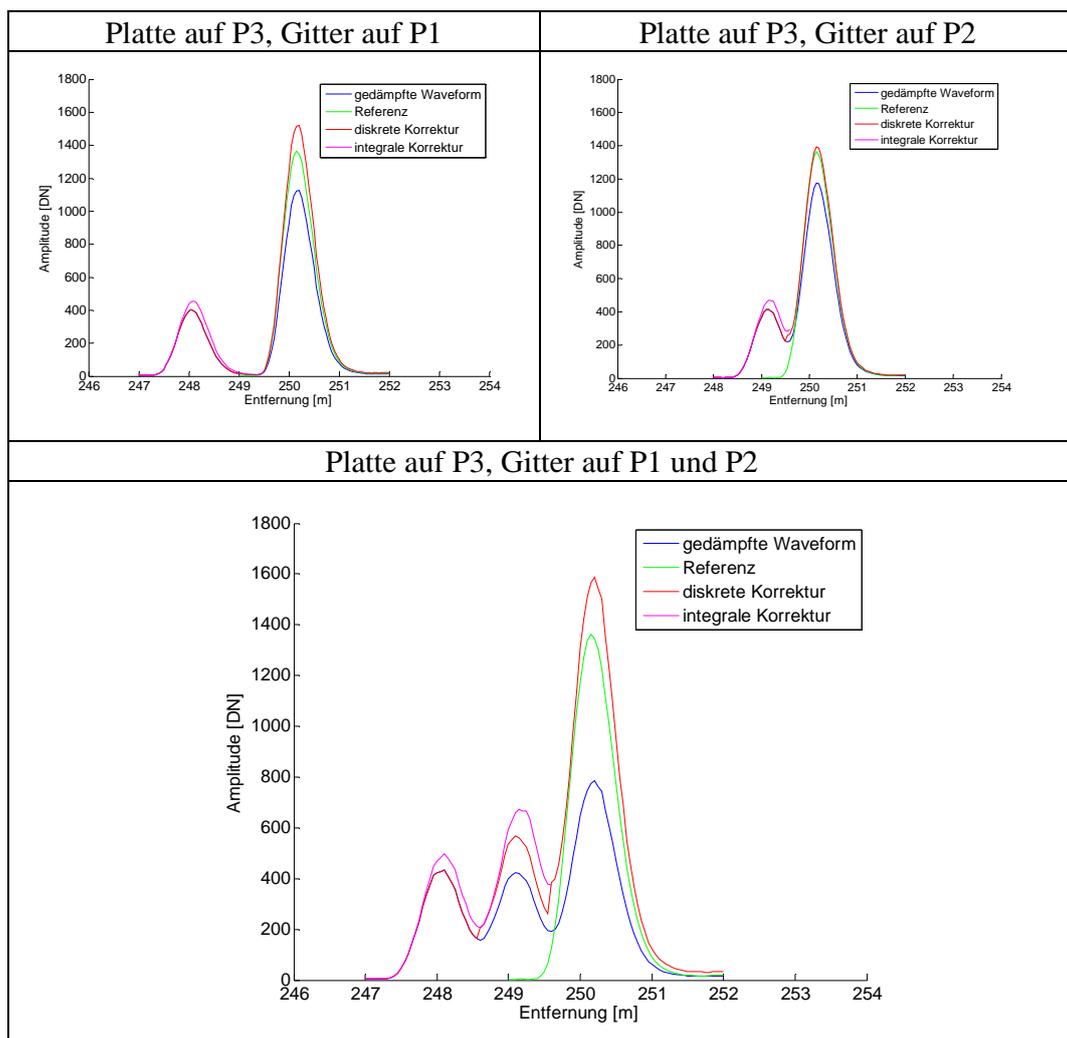


Abb. 8: Vergleich von gedämpfter Wavelform, Referenz, diskreter Korrektur und integraler Korrektur für die drei untersuchten Aufnahmeconfigurationen

Bei der Beurteilung der integralen Korrektur muss berücksichtigt werden, dass sie nur für poröse Medien (2. Gitter) gültig ist. Für ausgedehnte Ziele (Platte) ergibt sie kein sinnvolles Ergebnis (RICHTER et al. 2014b). Aus diesem Grund wurde für den an der Platte reflektierten Signalanteil der Waveform keine integrale Korrektur durchgeführt. Wie schon die diskrete Korrektur, liefert auch die integrale Korrektur aufgrund des nicht optimal bestimmten Referenzwertes zu große Korrekturergebnisse.

Die präsentierten Ergebnisse zeigen, dass das diskrete Modell für den konkreten Messaufbau bei der Korrektur der Dämpfungseffekte dem integralen Modell überlegen ist. Für eine allgemeingültige, vom konkreten Fall losgelöste Aussage über die Eignung des jeweiligen Modells zur Modellierung der physikalischen Realität wird die Komplexität des Baummodells in zukünftigen Untersuchungen erhöht. Ursachen für die 10 prozentige Überkompensation des diskreten Modells können einerseits im Versuchsaufbau andererseits im Korrekturmodell selbst liegen. Für eine gesicherte Aussage über ins Modell zu integrierende Korrekturterme ist jedoch eine Weiterentwicklung des experimentellen Aufbaus nötig.

Um den Referenzwert sicher zu bestimmen und Energieverluste durch suboptimale Reflektivität zu vermeiden, sollte für alle Ziele im Baummodell ein ideal diffus reflektierendes Material (Spectralon) verwendet werden. Für die oben erwähnte Steigerung der Komplexität des Baummodells sollten anstelle von Gittern, die lediglich in einer Ebene reflektieren, Ziele mit Tiefenausdehnung zum Einsatz kommen. Dadurch werden die Streuprozesse von Vegetation besser nachgebildet. Desweiteren sollte der Abstand der Modellkomponenten erhöht werden um eine Signalüberlagerung der einzelnen Interaktionen zu verhindern.

7 Zusammenfassung

Um das volle Potential des full-waveform Laserscanning für die Untersuchung von Vegetationsstrukturen zu nutzen, müssen die Dämpfungsprozesse beim Durchgang des Laserpulses durch die Vegetation besser verstanden werden. In der vorliegenden Studie wurden Dämpfungseffekte in der Baumkrone bei full-waveform Laserscannerdaten untersucht sowie verschiedene Dämpfungskorrekturmodelle unter kontrollierten Bedingungen validiert. Zu diesem Zweck wurde ein vereinfachter Versuchsaufbau für die Verwendung eines full-waveform fähigen terrestrischen Laserscanners entwickelt.

Grundsätzlich konnte die Gültigkeit der Modelle sowie das Potential der entwickelten Validierungsmethode bestätigt werden. Für genauere Aussagen insbesondere zum integralen Korrekturmodell sind jedoch weitere Untersuchungen sowie eine Verbesserung des experimentellen Aufbaus nötig.

8 Danksagung

Die Experimente wurden im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsvorhabens durchgeführt. Wir bedanken uns außerdem herzlich bei der Firma Milan Geoservice GmbH, die uns ihren terrestrischen Laserscanner Riegl VZ 400 für einen Tag zur Verfügung gestellt und die Datenaufnahme unterstützt hat.

9 Literaturverzeichnis

- BLASKOW, R. & SCHNEIDER, D., 2014: Analysis and correction of the dependency between laser scanner intensity and range. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5, S. 107-112, doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-107-2014.
- BUDDENBAUM, H., SEELING, S. & HILL, J., 2013: Fusion of full-waveform lidar and imaging spectroscopy remote sensing data for the characterization of forest stands. *International Journal of Remote Sensing* **34** (13), S. 4511-4524.
- HARTZELL, P. J., GLENNIE, C. L. & FINNEGAN, D. C., 2015: Empirical Waveform Decomposition and Radiometric Calibration of a Terrestrial Full-Waveform Laser Scanner. *Geosciences and remote sensing* **53** (1), S. 162-171
- HOSOI, F., NAKAI, Y. & OMASA, K., 2013: Voxel tree modeling for estimating leaf area density and woody material volume using 3-D LIDAR data. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 1.2, S. 115-120.
- JUTZI, B. & STILLA, U., 2007: Simulation and analysis of full-waveform laser data of urban objects. *Proceedings of 2007 Urban Remote Sensing Joint Event, IEEE 2007*.
- LEITERER, R., MORSDORF, F., TORABZADEH, H., SCHAEPMAN, M. E., MUCKE, W., PFEIFER, N. & HOLLAUS, M., 2012: A voxel-based approach for canopy structure characterization using full-waveform airborne laser scanning. *Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International, IEEE*, S. 3399-3402.
- PERSSON, Å., SÖDERMAN, U., TÖPEL, J. & AHLBERG, S., 2005: Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3), S. W19.
- REITBERGER, J., SCHNÖRR, C., KRZYSZEK, P. & STILLA, U., 2009: 3D segmentation of single trees exploiting full waveform lidar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **64** (6), S. 561-574.
- RICHTER, K., STELLING, N. & MAAS, H.-G., 2014a: Attenuation correction of full-waveform airborne laser scanner data for improving the quality of volumetric forest reconstructions by simplified waveform history analysis. *Proceedings of the 34th EARSeL Symposium - 2nd International Workshop of Special Interest Group on Forestry, 17-18 June, Warsaw, Poland*.
- RICHTER, K., STELLING, N. & MAAS, H.-G., 2014b: Correcting attenuation effects caused by interactions in the forest canopy in full-waveform airborne laser scanner data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-3, S. 273-280, doi:10.5194/isprsarchives-XL-3-273-2014.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., DUCIC, V., MELZER, T., & STUDNICKA, N., 2006: Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **60**(2), S. 100-112.