



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

TLS-Punktwolken in zwei Wellenlängen für die Analyse von Baumstrukturen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter
der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Pfeifer
Technische Universität Wien,
Department für Geodäsie und Geoinformation (E120)

unter Mitwirkung von

Dipl.-Ing. Martin Wieser
Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Hollaus

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Mathematik und Geoinformation

von

Jasmin Brunner, BSc
Felberstraße 104/30
1150 Wien

Kurzfassung

Terrestrische Laserscanner zeichnen neben den 3D-Koordinaten der gemessenen Punkte auch die Stärke des zurückreflektierten Signals auf. Dieses Signal hängt neben den Rückstrahleigenschaften des Objektes auch stark von der Messgeometrie sowie dem instrumentellen und atmosphärischen Einfluss ab. Durch ausführliche Kalibrierung dieser zusätzlichen Einflüsse kann aus dem zurückreflektierten Signal auf die Rückstrahleigenschaften des Objektes geschlossen werden. Vor allem instrumentelle Einflüsse variieren je TLS Modell sehr stark, wodurch ein direkter Vergleich der Intensitäten unterschiedlicher Scanner nicht möglich ist. Durch Messungen auf Objekte bekannter Reflektivität können je Scanner Kalibrierungskurven erstellt werden. Werden die Kalibrierungskurven auf Intensitäten unterschiedlicher TLS Modelle angebracht, so können die daraus generierten Reflektivitäten miteinander verglichen werden. In dieser Arbeit wird anhand eines Testdatensatzes eines Waldstückes gezeigt, wie rein durch Vergleichen von Reflektivitäten unterschiedlicher Wellenlängen auf die Strukturen von Bäumen (Stämme, Äste, Nadeln und Laub) geschlossen werden kann.

So liefert eine Klassifizierung der beiden Klassen Stamm und Nadeln/Laub anhand eines abgewandelten NDVI eine Genauigkeit von 74%. Werden zur Klassifizierung nur Single Echos verwendet, so wird sogar eine Genauigkeit von knapp 90% erreicht. Dies beruht darauf, dass Single Echos über deutlichere Reflektivitäten verfügen und sich der NDVI der einzelnen Strukturen dadurch eindeutiger unterscheidet. Eine Klassifizierung anhand der Reflektivitäten bei einer Wellenlänge von $1.5 \mu\text{m}$ ergibt eine Genauigkeit von 90% und für Single Echos sogar 94%. Wohingegen eine Unterscheidung der Baumstrukturen anhand der Reflektivität bei $1.0 \mu\text{m}$ nicht möglich ist. Dies zeigt, dass ein Vergleichen und Kombinieren von Reflektivitäten unterschiedlicher TLS und Wellenlängen zwar möglich ist, aber für den Zweck einer Klassifizierung nicht nötig ist.

Abstract

Terrestrial laser scanner record not only the 3D coordinates per point, but also the strength of the receiving signal. In addition to the target scattering characteristics, the signal is strongly influenced by the measurement geometry, the instrumental and the atmospheric effects. By detailed calibration of these additional influences, the target scattering characteristics can be derived from the receiving signal. Above all, the instrumental effects vary strongly for different TLS models, so that a direct comparison of its receiving signals is not possible. By measuring objects of known reflectivity, calibration curves can be created for each scanner. If these calibration curves are applied to intensities of different TLS models, the generated reflectivities can be compared with each other. In this thesis, a dataset of a forest is used to show how the structures of a tree (trunks, branches, needles and leafes) can be distinguished by simply comparing reflectivities of different wavelengths.

As a result, a classification of the two classes trunks and needles/leaves by their values of a modified NDVI provides a overall accuracy of 74%. By only using single echoes a overall accuracy of almost 90% is achieved. This is based on the fact that single echoes have more distinct reflectivities and therefore the NDVI of the individual structures differs more clearly. A classification based on the reflectivities at a wavelength of $1.5 \mu\text{m}$ provides a overall accuracy of 90% and for single echoes even 94%. Whereas a distinction of tree structures based on the reflectivity at $1.0 \mu\text{m}$ is not possible. This demonstrates that although it is possible to compare and combine reflectivities of different TLS and wavelengths, it is not necessary for the purpose of classification.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
2	Theoretische und technische Grundlagen	3
2.1	Airborne und terrestrische Laserscanner	3
2.2	Registrierung von Punktwolken	4
2.2.1	Target-basierte Registrierung	5
2.2.2	Iterative Closest Point Methode	6
2.3	Intensität und Reflektivität	7
2.3.1	Multiple Echos und Full-Waveform	11
2.3.2	Reflektivität von Vegetation	12
2.4	Dual-Wavelength Echidna [®] Lidar	14
3	Untersuchungsgebiet und Daten	17
3.1	Verwendete Instrumente	17
3.1.1	Riegl Laserscanner	17
3.1.2	Geodätische Messinstrumente	19
3.2	Verwendete Programme	20
3.2.1	RiSCAN PRO	20
3.2.2	OPALS - Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data	20
3.2.3	CloudCompare	22
3.3	Messung	22
4	Methodik	27
4.1	Registrierung	27
4.1.1	Registrierung mittels RiSCAN	27
4.1.2	ICP-Registrierung	28
4.2	Kalibrierung der Intensität	28
4.3	Berechnung des NDVI	33
4.4	Bildung von Trainingsgebieten zur Analyse der Baumstrukturen	34
4.5	Klassifizierung der Baumstrukturen	34

5 Ergebnisse und Diskussion	39
5.1 Ergebnis der Kalibrierung	39
5.1.1 Kalibrierfunktion VZ-2000	39
5.1.2 Kalibrierfunktion VZ-6000	40
5.1.3 Kalibrierergebnisse	44
5.2 Ergebnis der Punktkorrespondenzen zur Bildung des NDVI	44
5.3 Analyse der Baumstrukturen	45
5.3.1 Reflektivitäten der Baumstrukturen	46
5.3.2 NDVI der Baumstrukturen	51
5.4 Klassifizierung der Baumstrukturen anhand von NDVI-Werten	51
5.5 Klassifizierung der Baumstrukturen anhand der Reflektivität	56
5.6 Vergleich der Klassifikationen mit geometrischer Klassifikation	58
6 Zusammenfassung und Ausblick	63
Abbildungsverzeichnis	65
Tabellenverzeichnis	67
Literaturverzeichnis	69

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

Terrestrisches Laserscanning (TLS) ist in der Geodäsie schon länger eine anerkannte Messmethode. Aus den dichten Punktwolken, die gemessen werden, können Objekte wie Gebäude oder Pflanzen rekonstruiert werden. Neben der reinen geometrischen Information, soll auch die Intensität des Messsignals genutzt werden. Um zusätzliche Information aus dieser Intensität zu gewinnen und diese dann auch sinnvoll zu nutzen, muss das Messsystem näher betrachtet werden. So hängt die Stärke des Messsignal nicht nur vom Objekt an sich ab, sondern wird stark vom Messinstrument, von der atmosphärischen Ausbreitung des Signals und von der Aufnahmegeometrie beeinflusst.

Das Objekt beeinflusst das Messsignal durch seine Reflektivität. So unterscheiden sich je nach Material auch die Reflexionseigenschaften. Diese hängt unter anderem ab von der Farbe, der Glattheit der Oberfläche, aber auch von der Absorption des Signals durch das Objekt. Je nach Wellenlänge des ausgesendeten Signals kann zum Beispiel der Wassergehalt innerhalb des Objekts dazu führen, dass ein gewisser Anteil des Signals nicht reflektiert, sondern absorbiert wird. In der Fernerkundung wird dieser Effekt häufig genutzt, um zum Beispiel mit passiven multispektralen Satellitenaufnahmen großräumig die Vitalität von Vegetation und die Schneebedeckung zu bestimmen. Auch aktive Satelliten, wie ICESat, können mithilfe von Spaceborne Lasersystemen dazu benutzt werden, um die Biomasse am Grund zu bestimmen (Harding & Carabajal, 2005). Morsdorf *et al.* (2009) hat schließlich gezeigt, dass es auch möglich ist mit multispektrale Airborne Laserscanning (ALS) Aufnahmen Strukturen und Physiologie von Vegetation zu bestimmen. Ein multispektraler TLS ist nach (Suomalainen *et al.*, 2011) realisiert worden, indem die Punktwolke eines herkömmlichen Laserscanners mit den Ergebnissen eines Spektrometers kombiniert wurden.

Die Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) hat schließlich einen terrestrischen Laserscanner namens Dual-Wavelength Echidna[®] Lidar (DWEL) entwickelt und gebaut, der mit zwei Wellenlängen gleichzeitig misst. DWEL nutzt die Information aus beiden Wellenlängen, um automatisch Waldstrukturen zu erfassen. Die Wellenlängen sind mit 1064 nm und 1548 nm so gewählt, dass der Normalised Differential Vegetation Index (NDVI) gebildet werden kann. Chlorophyllhaltige Blätter absorbieren aufgrund des vermehrten Wasser-

gehalts das Signal bei 1548 nm stärker als bei 1064. Der DWEL befindet sich erst in der Testphase und steht damit dem breiten Markt nicht zur Verfügung. In dieser Diplomarbeit soll daher das Prinzip des DWEL mit herkömmlichen Laserscannern nachempfunden werden, indem die Punktwolken zweier unterschiedlicher Laserscanner kombiniert werden. Dafür kommen zwei Laserscanner der Firma Riegler zum Einsatz, einer mit einer Wellenlänge von 1064 nm und der andere mit 1550 nm.

Zunächst vermittelt das Einführungskapitel die *technischen und theoretischen Grundlagen*. Neben der Funktionsweise eines Terrestrischen Laserscanners wird beschrieben, wie Punktwolken unterschiedlicher Standpunkte und Instrumente registriert werden können. Insbesondere wird erklärt, welche Faktoren ein Messsignal genau beeinflussen und wie die Intensitäten zu bearbeiten sind, um die Ergebnisse zweier unterschiedlicher Laserscanner miteinander vergleichen zu können. Zuletzt wird genauer auf den Dual-Wavelength Echidna[®] Lidar eingegangen.

Im anschließenden Kapitel *Untersuchungsgebiet und Daten* werden die verwendeten Programme und Instrumente sowie die Aufnahme der Testdaten in einem Waldstück beschrieben. Im Kapitel *Methodik* wird genau darauf eingegangen, welche Bearbeitungsschritte und Kalibrierungsmessungen dazu notwendig sind, um schließlich je Laserscanner Reflektivitäten der Punkte zu generieren. Die Ergebnisse beider Laserscanner werden schließlich kombiniert, um NDVI-Werte zu bestimmen.

Das Kapitel *Ergebnisse und Diskussion* befasst sich schließlich mit der Analyse von Trainingsgebieten und beschreibt all jene Ergebnisse, die daraus gewonnen werden können. Folgende Forschungsfragen sollen beantwortet werden:

- Kann mithilfe von herkömmlichen Messmitteln die Funktion eines Dual-Wavelength Echidna[®] Lidar nachgebildet werden? Kann mittels zwei terrestrischen Laserscannern der NDVI gebildet werden?
- Kann der NDVI verwendet werden um Baumstrukturen zu erkennen und zu klassifizieren?
- Wie groß ist der Mehrwert durch die Messung von zwei unterschiedlichen Wellenlängen?

Kapitel 2

Theoretische und technische Grundlagen

Dieses Kapitel dient dazu, ein besseres Verständnis der theoretischen und technischen Grundlagen dieser Arbeit zu schaffen. Zunächst wird erklärt, wie Terrestrische Laserscanner (TLS) funktionieren und welche Daten aufgenommen werden. Neben der Registrierung von Punktwolken wird auch speziell darauf eingegangen, wodurch die aufgenommenen Intensitätswerte beeinflusst werden. Abschließend wird noch ein Projekt der Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) vorgestellt.

2.1 Airborne und terrestrische Laserscanner

Die Erfassung von Daten mittels Laserscannern ist aus der modernen Geodäsie und speziell der Photogrammetrie kaum mehr wegzudenken. 3D-Punktwolken können innerhalb kürzester Zeit aus der Luft (Airborne Laserscanning, ALS) oder vom Boden (Terrestrisches Laserscanning, TLS) aufgenommen werden.

Messprinzip terrestrischer Laserscanner

Die terrestrischen Laserscanner werden je nach Art der Distanzmessung in zwei Gruppen geteilt. Eine Gruppe verwendet zur Distanzmessung das Laufzeitverfahren bzw. Impulsverfahren, während sich die andere eines Phasenvergleichsverfahrens bedient. Dadurch bedingt unterscheiden sich die beiden Gruppen auch stark in ihrer Anwendung. Laserscanner mit Laufzeitmessung sind in der Lage, größere Distanzen aufzunehmen, und dadurch auch im Airborne Laserscanning im Einsatz. Phasenvergleichsscanner demgegenüber können lediglich Distanzen bis ca. 80 Meter aufnehmen, haben dafür aber eine bessere Punktlagegenauigkeit (Vosselman & Maas, 2010).

Laufzeitverfahren

Das grundlegende Prinzip des Laufzeitverfahrens ist die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle mit bekannter Geschwindigkeit in einem Medium. Durch die Messung der Zeit τ , die ein Impuls benötigt, um von der Quelle zur reflektierenden Oberfläche und zurück zu gelangen, kann man auf die Distanz R zwischen Quelle und Objekt schließen.

$$R = \frac{c}{n} \frac{\tau}{2} \quad (2.1)$$

Der Impuls breitet sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit c aus. Je nach Temperatur, Druck und Luftfeuchte korrigiert der Brechungsindex n die Lichtgeschwindigkeit für das tatsächlich durchlaufene Medium. Der zurückgesendete Impuls, auch Echo genannt, kann aus mehreren Teilsignalen bestehen. Sofern entlang des Messstrahls mehrere reflektierende Objekte sind, kann es zu mehreren Echos kommen. Dies wird in Kapitel 2.3.1 näher beschrieben.

Phasenvergleichsverfahren

Die Distanzmessung kann auch durch das Phasenvergleichsverfahren gelöst werden, indem das Phasenreststück einer modulierten elektromagnetischen Welle gemessen wird. Da dieses Messverfahren in dieser Diplomarbeit keine Anwendung findet, wird nicht näher darauf eingegangen.

2.2 Registrierung von Punktwolken

Terrestrische Laserscanner messen die Position der Punkte in einem lokalen Scannerkoordinatensystem (SKS). Das bedeutet, dass die Punktwolken je Scanposition in eigenen Koordinatensystemen vorhanden sind. Um die verschiedenen Punktwolken in einen räumlichen Zusammenhang (Projektkoordinatensystem, PKS) zu stellen, müssen die Punktwolken registriert werden. Die anschließende Georeferenzierung liefert Punktwolken in einem übergeordneten Koordinatensystem (globals KS, GKS). Die folgende Beschreibung dieses Vorganges ist an (Vosselman & Maas, 2010) und (Kraus, 2004) angelehnt.

Im Gegensatz zur gewohnten tachymetrischen Punktmessung, bei der explizit Punkte angezielt und gemessen werden, nehmen Laserscanner eine Schar von Punkten in regelmäßigem Abstand auf. Dies hat zur Folge, dass die Registrierung auf verschiedene Arten durchgeführt werden kann. Die Registrierung kann mit expliziten Punktkorrespondenzen oder auch komplett ohne erfolgen. Um in einem regelmäßigem Punktraster Punktkorrespondenzen zu erstellen, müssen Targets verwendet werden, daher auch der Name Target-basierte Registrierung. Für die Registrierung ohne expliziten Punktkorrespondenzen ist der ICP (iterative closest point) Algorithmus eine häufig verwendete Variante.

2.2.1 Target-basierte Registrierung

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Registrierung aufgrund von korrespondierenden Punkten in unterschiedlichen Koordinatensystemen. Die Punkte werden durch Targets im Blickfeld des Scanners festgelegt. Targets können durch geometrische Formen (wie Kugeln), Reflektorfolien oder Tafeln realisiert werden. Das Prinzip funktioniert für alle Targets gleich, sie werden von möglichst vielen Punkten getroffen, aus denen dann eine 3D-Koordinate (meist der Mittelpunkt) geschätzt wird. Diese Koordinaten werden dann verwendet, um die Parameter der Registrierung zu schätzen.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + R_{\omega\phi\kappa} \begin{pmatrix} s * \sin\zeta \cos\alpha \\ s * \sin\zeta \sin\alpha \\ s * \cos\zeta \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

In Gleichung 2.2 geben (X, Y, Z) die Koordinaten der Objektpunkte in einem übergeordneten Koordinatensystem an (PKS oder GKS). (X_0, Y_0, Z_0) geben die Position des Laserscannerstandpunkts im übergeordneten Koordinatensystem an und die Stellungswinkel (ω, ϕ, κ) beschreiben die Verdrehung dazu. (s, ζ, α) geben die Polarkoordinaten der Objektpunkte im lokalen Koordinatensystem an. ζ ist der Zenitwinkel, dessen Nullrichtung in der κ -Achse liegt und α ist der Horizontalwinkel, dessen Nullrichtung in die Nullrichtung des κ -Drehwinkels blickt.

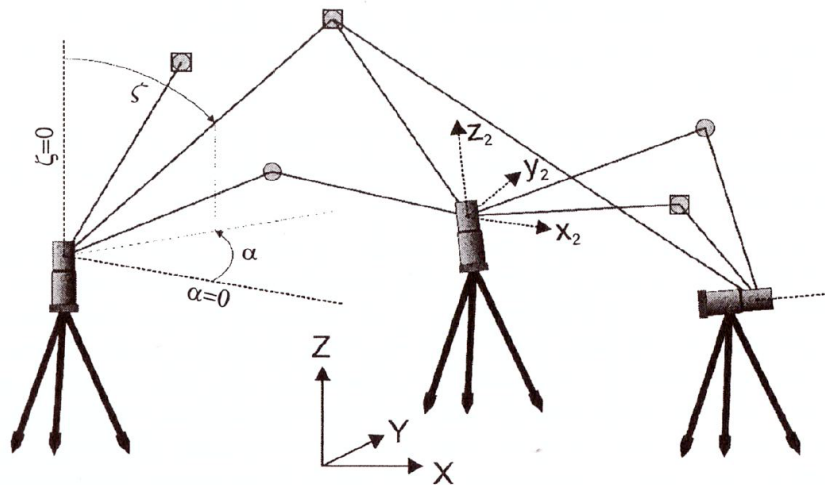


Abbildung 2.1: Verknüpfung mehrerer TLS Standpunkte (Kraus, 2004)

Sind der TLS Standpunkt zum Beispiel aus einer GPS-Messung und die Stellungswinkel durch Inklinations- und Kompassmessung bekannt, so kann mit Formel 2.2 eine direkte Georeferenzierung durchgeführt werden. Somit können die Sensorkoordinaten direkt in ein übergeordnetes Koordinatensystem überführt werden.

Sind diese jedoch unbekannt oder unzureichend bestimmt (Näherungskoodinaten), so spricht man von freier Stationierung. Laserscanner-Standpunkt und Stellungswinkel sind damit die Unbekannten, die indirekt aus mithilfe von Targets realisierten Passpunkten abgeleitet werden. Pro

Standpunkt sind mindestens drei gut verteilte Passpunkte notwendig, um die Parameter zu bestimmen.

2.2.2 Iterative Closest Point Methode

Registrierungsalgorithmen, die auf exakte Punktkorrespondenzen verzichten, werden weitestgehend zu den Iterativ Closest Point (ICP) Methoden gezählt. Aufbauend auf dem klassischen ICP Algorithmus, der erstmals von (Besl *et al.*, 1992) eingeführt wurde, gibt es einige Abwandlungen des Originalalgorithmus.

Zwei Punktwolken x und y werden durch eine euklidische Transformation in Zusammenhang gebracht:

$$\vec{y}_i = R\vec{x}_i + \vec{y}_0 \quad (2.3)$$

R gibt die Rotationsmatrix und y_0 den Translationsvektor an. Das Grundprinzip des ICP ist, dass eine Punktwolke ("slave") so zu der anderen Punktwolke ("master") verschoben und verdreht wird, dass die Summe des Quadrats der Euklidischen Distanz zwischen den räumlich nächsten (transformierten) "slave" Punkten, x_i , zu den "master" Punkten, y_i , minimiert wird:

$$E(R, y_0) = \sum_i \left\| R\vec{x}_i + \vec{y}_0 - \vec{y}_i \right\|^2 \rightarrow \min \quad (2.4)$$

mit der Euklidischen Distanz:

$$\left\| \vec{r}_1 - \vec{r}_2 \right\| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (2.5)$$

Die Fehlerfunktion $E(R, y_0)$ wird iterativ solange neu bestimmt, bis entweder eine Höchstzahl an Iterationsschritten oder ein Abbruchkriterium erfüllt wird. Mit jedem Iterationsschritt konvergiert die Fehlerfunktion in ein lokales Minimum. Die Zuordnung der räumlich nächsten "slave" Punkte zu denen der "master" Punktwolke wird für jeden Iterationsschritt neu bestimmt. Eine ausreichende grobe Registrierung ist notwendig, damit die Fehlerfunktion auch in das "korrekte" Minimum konvergiert. In Abbildung 2.2 ist nochmals das Prinzip des ICP Algorithmus schematisch abgebildet.

Neben der beim Standard ICP-Algorithmus verwendeten Punkt-zu-Punkt Zuordnung kann auch eine Punkt-zu-Ebene oder Ebene-zu-Ebene Zuordnung stattfinden. Wie in Abbildung 2.3 zu erkennen ist, werden bei der Punkt-zu-Ebene Zuordnung die Normalabstände der Punkte einer Punktwolke zu einer lokal geschätzten Tangentialebene der anderen Punktwolke minimiert. Bei der Ebene-zu-Ebene Zuordnung wird durch *Region Growing* Ebenen in den Punktwolken geschätzt und deren Abstand minimiert.

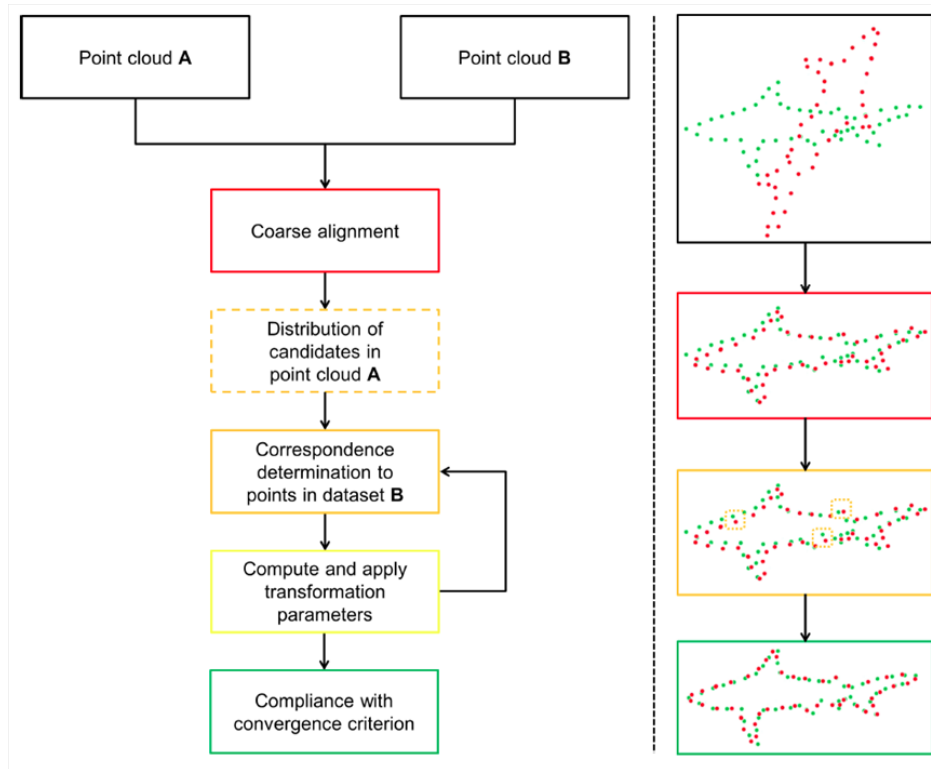


Abbildung 2.2: Grundprinzip ICP-Algorithmus (Wujanz, 2016)

2.3 Intensität und Reflektivität

Neben der reinen 3D Information kann auch ein Intensitätswert zu jedem Punkt angegeben werden. Die Intensität wird in der Literatur als Synonym für sowohl die Reflektivität, als auch die Amplitude des Messsignals verwendet, dabei ist stark zwischen den beiden Begriffen zu unterscheiden. Die Amplitude gibt die Höhe des zurückgesendeten Signals an, die der Sensor aufzeichnet. Die Reflektivität hingegen, ist jener Wert des Signals der nur mehr vom Objekt und dessen Rückstrahleigenschaften abhängen soll. Dieser Wert wird auch gern als kalibrierte, korrigierte oder normalisierte Intensität bezeichnet.

Um nun aus der Amplitude die gewünschte Reflektivität zu erhalten, muss näher betrachtet werden, wie sich die empfangene gegenüber der ausgesendeten Energie verhält. Dabei können die Faktoren des Energieabfalls in vier Hauptgruppen eingeteilt werden (Kaasalainen *et al.*, 2011): der instrumentelle Einfluss, der atmosphärische Einfluss, die Rückstrahlcharakteristik des Messobjekts und die Aufnahmegeometrie. Die Radargleichung fasst diese Einflüsse in Form einer Gleichung zusammen. Die Gleichung kann nach (Briese *et al.*, 2008) in einer Form passend zu Lidar Systemen angegeben werden:

$$P_R = \frac{P_E D_R^2}{4\pi \beta_E^2 R^4} \sigma \eta_{Atm} \eta_{Sys} \quad (2.6)$$

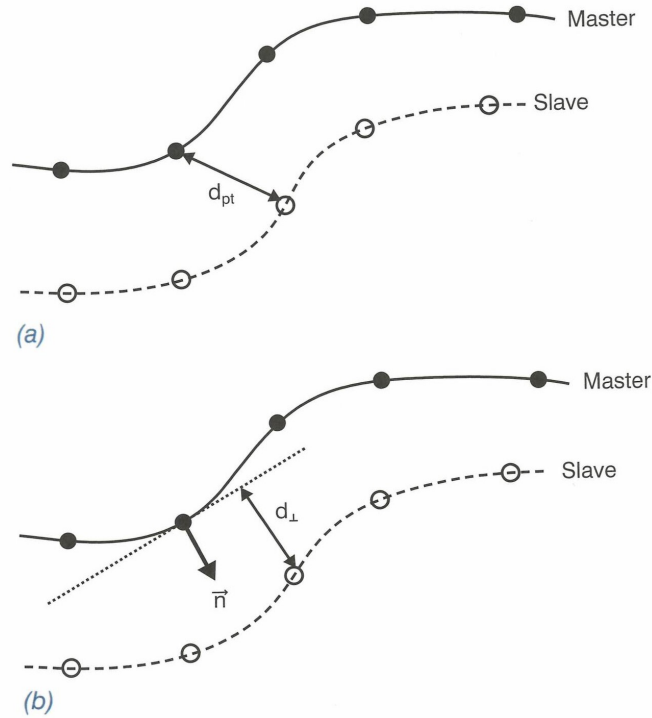


Abbildung 2.3: Zu minimierender Abstand bei (a) Punkt-zu-Punkt Zuordnung bzw. (b) Punkt-zu-Ebene Zuordnung (Vosselman & Maas, 2010)

P_E und P_R stehen für ausgesendete Energie (emitted power) und zurückgestrahlte Energie (received power). D_R steht für die Größe der Empfangseinrichtung, β_E für die Divergenz des ausgesendeten Signals. Die η -Terme stehen für die atmosphärische und systembedingte Dämpfung. R steht für die Distanz zum Messobjekt und σ ist der Rückstrahlquerschnitt (englisch backscattering cross section), die das Produkt aus Reflektivität ρ und der Größe und Ausrichtung des Objekts im Laserfootprint ist. In σ sind also die Einflüsse der Rückstrahlcharakteristik und der Aufnahmegeometrie enthalten, wie die Gleichung für σ zeigt:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \rho A_s \quad (2.7)$$

Ω gibt den streuenden Raumwinkel (englisch scattering solid angle), ρ die Reflektivität und A_s die Objektausdehnung an. Speziell bei TLS ist das gemessene Objekt meist größer als der gesamte Footprint. Unter dieser Voraussetzung und der Annahme, dass $\Omega = \pi$ ist und das Objekt diffuse Rückstrahleigenschaften hat, können A_s und σ vereinfacht werden zu:

$$A_s = \frac{\pi R^2 \beta_E^2}{4} \quad (2.8)$$

$$\sigma = \pi \rho_0 R^2 \beta_E^2 \cos \alpha \quad (2.9)$$

Die Reflektivität ρ ist in $\rho = \rho_0 \cos\alpha$ aufgespalten, was die Abhängigkeit der Reflektivität vom Auftreffwinkel am Objekt zeigt. Mit ρ_0 wird die Reflektivität bei einem Auftreffwinkel von 0° angegeben. Dies vereinfacht die Radargleichung zu:

$$P_R = \frac{P_E D_R^2}{4R^2} \rho_0 \eta_{Atm} \eta_{Sys} \cos\alpha \quad (2.10)$$

Weiters werden nach (Briese *et al.*, 2008) D_R und η_{Sys} für ein und denselben Laserscanner als konstant angesehen. Im Falle einer stabilen Energieversorgung kann auch P_E als konstant angesehen werden. Bei Aufnahmen durch ALS muss η_{Atm} aufgrund der atmosphärischen Dämpfung in Abhängigkeit der Flughöhe berücksichtigt werden. Da im Vergleich zu ALS bei TLS geringere Distanzen und weitaus weniger Luftschichten durchdringt werden, wird auch η_{Atm} als konstant angesehen. Damit vereinfacht sich die Gleichung 2.6 schließlich zu 2.11.

$$P_R = \frac{\rho C_{Cal}}{R^2} \quad (2.11)$$

Alle konstanten Terme sind zur Kalibrierkonstante C_{Cal} zusammengefasst, da sie nicht getrennt voneinander erfasst werden können.

Die Gleichung 2.6 idealisiert die Sender-Empfänger Konfiguration. Wie in (Pfeifer *et al.*, 2008) beschrieben, ist die tatsächliche Funktionsweise um einiges komplexer. So wird unter anderem angenommen, dass Sender- und Empfängereinrichtung monostatisch angeordnet sind. Das bedeutet, dass Sender und Empfänger an der selben Stelle sind. Um jedoch optische Überlagerungen zu vermeiden, sind die beiden Sensoren meist getrennt angeordnet. Dies hat zur Folge, dass der Footprint des empfangenen Signals im Sensorfeld der Empfängereinrichtung entweder gar nicht, zum Teil oder komplett abdeckt wird. Mit wachsender Entfernung der reflektierenden Objekte, wird der Footprint des zurückgesendeten Signals im Sensorfeld der Empfängereinrichtung immer mehr abgebildet, bis der vollständige Footprint vom Sensor erfasst wird. So nimmt das Signal nicht wie angenommen mit einer Distanzabhängigkeit von $1/R^2$ ab, sondern nimmt zunächst sogar zu. Dieser Effekt wird Formfaktor (englisch form factor) genannt.

In Abbildung 2.4 ist vereinfacht dargestellt, wie sich der Formfaktor (hellgrau), der theoretische $1/R^2$ Abfall (schwarz, strichpunktiert) und die Kombination beider Effekte (dunkelgrau) in Abhängigkeit der Distanz verhalten.

Nach (Kaasalainen *et al.*, 2011) ist auch die Winkelabhängigkeit der Reflektivität in der Praxis etwas komplexer als zuvor angenommen. So wurde etwa vorausgesetzt, dass die Oberfläche eine ideale diffuse Reflexion (englisch lambertian reflectance) aufweist, was nicht unbedingt der Praxis entspricht. Der Effekt ist zusätzlich stark von der Oberflächenrauheit bzw. von der Körnung der Targets abhängig.

$$I(\alpha) = a(1 - b(1 - \cos\alpha)) \quad (2.12)$$

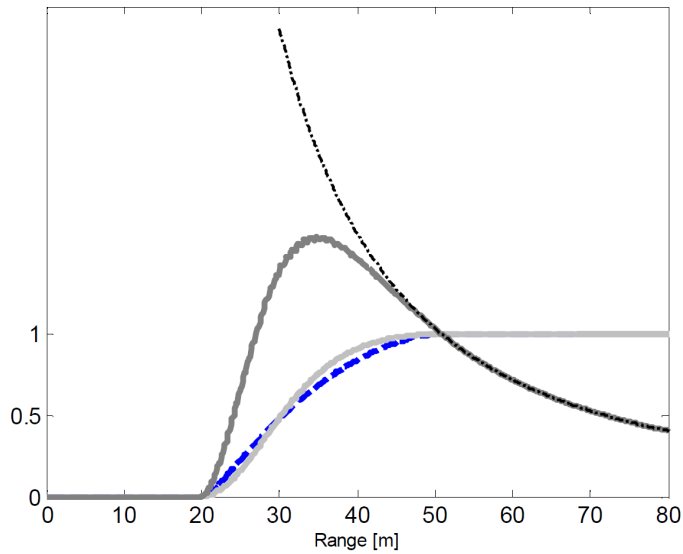


Abbildung 2.4: Formfaktor, $1/R^2$ Abfall und kombinierter Effekt (Pfeifer *et al.*, 2008)

In Gleichung 2.12 wird $I(\alpha)$ als die normalisierte Intensität abhängig vom Auftreffwinkel angegeben. Die Distanzabhängigkeit wird hierfür außer Acht gelassen. Sowohl a als auch b hängen von der Reflexionsstärke und Rauheit der Oberfläche ab. Im Falle einer idealen diffusen Reflexion wird $b = 1$. Entspricht $b > 1$, indiziert dies zunehmende gerichtete Reflexion. Eine 99% Spectralon[®] Tafel hat Werte von $a = 0.95$ und $b = 1.19$.

Kalibrierung von Intensitätswerten

Formfaktor und Kalibrierkonstante unterscheiden sich stark für jedes Laserscannermodell. Die beiden Faktoren können durch eine radiometrische Kalibrierung bestimmt werden. Die Kalibrierung von Laserscanner-Intensitätswerten wurde ursprünglich für ALS entwickelt. Das Konzept kann aber auch auf TLS umgelegt werden.

Bei der Kalibrierung von ALS Daten werden nach (Wagner *et al.*, 2008b) speziell die zurückgesendeten Intensitätswerte von Asphaltflächen beobachtet. Durch ein bekanntes Reflexionsverhalten von Asphalt kann die Kalibrierkonstante bestimmt werden. Da jedoch bei TLS Aufnahmen Objekte mit viel geringerer Distanz zum Scanner aufgenommen werden, spielt der Formfaktor eine deutlich größere Rolle, wodurch die Kalibrierung nicht so einfach wie bei ALS erfolgen kann.

Eine Möglichkeit, die Intensitätswerte von TLS Aufnahmen zu kalibrieren, ist folgende:

$$I_{Cal} = \frac{P_R}{P_{R,bekannt}} = \frac{\frac{\rho C_{Cal} F(R)}{R^2}}{\frac{\rho_{bekannt} C_{Cal} F(R)}{R^2}} = \frac{\rho}{\rho_{bekannt}} \quad (2.13)$$

F gibt den Formfaktor in Abhängigkeit der Distanz R an. Weiß man also für ein Instrument für jede Distanz R die empfangene Energie $P_{R,bekannt}$ mit bekannter Reflektivität $\rho_{bekannt}$, so können für dieses Instrument Kalibrierkonstante und Formfaktor beseitigt werden.

2.3.1 Multiple Echos und Full-Waveform

Formel 2.10 ist mit der Annahme vereinfacht worden, dass ein Objekt den gesamten Footprint des Laserstrahls abdeckt (Single Echo). In der Praxis kommt es jedoch oft vor, dass mehrere Objekte im Pfad des Laserstrahls das Signal reflektieren. So kann ein ausgesendeter Impuls mehrere Antworten (Multiple Echos) erhalten. In Abbildung 2.5 sind Multiple Echos anhand einer ALS Aufnahme dargestellt. Für TLS funktioniert aber das gleiche Prinzip.

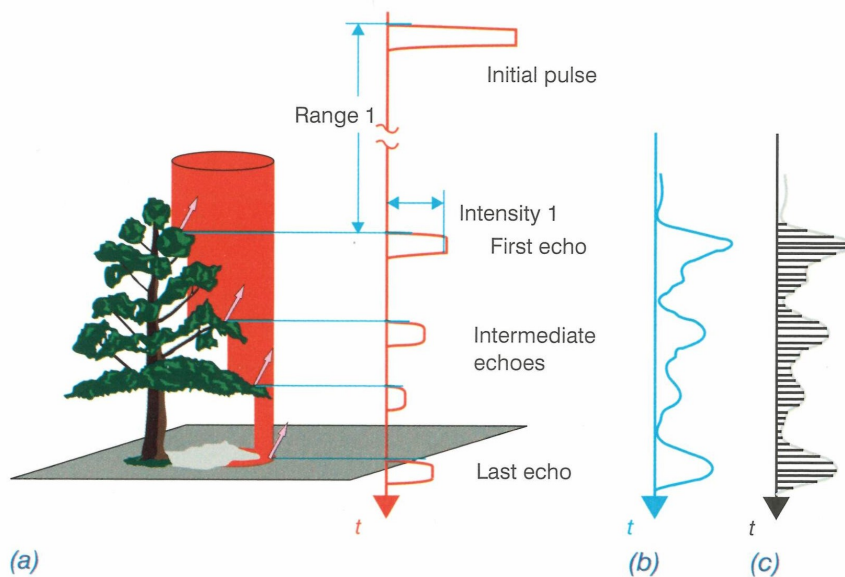


Abbildung 2.5: Multiple Echos und Full-Waveforms: (a) Diskrete Pulse (b) Waveform (c) digitalisierte Waveform (Vosselman & Maas, 2010)

Die meisten Systeme digitalisieren die Echos als diskrete Pulse. Es wird ein empfangenes Signal erst dann als Echo erkannt, wenn eine bestimmte Schranke überschritten ist (siehe Abbildung 2.5 (a)). Bei dieser Vorgehensweise kann keine Aussage über die Form des Echos getroffen werden. Im Gegensatz dazu steht die Aufnahme der Full-Waveform, bei der das zurückgesendete Signal in gigahertz Auflösung digitalisiert wird. Die Form der erhaltenen Echos kann Aufschluss geben über die Form und Art des getroffenen Objekts, dazu mehr in Kapitel 2.4.

Weiter ist zu beachten, dass hintereinander liegende Objekte nur dann als mehrere Echos erkannt werden können, wenn zwischen ihnen ein bestimmter Mindestabstand liegt. Der Mindestabstand hängt von der Pulsweite t_p des ausgesendeten Signals wie folgt ab:

$$R_1 - R_2 \geq \frac{c}{2n} t_p \quad (2.14)$$

Für eine Pulsweite von 2 ns entspricht der Mindestabstand ungefähr 30 cm (Vosselman & Maas, 2010).

Wie in Formel 2.7 zu erkennen ist, hängt der Rückstrahlquerschnitt und damit die Intensität von

der Ausdehnung des Objekts im Footprint des Lasers ab. Bei Multiplen Echos deckt diese Ausdehnung nicht wie angenommen den gesamten Footprint ab, sondern nur einen Teil. Nach (Wagner *et al.*, 2008a) wird bei natürlichen Oberflächen wie Vegetation und Erdboden angenommen, dass durch die für Infrarotwellen raue Oberfläche diffuse Reflexion auftritt und somit jedes getroffene Objekt ein Signal zum Sensor zurücksendet. Der gesamte Rückstrahlquerschnitt σ_t für einen ausgesendeten Laserpuls wäre dann:

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (2.15)$$

N entspricht der Anzahl der Echos und σ_i dem Rückstrahlquerschnitt der einzelnen multiplen Echos. Die Ausdehnung der einzelnen Objekte A_i müssen zusammen dann dem Footprint des Lasers A_s entsprechen:

$$A_s = \sum_{i=1}^N A_i \quad (2.16)$$

Um zu zeigen, wie sich die Signalstärke bei multiplen Echos verhält, wird anhand von zwei Echos behandelt:

$$\sigma_2 = \frac{4\pi}{\Omega_2} \rho_2 A_2 = \frac{4\pi}{\Omega_2} \rho_2 (A_s - A_1) = \frac{4\pi}{\Omega_2} \rho_2 A_s - \frac{\Omega_1 \rho_2}{\Omega_2 \rho_1} \sigma_1 \quad (2.17)$$

Die Gleichung soll zeigen, dass mit steigender Ausdehnung des ersten Objekts der Rückstrahlquerschnitt des zweiten Objekt abnehmen sollte. Unter der Annahme, dass es sich bei den multiplen Echos um Objekte mit ähnlicher Rückstrahlcharakteristik handelt, kann $\Omega_1 \approx \Omega_2 = \Omega$ und $\rho_1 \approx \rho_2 = \rho$ vereinfacht werden. Der Zusammenhang des gesamten Rückstrahlquerschnitts zu dem der einzelnen multiplen Echos kann dann folgendermaßen angegeben werden:

$$\sigma_i \approx \frac{A_i}{A_s} \sigma_t \quad (2.18)$$

Diese Beziehung soll nicht zu streng genommen werden, sondern lediglich die Rückstrahleigenschaften bei multiplen Echos veranschaulichen.

2.3.2 Reflektivität von Vegetation

Der Effekt von unterschiedlich starker Reflektivität je nach Oberfläche und Wellenlänge wird vor allem in der Fernerkundung genutzt. Mittels multispektralen Satellitenaufnahmen können unterschiedlichste Fragestellungen gelöst werden. So kann der Rückgang der Gletscher oder die Vitalität der Wälder (Vegetation) großräumig und über einen langen Zeitraum beobachtet werden. Abbildung 2.6 zeigt die unterschiedliche Reflektivität von diversen Oberflächen vom optischen Wellenlängenbereich bis in den mittleren Infrarotbereich.

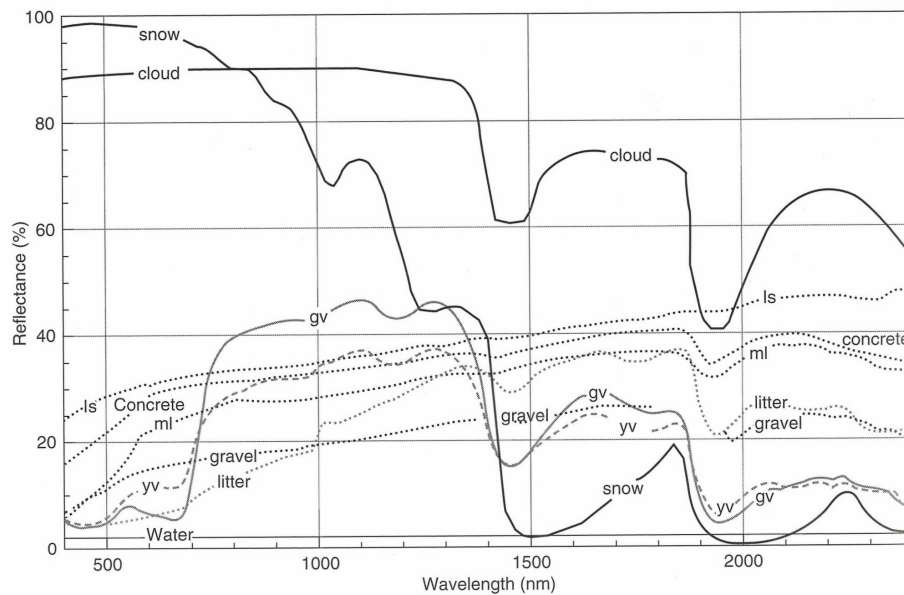


Abbildung 2.6: Reflektivität verschiedener Materialien im optischen bis nahen Infrarotbereich (gv = green vegetation, yv = yellow vegetation, ls = limestone, ml = moist loam) (Rees, 2012)

Speziell Vegetation hat eine sehr charakteristische spektrale Signatur. Chlorophyll verursacht ein lokales Maximum der Reflektivität bei $0.55 \mu\text{m}$. Dies ist auch der Grund für die zumeist grüne Farbe von Vegetation. Die starke Reflektivität von Vegetation im nahen Infrarotbereich (NIR), ungefähr zwischen 0.7 und $1.3 \mu\text{m}$, wird durch einen Streueffekt verursacht. Es kommt zu mehreren Reflektionen an wasserhaltigen Zellwänden innerhalb des Mesophylls des Blattes, wobei nur wenig Strahlung absorbiert wird. Bei Wellenlängen größer als $1.3 \mu\text{m}$ wird die Absorption der Strahlung durch Wasser signifikant, was wiederum die Reflektivität reduziert. Die Zellstruktur von alter, kranker oder "gestresster" Vegetation kann beschädigt sein, was zu einer Reduzierung der Reflektivität im Bereich von 0.7 und $1.3 \mu\text{m}$ führt. Abbildung 2.7 zeigt wie sich die Reflektivität für verschiedene Baumarten bzw. Teile des Baumes (Blätter im Englischen leaf, Äste im Englischen branchlet, Baumrinde im Englischen bark) unterscheidet (Rees, 2012).

Der Normalised Differential Vegetation Index (NDVI) nutzt genau diesen Effekt, um die Vitalität von Vegetation zu bestimmen.

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (2.19)$$

Für den Index wird die Differenz von Reflexionswerten aus dem nahen Infrarot Bereich (NIR) und dem optischen Spektralbereich (englisch visible, VIS) gebildet und dann auf einen Wertebereich von -1 bis 1 normiert. Speziell im optischen Spektralbereich wird aufgrund der charakteristischen Reflexionseigenschaften der rote Bereich des Lichtspektrums (ca. $0.6 \mu\text{m}$) ausgewählt (Carlson & Ripley, 1997). Nimmt der Index Werte im stark positiven Bereich an, so dürfte es sich um gesunde grüne Vegetation handeln. Ist er eher im Bereich um 0 , so ist dies ein Anzeichen für

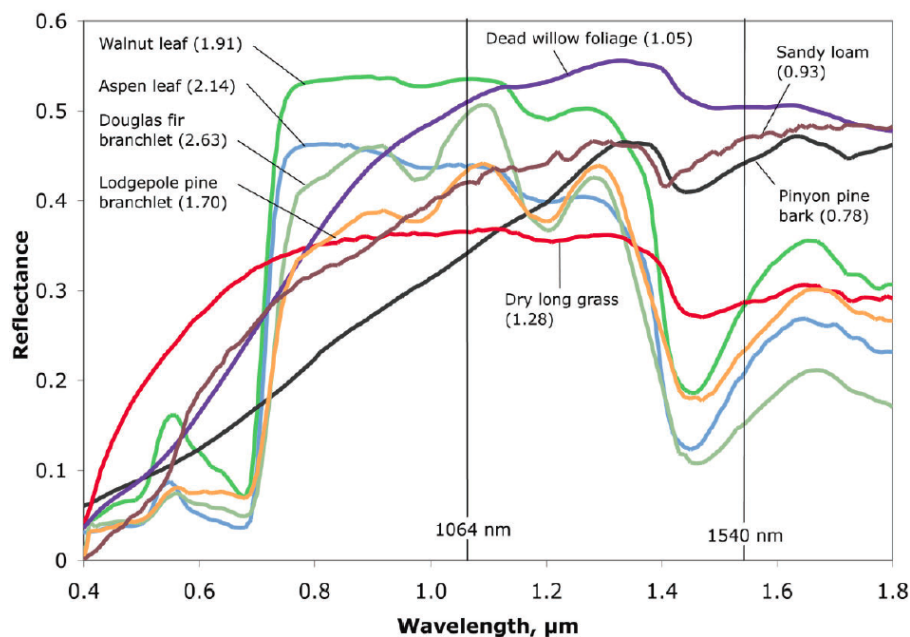


Abbildung 2.7: Reflektivität unterschiedlicher Vegetation im optischen bis nahen Infrarotbereich (Douglas *et al.*, 2012)

weniger oder kein Vorkommen von grünen Blättern (NASA, 2000).

2.4 Dual-Wavelength Echidna[®] Lidar

Die Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) hat mit dem Dual-Wavelength Echidna[®] Lidar, kurz DWEL, einen terrestrischen Laserscanner entwickelt und gebaut, der gleichzeitig mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen messen kann. Mit dem DWEL ist 2012 eine weiterentwickelte Version des ebenfalls von CSIRO entwickelten Echidna Validation Instrument (EVI) herausgebracht worden. Der DWEL ist wie der EVI ein terrestrischer Full-Waveform Laserscanner, der jedoch um eine zweite Wellenlänge erweitert ist. Sowohl EVI als auch DWEL sind mit dem Ziel gebaut worden, Waldstrukturen, wie Blätter, Äste und Stämme, in Punktwolken lokalisieren zu können. Die Funktionsweise des DWEL bzw. EVI wird nach (Howe *et al.*, 2015) und (Douglas *et al.*, 2015) beschrieben.

Die Echidna Laserscanner nehmen im Gegensatz zu den meisten terrestrischen Laserscannern die Full-Waveform des zurückgesendeten Signals auf. Dies ermöglicht anhand der Charakteristik der Form des zurückgesendeten Pulses auf das reflektierende Objekt zu schließen. Ist das zurückgesendete Signal kurz, spitz und ähnelt im allgemeinen eher dem ausgesendeten Signal, so dürfte es sich um ein "hartes" Objekt, wie ein Baumstamm oder dicker Ast, handeln. Ist das Signal jedoch langgestreckt, so dürfte es sich um ein "lockereres" Objekt, wie Blätter, handeln. Auf diese Weise können in den Punktwolken Blätter von Stämmen getrennt werden. Jedoch treten bei dieser Unterscheidung häufig Fehler auf, wenn der Stamm bzw. Ast nicht orthogonal zum Signal ist, wie

zum Beispiel an der abgerundeten Oberfläche der Baumstämme. Auch kompakte Laubklumpen können fälschlicherweise als "hartes" Objekt aufgefasst werden.

Um diesen Fehler zu vermeiden, arbeitet der DWEL mit zwei Wellenlängen, um wie in Kapitel 2.3.2 die Vorteile unterschiedlicher Reflektivität je Wassergehalt und Wellenlänge zu nutzen. Der DWEL arbeitet mit den Wellenlängen 1064 nm und 1548 nm, wobei Blätter aufgrund des Wassergehalts bei 1548 nm eine geringere Reflektivität aufweisen sollen als Stämme und Äste. Die beiden Laser werden gleichzeitig koaxial ausgesendet. Das zurückgesendete Signal wird chromatisch aufgespalten und etwaige abweichende Wellenlängen werden mit engen Bandpassfiltern eliminiert (siehe Abbildung 2.8). Zusätzlich wird die Reflexion einer internen Lambert Oberfläche gemessen, um eine beständige Signalstärke zu ermöglichen bzw. langsame Änderung der Laserstärke zu detektieren.

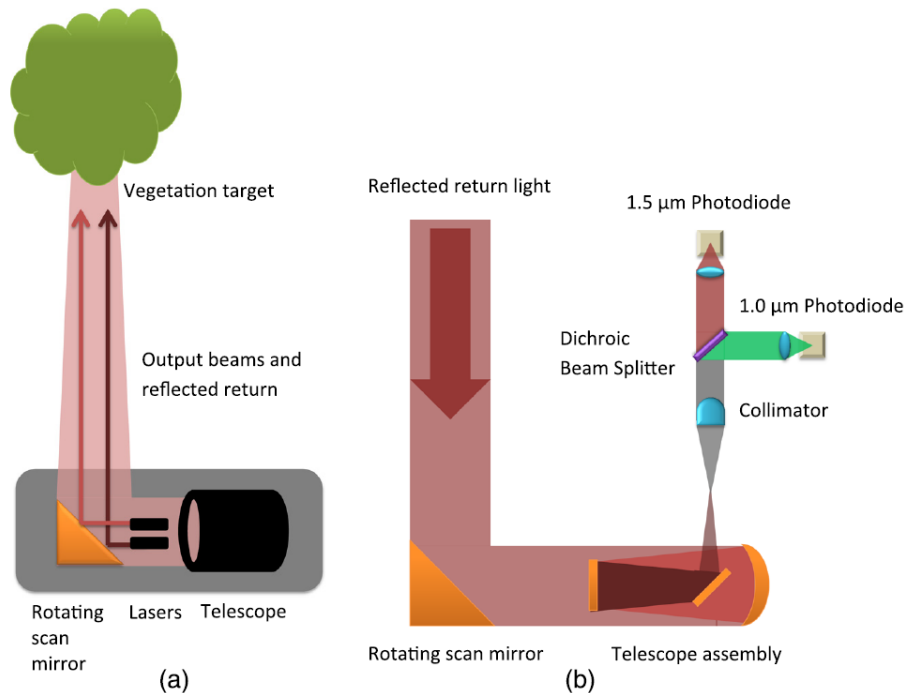


Abbildung 2.8: Schematische Funktionsweise eines DWEL (a) Blick von Außen. Der ausgesendete Strahlen werden hier als zwei Pfeile dargestellt, wohingegen sie in Wirklichkeit koaxial angeordnet sind. (b) zeigt die schematische Anordnung von Innen (Howe *et al.*, 2015)

Wie in Kapitel 2.3.2 soll ein Index dazu dienen, die Baumstrukturen zu bestimmen. Im Gegensatz zu Formel 2.19 werden nach (Howe *et al.*, 2015) jedoch zwei Wellenlängen im nahen Infrarot verwendet:

$$NDVI = \frac{I_{1.0} - I_{1.5}}{I_{1.0} + I_{1.5}} \quad (2.20)$$

Mit $I_{1.0}$ und $I_{1.5}$ werden die normalisierten Intensitäten je im 1.0 und 1.5 μm Kanal verwendet.

Abbildung 2.9 zeigt ein Beispiel, wie man anhand von NDVI-Werten Blätter von Ästen unterscheiden könnte. Die NDVI Werte stammen von einer Testmessung von Bäumen in der Sierra Nevada (California) mit dem DWEL. Zu beachten ist, dass der NDVI hier wiederum normalisiert wurde, um auf einen Wertebereich von 0 bis 1 zu passen. Das Histogramm zeigt den Unterschied an NDVI Werten mit eingebetteten Gaußfunktionen für Blätter und Äste.

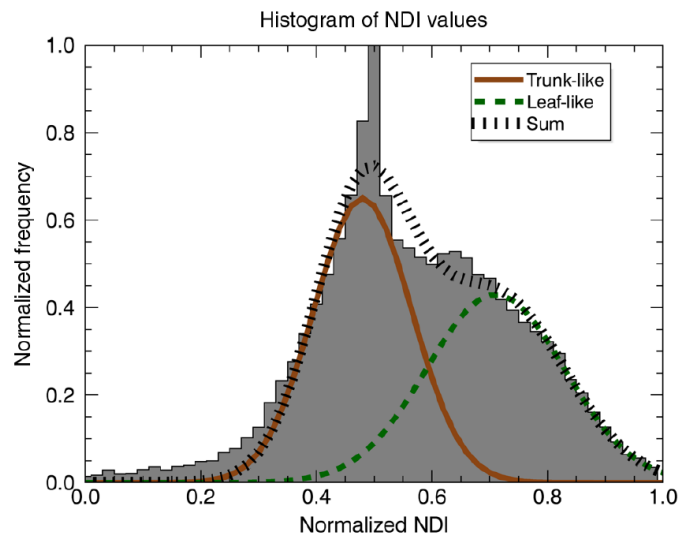


Abbildung 2.9: NDVI Werte aufgenommen mit einem DWEL mit eingebetteten Gaußkurven zur Unterscheidung von Ästen (braun) und Blättern (grün, strichliert) (Howe *et al.*, 2015)

Der DWEL befindet sich erst in der Entwicklungs- bzw. Testphase, soll aber in der Zukunft die Bestimmung von Waldstrukturen wesentlich beeinflussen. Dem "breiten" Markt steht der DWEL nicht zur Verfügung, das Prinzip aus zwei Wellenlängen könnte aber auch mit herkömmlichen Laserscannern nachempfunden werden.

Kapitel 3

Untersuchungsgebiet und Daten

3.1 Verwendete Instrumente

Bei den verwendeten Laserscannern handelt es sich um zwei Modelle (VZ-2000 und VZ-6000) der Firma Riegler Laser Measurement Systems GmbH. Die beiden Laserscanner sind so ausgewählt worden, dass ihre Wellenlängen (1064 nm und 1550 nm) denen des Dual-Wavelength Echidna Lidar (1064 nm und 1548 nm) möglichst ähneln. Um die Messungen der beiden Laserscanner miteinander zu registrieren und zu georeferenzieren, ist eine Totalstation und ein GPS-Messgerät der Firma Leica im Einsatz.

3.1.1 Riegler Laserscanner

Riegler Laserscanner sind bekannt dafür, sehr effizient und rasch 3D-Punkte trotz großer Distanzen aufzunehmen. Die Distanzmessung wird durch ein Laufzeitverfahren realisiert (Kapitel 2.1). Abbildung 3.1 zeigt den Aufbau eines terrestrischen Riegler Laserscanners. Der Laserstrahl (1) wird durch einen Polygonspiegel(2) mit mehreren reflektierenden Oberflächen abgelenkt. θ gibt an, wie weit der Laserstrahl vertikal abgelenkt werden kann. Die horizontale Ablenkung wird durch eine bis zu 360° Rotierung des gesamten Messkopfes (3) ermöglicht. Der Laserscanner kann entweder über ein Tastenfeld (4) oder über einen verbundenen Laptop (10) gesteuert werden. Um Farbinformation zu den 3D-Punkten zu erhalten, muss zusätzlich eine Kamera (9) befestigt werden.

VZ-2000

Der terrestrische Laserscanner VZ-2000 kann je nach Messmodus Punkte in einer Entfernung von bis zu 2000 Meter aufnehmen. Die unterschiedlichen Messmodi sind (Riegler, 2017b) entnommen und in Tabelle 3.1 aufgelistet. Die Genauigkeiten und technischen Eigenschaften des Lasers sind in Tabelle 3.3 aufgelistet und denen des zweiten Laserscanner VZ-6000 gegenübergestellt.

Der VZ-2000 arbeitet mit einem Laser der Wellenlänge 1550 nm, der Laserklasse 1 DIN EN 60825-1:2014. Damit ist der Laser unbedenklich für das menschliche Auge. Zudem weist der Laser eine

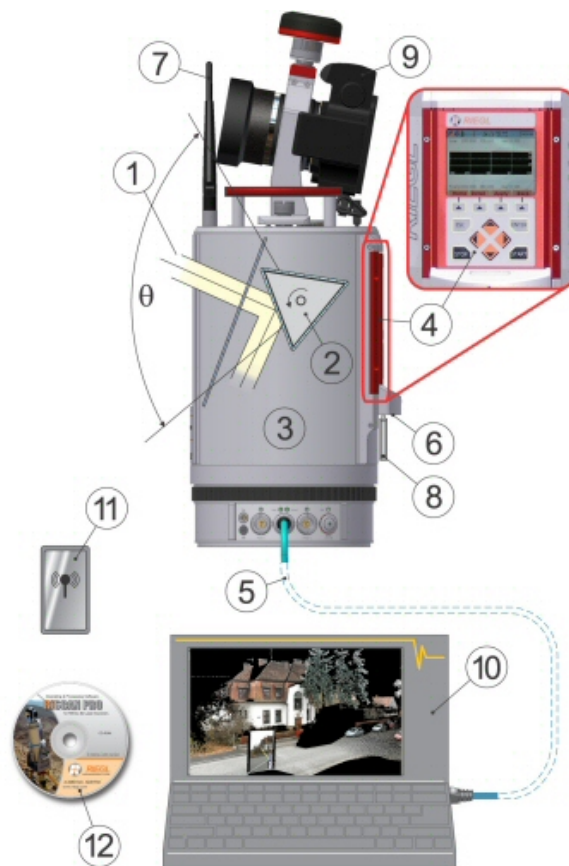


Abbildung 3.1: Allgemeiner Aufbau eines Riegl Laserscanners (Riegl, 2017a)

Divergenz von 0,3 mrad auf und hat damit einen Footprintdurchmesser von ca. 30 mm auf 100 Meter.

Der VZ-2000 kann pro ausgesendeten Laserstrahl bis zu 7 Echos aufzeichnen.

Tabelle 3.1: Messmodi VZ-2000

Laserpuls Wiederholungsrate	50 kHz	100 kHz	300 kHz	550 kHz	1010 kHz
Messung pro Sekunde	21.000	42.000	122.000	230.000	396.000
Maximale Messdistanz	2050 m	1800 m	1000 m	750 m	580 m

VZ-6000

Das TLS Modell VZ-6000 von Riegl ist für seine überaus großen Messdistanzen bekannt. Je nach Messmodus können Punkte in einer Distanz von bis zu 6000 Meter aufgenommen werden. Die unterschiedlichen Messmodi sind (Riegl, 2017c) entnommen und in Tabelle 3.2 aufgelistet. Die Genauigkeiten des Geräts und die technischen Eigenschaften des Lasers sind Tabelle 3.3 zu entnehmen.

Die für TLS vergleichsweise sehr großen Messdistanzen von bis zu 6000 Meter können nur durch

einen besonders starken Laser realisiert werden. Der verwendete Laser weist die Laserklasse 3B nach DIN EN 60825-1:2014 auf. Dies hat zur Folge, dass der Laser das menschliche Auge beschädigen könnte. In Tabelle 3.2 ist unter NOHD (englisch **N**ominal **O**cular **H**azard **D**istance) der nominelle Augen-Gefahrenabstand angegeben. Innerhalb dieses Gefahrenabstands ist bei direktem Blick in den Laserstrahl eine Beschädigung des Auges zu befürchten.

Weiters arbeitet der VZ-6000 mit einem Laser der Wellenlänge 1064 nm und einer Laserdivergenz von nur 0,12 mrad. Jedoch ist zu beachten, dass der Laser bei Austritt aus dem Gerät bereits einen Footprintdurchmesser von 15 mm aufweist. Bei 500 Meter Entfernung hat der Laser einen Footprintdurchmesser von ca. 60 mm. Der VZ-6000 hat im Gegensatz zum VZ-2000 ein eingeschränkteres vertikales Aufnahmefeld von nur $\pm 30^\circ$ zur Horizontalen.

Der VZ-6000 kann pro ausgesendeten Laserstrahl bis zu 4 Echos aufzeichnen.

Tabelle 3.2: Messmodi VZ-6000

Laserpuls Wiederholungsrate	30 kHz	50 kHz	150 kHz	300 kHz
Messung pro Sekunde	23.000	37.000	113.000	222.000
Maximale Messdistanz	6000 m	6000 m	4200	3300
NOHD	295 m	220 m	80 m	40 m

Tabelle 3.3: Technische Daten der TLS im Vergleich

	VZ-2000	VZ-6000
Genauigkeit ¹	8 mm	15 mm
Präzision ²	5 mm	10 mm
Minimaldistanz	2,5 m	5 m
Divergenz des Laserstrahls	0,3 mrad	0,12 mrad
Wellenlänge des Lasers	1550 nm	1064 nm
Vertikale Ablenkung	total 100° (+60°/-40°)	total 60° (+30°/-30°)

¹ Maß für die Übereinstimmung mit dem wahren Wert, ein σ bei 150 m unter Testbedingungen

² Maß für die Wiederholbarkeit eines Ergebnisses, ein σ bei 150 m unter Testbedingungen

3.1.2 Geodätische Messinstrumente

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, müssen für die Registrierung mehrerer Punktwolken bzw. Georeferenzierung Passpunkte bekannt sein. Üblicherweise werden diese mittels einer Totalstation aufgenommen und ausgehend von vereinzelt bekannten Punkten (Festpunkten) mit übergeordneten Koordinaten versehen.

Für die Messung ist die Totalstation TPS 1201 von Leica verwendet worden. Der TPS 1201 ist mit einer Winkelgenauigkeit von 0,3 mgon und einer Streckenmessgenauigkeit von 2mm + 2 ppm eine äußerst präzise Totalstation.

Für die Realisierung bekannter Punkte (Festpunkte) in einem globalen Koordinatensystem sind vereinzelt Bodenpunkte mit dem Leica GPS 1200 realisiert worden.

3.2 Verwendete Programme

3.2.1 RiSCAN PRO

Das Programm RiSCAN PRO (Version v2.3) ist die Begleitsoftware für Riegl TLS Systeme (Kapitel 3.1.1). Sie wird von Riegl herausgebracht und dient zur Ansteuerung der TLS und Weiterbearbeitung der aufgenommenen Daten.

In dieser Arbeit wird RiSCAN vor allem für die Registrierung und Georeferenzierung der Scanposition und damit der aufgenommenen Punktwolken verwendet.

3.2.2 OPALS - Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data

Das modulbasierte Softwarepaket OPALS (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data) ist entwickelt von den Forschungsgruppen Photogrammetrie und Fernerkundung des Department Geodäsie und Geoinformation an der Technischen Universität Wien. Wie der Name schon sagt, soll es zur Orientierung und Bearbeitung von ALS Daten dienen.

Das Hauptproblem bei der Bearbeitung von ALS Projekten ist die enorme Menge an Daten. Ein begrenzter Arbeitsspeicher verhindert das Laden gesamter Punktwolken. Deshalb ist es notwendig die Punktwolke in geeignete Teile zu ordnen und die Teile separat zu prozessieren. Der OPALS Data Manager (ODM) ist das Herzstück des Programms, das für eine effiziente Verwaltung der Punktwolke sorgt. Der ODM kann unterschiedliche Datentypen (Punkte, Linien, Polygone, etc.) speichern.

Punktdateien sind im ODM auf zwei Ebenen mit räumlichen Indizes gespeichert. Auf der ersten Ebene wird die Punktwolke in ein regelmäßiges Raster mit quadratischen Kacheln (englisch tiles) eingeteilt. Die Größe dieser Kacheln kann manuell gesetzt werden oder wird ansonsten automatisch anhand der Punktdichte bestimmt. Die Kachelgröße sollte so gewählt sein, dass durchschnittlich rund 150.000 bis 200.000 Punkte darin gespeichert sind. So können mehrere Kacheln gleichzeitig im Speicher sein. Mehrere Module verwenden diese Kacheln als Bearbeitungseinheit. Für etwaig notwendige Kachelüberlappungsbereiche muss auch für benachbarte Kacheln im Speicher Platz sein. Auf der zweiten Ebene werden die Punkte eines Kachels mit einem k-d Baum indiziert.

Neben den Koordinaten kann der ODM pro Punkt auch eine beliebige Anzahl an Attributen unterschiedlicher Dateiformate abspeichern und verwalten. Diese zusätzlichen Punktattribute können von Anfang an Teil der Punktinformation sein oder durch Anwendung der OPALS Module geschaffen sein.

Jedes OPALS Modul ist so aufgebaut, dass ausgehend von Eingangsdaten eine Reihe von Algorithmen in Abhängigkeit von bestimmten (veränderbaren) Parametern angebracht werden, um Ausgangsdaten zu produzieren. Die Module können über die Kommandozeile, über ein Python

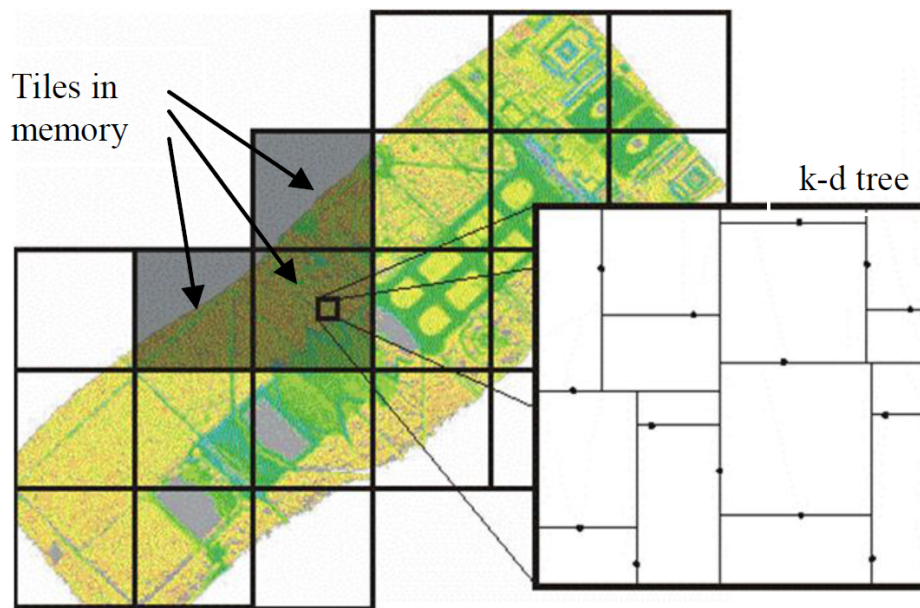


Abbildung 3.2: Räumliche Indizierung von Punkten auf zwei Ebenen mit OPALS (Otepka *et al.*, 2012)

Modul oder über eine C++ API gesteuert werden.

Als Beispiel wird folgend das *Import* Modul gezeigt. Die Parameter bzw. Optionen müssen entweder verpflichtend (englisch mandatory) angegeben werden, werden aus den Daten geschätzt (englisch estimable) oder sind optional.

Module *Import*:

- *inFile* Typ: Dateipfad Anmerkung: mandatory
Beschreibung: Eingangsdateien können in angegebener Reihenfolge geladen werden oder an ein bestehendes ODM File angehängt werden.
- *iFormat* Typ: String Anmerkung: estimable
Beschreibung: Dateiformat (xyz, las, shape, odm,...)
- *outFile* Typ: Dateipfad Anmerkung: estimable
Beschreibung: Name und Ort wo die OPALS Data Manager Datei (.odm) gespeichert werden soll
- *filter* Typ: String Anmerkung: optional
Beschreibung: Bearbeitung der Daten anhand ein oder mehrerer generischer Filter
- *tilePointCount* Typ: Integer Anmerkung: default = 200000
Beschreibung: Gibt die durchschnittliche Punktzahl an, die eine Kachel haben soll
- *tileSize* Typ: Double Anmerkung: optional
Beschreibung: Gibt die Größe der Kacheln an

Dies ist nur ein Auszug wichtiger Optionen im *Import* Modul. Weitere Optionen wären zum Beispiel das Hinzufügen eines Trajektorienfile für den Fall einer Befliegung oder die Anbringung von Transformationsparametern.

Das *Import* Modul ist nur eines von vielen Modulen. Ein weiteres mächtiges Modul ist *AddInfo* mit dem bestehende Attribute verändert oder zusätzliche Attribute geschaffen werden können, indem bestehende Attribute kombiniert werden.

Obwohl OPALS für die Prozessierung von ALS Daten entwickelt wurde, kann das Programm auch auf TLS Daten angewendet werden. Die Wahl richtiger Kachelgrößen ist dabei essentiell. Kacheln sind Körper mit einer konstanten XY-Ausdehnung und unendlicher Z-Ausdehnung. Im Nahbereich des Scanners können so mehrere Millionen Punkte in einer Kachel vorhanden sein. Dies tritt vor allem bei großer Ausdehnung in Z-Richtung, wie es bei Bäumen der Fall ist, auf. Die empfohlene durchschnittliche Punkteanzahl von 150.000 bis 200.000 wird dabei trotzdem erfüllt, weil die Punkteanzahl mit Entfernung vom Scanner stark abnimmt. Ist die Kachelgröße nicht optimal gewählt, kann es zu Problemen mit dem Arbeitsspeicher führen (Otepka *et al.*, 2012).

3.2.3 CloudCompare

CloudCompare (Version v2.7.0) ist ein Opensource Programm und steht damit lizenzfrei zur Verfügung. Das Programm kann zur Visualisierung und Bearbeitung von großen 3D-Punktwolken verwendet werden.

CloudCompare ist in C++ entwickelt und kann unter Windows, Linux und Mac OS als 32 und 64 bits Version verwendet werden. Unter einem 32bits Betriebssystem können für jedes Gigabyte Arbeitsspeicher 90 Millionen Punkte geladen werden. Sind zu den 3D-Punkten zusätzliche Attribute wie RGB-Farben, Normalvektoren oder andere Skalare vorhanden, so reduziert sich die Anzahl der ladbaren Punkte dementsprechend. Bei einem 64bits Betriebssystem können bis zu 4 Milliarden Punkte geladen werden. Diese Anzahl wird aber durch eine beschränkte Leistung der Graphikkarte deutlich reduziert. Für viele Funktionen des Programms werden die Punkte in einer Octree Struktur gespeichert. Dabei wird eine die Punkte umschließende Box in 8 Würfel geteilt. Jeder Würfel kann wieder in 8 Sub-Würfel geteilt werden. Im 32bits System kann der Octree eine Tiefe von 10, im 64bits System eine Tiefe von 21 erreichen. Die Position der 3D-Punkte wird im Würfel zu jeder Tiefe durch einen Integer Code realisiert. Diese Integer Codes können dann verwendet werden um effizient Distanzen zwischen Punkten zu bestimmen. (CloudCompare, 2015)

3.3 Messung

Die Messung erfolgte am 2.5.2017 in einem Wald im Raum Großgöttfritz im Waldviertel. Die Daten sind im Zuge einer größeren Messung für ein anderes Projekt aufgenommen worden. Das Waldstück setzt sich aus großteils Nadelbäumen zusammen. Vereinzelt treten jedoch auch Birken auf.

Das Messgebiet ist durch 15 Scans von dem TLS VZ-2000 abgedeckt worden. Lediglich die Scanpositionen 2 und 3 (siehe 3.3) sind auch mit dem TLS VZ-6000 aufgenommen worden. Insgesamt sind 31 Passpunkte (Targets) durch Reflektorfolien so verteilt worden, dass sie regelmäßig im Messgebiet verteilt sind, es aber auch umspannen. Von zwei Positionen aus sind 23 der Targets mit einer Totalstation aufgenommen worden und mit globalen Koordinaten versehen worden.

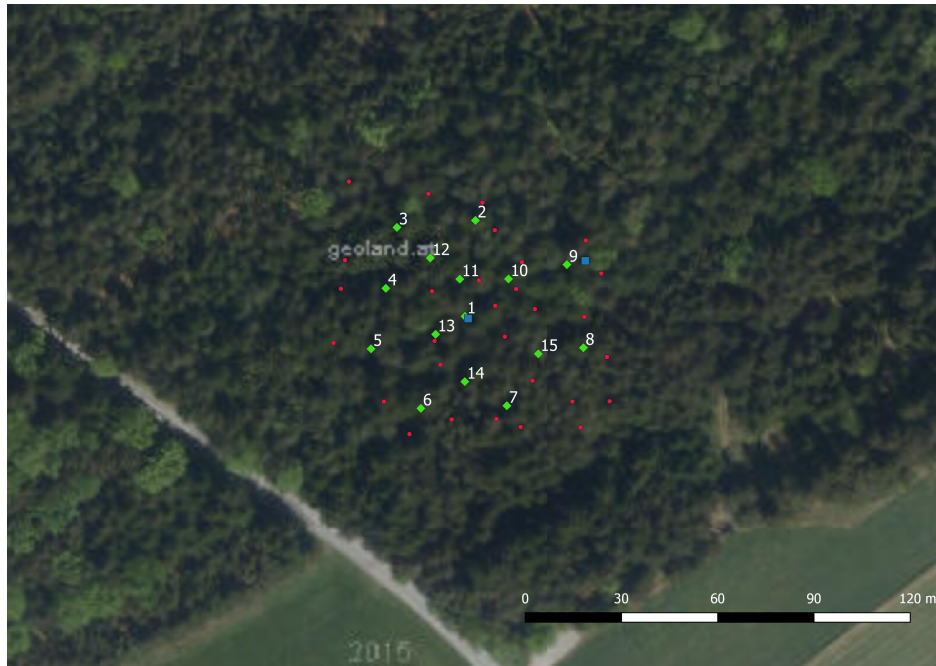


Abbildung 3.3: Messgebiet mit Scanpositionen (grün, nummeriert), Targets (rot) und Positionen der Totalstation (blau), Orthophoto von geoland.at

Messung VZ-2000

Die Datenerfassung mit dem VZ-2000 ist mit einer Messrate von 1010 kHz (siehe Tabelle 3.1) und einer Schrittweite von 0,2 mrad erfolgt. Pro Scan sind damit ca. 100 Mio Punkte aufgenommen worden.

Messung VZ-6000

Die Datenerfassung mit dem VZ-6000 hat mit der schnellstmöglichen Messrate von 300 kHz (siehe Tabelle 3.2) und einer Schrittweite von 0,3 mrad stattgefunden. Pro Scanposition sind damit ca. 40 Mio Punkte aufgenommen worden. Die Schrittweite des VZ-2000 konnte nicht übernommen werden, da aufgrund der deutlich langsameren Messrate die Messung mit 0,2 mrad zu lange gedauert hätte. Um dennoch eine möglichst übereinstimmende Messung der beiden Laserscanner zu ermöglichen, ist beim Wechsel der beiden Laserscanner das Stativ nicht verstellt worden. Mit dem VZ-6000 sind nur die Scanpositionen 2 und 3 (siehe Abbildung 3.3) gemessen worden, da die Daten dieser beiden Standpunkte für die Auswertung und Analyse ausreichen.



Abbildung 3.4: Messung VZ-2000

Messung Totalstation

Zur Georeferenzierung der Targets ist eine Totalstation in Verbindung mit einem zusätzlichen GPS-Messgerät verwendet worden. Außerhalb des Messgebietes, im freien Feld, sind 4 Positionen mit dem GPS-Messgerät bestimmt worden. Durch Beobachtungen zu diesen Punkten kann die Position der Totalstation im Wald mittels freier Stationierung bestimmt werden. Mit der Totalstation konnten von zwei Positionen aus 23 Targets aufgemessen werden. Die Ausgleichung der Beobachtungen zu den GPS-Punkten und die Berechnung der Targets erfolgt in Geosi VERM¹ (Version v16). In Tabelle 3.4 sind die Positionsgenauigkeiten der GPS-Punkte und der Standpunkte der Totalstation.

Tabelle 3.4: Positionsgenauigkeit GPS-Punkte und Standpunkte der Totalstation

	sX [mm]	sY [mm]	sY [mm]
GPS 1	22,9	20,9	40,0
GPS 2	20,4	21,6	40,0
GPS 3	20,3	20,9	40,0
GPS 4	22,7	20,7	40,0
Standpunkt 1	27,8	64,7	39,9
Standpunkt 2	18,2	53,6	40,0

¹Software zur Lösung geodätischer Ausgleichsaufgaben

Die mäßige absolute Punktgenauigkeit ist auf die schlechte Schnittgeometrie, geringe Überbestimmung und der GPS-Punktlagegenauigkeit zurückzuführen. Dies ist aber für die weitere Anwendung weniger wichtig, da die Punkte nur relativ zueinander gut bestimmt sein müssen.

Kapitel 4

Methodik

4.1 Registrierung

Die Registrierung der Punktwolken erfolgt auf zwei unterschiedliche Varianten. Eine erste Registrierung und Georeferenzierung erfolgt mit RiSCAN mittels einer Target-basierten Registrierung. Um danach eine noch bessere Übereinstimmung der Punktwolken der beiden Laserscanner zu erreichen, wird je Standpunkt eine ICP-Registrierung durchgeführt, wobei die Ergebnisse der RiSCAN-Registrierung als Näherungswerte einfließen.

4.1.1 Registrierung mittels RiSCAN

Obwohl für die spätere Weiterverarbeitung nur die Daten zweier Standpunkte verwendet werden, erfolgt für eine bessere Genauigkeit die Registrierung des VZ-2000 mit den Aufnahmen aller Standpunkte.

In einem ersten Schritt müssen übereinstimmende Targets gesucht werden. Dafür werden zuerst von nur 2 Standpunkten Übereinstimmungen gesucht, dann je ein weiterer Standpunkt hinzugenommen und die Berechnung wiederholt. Dies wird solange wiederholt, bis alle Standpunkte mittels Targets verknüpft sind.

In einem zweiten Schritt wird mittels einer Bündelblockausgleichung die Verknüpfungen für alle Standpunkte zusammen ausgeglichen und verbessert. Mit insgesamt 295 Verknüpfungen können mit einer Standardabweichung von $\sigma = 3,6[mm]$ alle Standpunkte des VZ-2000 in ein Projektkoordinatensystem gebracht werden.

Zur Georeferenzierung werden anschließend Übereinstimmungen der 31 Targets im Projektkoordinaten mit jenen 23 Targets gesucht, von denen übergeordnete Koordinaten bekannt sind. Diese Übereinstimmung kann mit einer Standardabweichung von $\sigma = 1,26[cm]$ erfolgen und bringt alle Standpunkte des VZ-2000 in ein übergeordnetes Koordinatensystem.

Zur Registrierung und Georeferenzierung der beiden Standpunkte des VZ-6000 werden die übergeordneten Koordinaten all jener Targets verwendet, die von Standpunkt 2 und 3 sichtbar und wegen der zuvor durchgeführten Registrierung des VZ-2000 bekannt sind. Es werden Verknüp-

fungen zwischen den beiden Standpunkten gesucht und sofort Übereinstimmungen zu den übergeordneten Targets gesucht. Damit können die Daten der beiden Standpunkte des VZ-6000 mit 17 gefundenen Targets mit einer Standardabweichung von $\sigma = 3,9[mm]$ in ein übergeordnetes Koordinatensystem überführt werden.

4.1.2 ICP-Registrierung

Um die Daten der beiden Laserscanner nun noch besser übereinzustimmen, wird nach der herkömmlichen Registrierung auch eine Punkt-zu-Punkt bzw. eine Punkt-zu-Ebene Zuordnung mit dem ICP-Algorithmus (siehe Kapitel 2.2.2) durchgeführt. Die Ergebnisse der bisherigen Registrierung werden als äußerst gute Näherungswerte verwendet. Erwartet werden keine groben Veränderungen durch diese zusätzliche Registrierung, für die Punktzuordnung der beiden Scanner kann es aber eine erhebliche Verbesserung bedeuten. Die beiden Standpunkte werden separat voneinander registriert. Das bedeutet, dass je Standpunkt die Punktwolke des VZ-2000 als "master" Punktwolke und die des VZ-6000 als "slave" Punktwolke dient.

Die ICP-Registrierung ist mit dem OPALS Modul *ICP* durchgeführt worden. Die Default-Werte des ICP-Moduls sind so gesetzt, dass sie für ALS Daten angewendet werden. Die Parameter sind passend für TLS Daten verändert worden. Aufgrund der sehr guten Näherungswerte werden die Parameter außerdem so gewählt, dass sie nur sehr kleine Transformationen zulassen. Als Transformationstyp ist *rigid* ausgewählt, sodass 3 Rotationen und 3 Translationen möglich sind, aber keine Maßstabsänderung. Die *Sampling Distance* gibt die durchschnittliche Weite in jede Koordinatenrichtung an, in der ein korrespondierender Punkt gesucht wird. Diese ist mit 0.05 [m] zwar sehr klein gewählt, jedoch durch die vorherige gute Registrierung groß genug gewählt, damit korrespondierende Punkte auf jeden Fall enthalten sein sollten. Weiters sind der *Search Radius* auf 0.05, das *Maximum Sigma* der *Plane Roughness* auf 0.01, die *Voxel Size* auf 0.5 und der *Reduction Point* auf die Scanposition gesetzt.

Die Transformationsparameter sind pro Standpunkt in 5 Iterationsschritten berechnet worden. Die Tabellen 4.1 und 4.3 zeigen je Standpunkt die Anzahl der korrespondierenden Punkte je Iterationsschritte sowie die Standardabweichung und den Mittelwert der Punkt-zu-Ebene Abständen ($\text{std}(\text{dp})$ und $\text{mean}(\text{dp})$) und dem Betrag der Parameterveränderung ($\text{norm}(\text{dx})$). Die Tabellen 4.2 und 4.4 beinhalten das Resultat der ICP-Registrierung, die Veränderung der Transformationsparameter gegenüber den Näherungswerten. Die Translationen (t_x , t_y und t_z) liegen nur im Millimeterbereich, die Verdrehungen (ω , ϕ und κ) verursachen bei Punkten in über 100 Meter Entfernung Veränderungen im Zentimeterbereich.

4.2 Kalibrierung der Intensität

In Kapitel 2.3 ist die Theorie beschrieben, wie man von den gemessenen Intensitätswerten (Amplituden) auf die Reflektivität der Oberfläche schließen kann. Benötigt wird dafür ein Objekt mit bekannten Reflexionseigenschaften, wie in diesem Fall eine 99% Spectralon[®]-Tafel. Die Tafel be-

Tabelle 4.1: Statistik der ICP-Korrespondenzen Standpunkt 2

Iterationsschritt	Korrespondenzen	std(dp)	mean(dp)	norm(dx)
1	1168682	0.01497	0.00011	0.00413
2	1156485	0.01422	0.00001	0.00166
3	1154536	0.01411	-0.00002	0.00067
4	1154197	0.01410	-0.00002	0.00027
5	1154269	0.01410	-0.00002	0.00012

Tabelle 4.2: Transformationsparameter durch ICP-Registrierung, Standpunkt 2

	value	sigma
omega[°]	-0.0142504	0.00006
phi[°]	0.0090554	0.00006
kappa[°]	-0.0051523	0.00003
tx [m]	0.0003942	0.00002
ty [m]	-0.0021547	0.00002
tz [m]	0.0063646	0.00003

Tabelle 4.3: Statistik der ICP-Korrespondenzen Standpunkt 3

Iterationsschritt	Korrespondenzen	std(dp)	mean(dp)	norm(dx)
1	1419505	0.01496	0.00014	0.00281
2	1400809	0.01298	0.00007	0.00092
3	1391163	0.01239	0.00005	0.00036
4	1388395	0.01225	0.00005	0.00015
5	1387042	0.01221	0.00005	0.00006

Tabelle 4.4: Transformationsparameter durch ICP-Registrierung, Standpunkt 3

	value	sigma
omega[°]	-0.0034845	0.00005
phi[°]	-0.0081184	0.00005
kappa[°]	0.0188673	0.00003
tx [m]	-0.0002905	0.00002
ty [m]	0.0015793	0.00002
tz [m]	0.0038176	0.00002

sitzt für Wellenlängen zwischen 250 und 2500 nm eine Reflektivität von über 99% und weist möglichst ideale diffuse Reflexionseigenschaften auf. Mithilfe der Intensitäten mit bekannter Reflektivität kann wie in Formel 2.13 auf die Reflektivität der Oberfläche geschlossen werden. Die

Vorgehensweise ist folgende:

1. Spectralon[®]-Tafel wird in Distanzen von 1 m bis 50 m in regelmäßigem Abstand gemessen (siehe Abbildung 4.1)
2. Je Abstand muss die Verdrehung (Normalvektor) der Spektralontafel zum Laserscanner bestimmt werden. Somit kann der Winkeleinfluss auf die Intensität berechnet und beseitigt werden.
3. Eine Kalibrierfunktion wird durch diese Messdaten geschätzt, um für jede Distanz einen Kalibrierungswert zu erhalten.
4. Aus allen Intensitätswerten der Messungen aus Kapitel 3.3 wird mit der Kalibrierfunktion auf die Reflektivität geschlossen.



Abbildung 4.1: Messung der Spectralon[®]-Tafel

Schritt 1: Messung der Spectralon[®]-Tafeln

Je Laserscanner muss eine eigene Messreihe angefertigt werden, weil Formfaktor und Distanzabhängigkeit unterschiedlich sein können. Die Messungen erfolgten am 28.4.2017 im Messkeller der Technischen Universität. Der Messkeller zeichnet sich durch seine Länge und seine konstante Temperatur aus.

Mit beiden Laserscannern wurden je 25 Messungen zwischen 1 und 50 Meter aufgenommen, bis ca. 15 Meter in ungefähr 1-Meter Abständen, dann wachsend bis maximal 5-Meter Abständen.

Schritt 2: Bestimmung der Verdrehung zum Laserscanner

Je Messung muss die Verdrehung der Tafel zum Laserscanner bestimmt werden. Für jede Tafel wird ein Normalvektor berechnet und mit dem Richtungsvektor zum Laserscanner verglichen.

Die Bestimmung des Normalvektors erfolgt in MATLAB (Version R2015b) indem über eine Eigenwertzerlegung eine Ebene in die Punkte geschätzt wird. Dafür müssen die 3D Koordinaten der Punkte auf der Tafel um den Mittelpunkt der Tafel reduziert werden (in Matrix \mathbf{X} gespeichert). Nach der Eigenwertzerlegung von $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ kann mit dem Eigenvektor des kleinsten Eigenwerts der Normalvektor der Tafel angegeben werden.

Bei der Messreihe durch den VZ-2000 treten Verdrehungen von maximal $2,6^\circ$ und beim VZ-6000 von maximal $3,3^\circ$ auf. Mit der Formel 2.12 kann der Einfluss der Verdrehung auf die Intensität bestimmt werden. Für die 99% Spectralon[®]-Tafel nehmen die Parameter Werte von $a = 0,95$ und $b = 1,19$ an. Werden die Intensitätswerte der Messungen auf die Tafel durch das Ergebnis aus Formel 2.12 dividiert, so erhält man die Intensität, die bei normalen Auftreffwinkel zu erwarten ist.

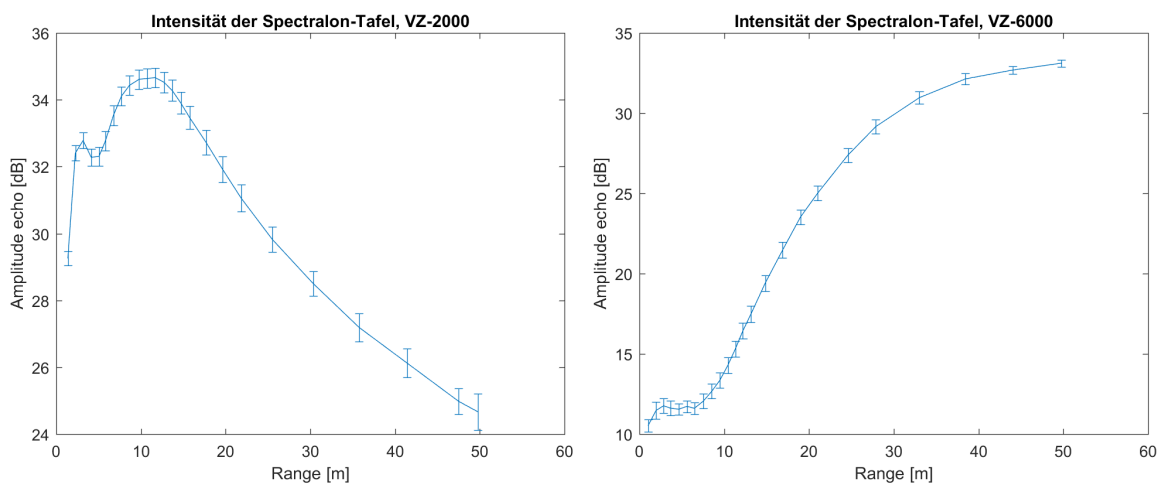


Abbildung 4.2: Intensitäten der Spectralon[®]-Tafel mit einfacher Standardabweichung, links Ergebnisse VZ-2000, rechts Ergebnisse VZ-6000

Schritt 3: Kalibrierfunktion durch Messdaten schätzen

Je Laserscanner ist eine eigene Kalibrierfunktion notwendig. Sie gibt an, welche Amplituden bei einer Reflektivität von fast 100% in Abhängigkeit der Distanz zu erwarten sind. Erst die Kalibrierfunktion ermöglicht, wie in Formel 2.13 gezeigt, die Umrechnung auf die Reflektivität der Objekte. Die Kalibrierfunktionen werden durch die Messreihen auf die Spectralon[®]-Tafel durch möglichst simple mathematische Funktionen abgebildet. Um die Funktionsparameter zu schätzen, wird MATLAB (Version R2015b) verwendet.

In Abbildung 4.2 sind die Ergebnisse der winkelbereinigten Messdaten gezeigt. Der Fehlerbalken zeigt die einfache Standardabweichung der Intensitäten aller Punkte auf der Spectralon[®]-Tafel. Die distanzabhängigen Intensitäten des VZ-2000 nehmen einen erwarteten Verlauf an (siehe Abbildung 2.4). Der weitere Verlauf über die 50 m hinaus kann damit mit einer Distanzabhängigkeit von R^2 geschätzt werden. Die Ergebnisse des VZ-6000 deuten jedoch darauf hin, dass sich dessen

4.2 Kalibrierung der Intensität

Formfaktor deutlich von dem des VZ-2000 unterscheidet. Um demnach die Kalibrierfunktion für den VZ-6000 schätzen zu können, sind unbedingt Daten über die 50 m hinaus notwendig. Erst dann kann abgeschätzt werden, mit welcher Distanz der Einfluss des Formfaktors abnimmt und die R^2 Distanzabhängigkeit überwiegt. Riegl stellt dafür auf Nachfragen Plots eigener Messreihen zur Verfügung. Abbildung 4.3 zeigt die Veränderung der Intensität in den unterschiedlichen Messmodi in bis zu 650 Meter. Türkis (meas_prog3) gibt den in unserer Messung verwendeten Messmodus von 300kHz an. Der Formfaktor des VZ-6000 lässt die Amplitude bis zum Maximum bei ca. 70 Meter ansteigen. Die Daten der Riegl Messreihe können nicht direkt übernommen werden, da auf weißes Papier anstatt Spectralon[®]-Tafeln gemessen wurde. Vorher muss die Messreihe von Riegl noch mit jener im Messkeller verglichen und eventuell angepasst werden.

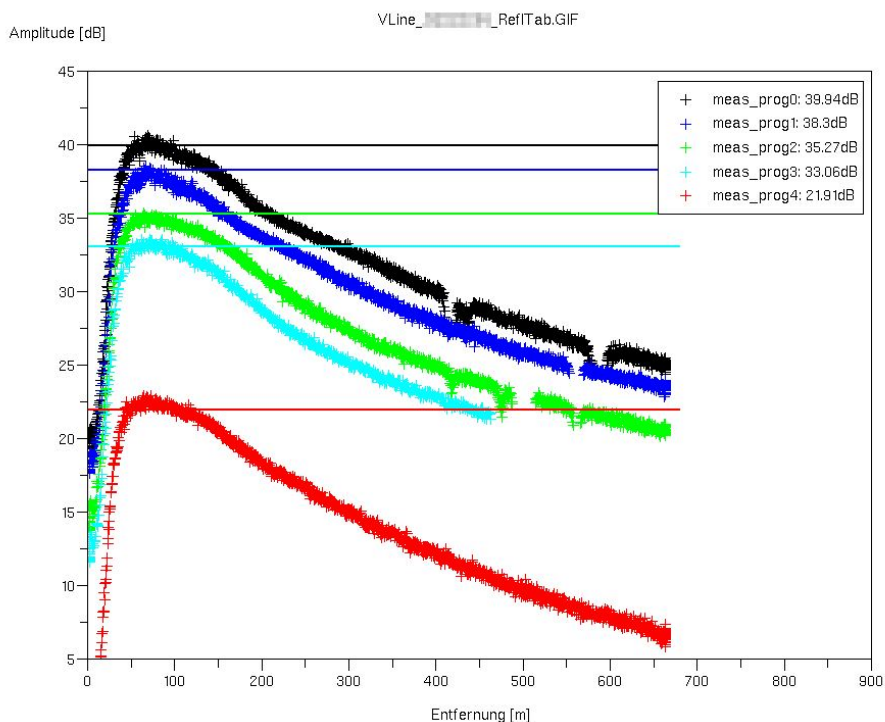


Abbildung 4.3: Messreihe VZ-6000 in unterschiedlichen Messmodi, Copyright: RIEGL Laser Measurement Systems © 2017, Source: RIEGL Laser Measurement Systems

Abbildung 4.4 zeigt in Rot die Daten der eigenen Messreihe und in Blau die aus den Plots der Abbildung 4.3 digitalisierten Daten. Der Unterschied in den beiden Messungen erklärt sich unter anderem durch unterschiedliche reflektierende Oberflächen und damit unterschiedlichen Intensitäten, aber auch durch veränderte äußere Einflüsse. Die Riegl-Messreihe wird der eigenen Messreihe so angepasst, dass der Übergang von der eigenen Messung auf die Riegl-Messreihe möglichst glatt ist. Dafür wird der Abstand der Riegl-Messreihe von der im Messkeller im Bereich von 38 und 50 Meter berechnet, gemittelt und an die Riegl-Messreihe angebracht.

Als Messdaten zur Schätzung der Kalibrierfunktion des VZ-6000 dienen auf den ersten 50 Meter die Daten der selbst gemessenen Messreihe und ab 50 Meter die Daten der angepassten Riegl-

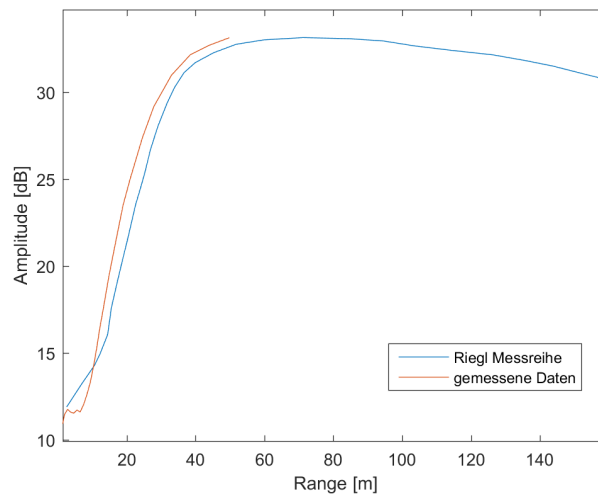


Abbildung 4.4: Vergleich der digitalisierten Riegl-Messreihe und der Kalibrierungsmessungen auf die Spectralon®-Tafel

Messreihe.

Die Ergebnisse der geschätzten Kalibrierfunktionen sind in Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 angegeben.

Schritt 4: Kalibrierfunktion an Intensitäten anbringen

Mit Hilfe der Kalibrierfunktion können nun aus den Intensitäten der Messungen aus Kapitel 3.3 Reflektivitäten geschätzt werden. Wie in Formel 2.13 wird die Amplitude eines jeden Messwertes durch die Kalibrierfunktion in Abhängigkeit der Entfernung des reflektierenden Objekts dividiert. Als Resultat erhält jeder Punkt eine Reflektivität zwischen 0 und 1. Der Wert gibt an, in wie weit deren Intensität der einer 99% Spectralon®-Tafel entspricht. Die Ergebnisse dieser Kalibrierung sind Kapitel 5.1.3 zu entnehmen.

4.3 Berechnung des NDVI

Nach der letzten Berechnung stehen nun zwei Punktwolken unterschiedlicher Auflösung und Punkteanzahl gegenüber. Beide Punktwolken besitzen je Punkt einen Wert für die Reflektivität. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 und 2.4 beschrieben, kann mithilfe zweier Reflektivitäten bei unterschiedlichen Wellenlängen der NDVI gebildet werden, der dazu dient, Vegetation zu extrahieren. Zusätzlich kann der NDVI auch helfen, das Problem der Abhängigkeit der Reflektivität vom Auftreffwinkel zu lösen (Kapitel 2.3). Vereinfacht folgt die Abhängigkeit mit $\rho = \rho_0 \cos \alpha$ gegenüber der Reflektivität bei 0° . Da die Punktwolken von den gleichen Standpunkten aufgenommen sind, wird davon ausgegangen, dass korrespondierende Punkte je den gleichen Auftreffwinkel aufweisen. Wird nun, wie beim NDVI üblich, die Differenz der Reflektivitäten durch deren Summe dividiert, so kann die Cosinus-Abhängigkeit wegdividiert werden, wodurch der Index unabhängig vom Auftreffwinkel wird.

Um nun pro Punkt den NDVI zu bestimmen, müssen je Punkt die Intensitäten beider Wellenlängen bekannt sein. Dafür müssen die Punktwolken der beiden Laserscanner zusammengefügt, korrespondierende Punkte gefunden und die Intensitäten zugeteilt werden. Die Korrespondenzen werden so gewählt, dass immer die Intensitäten der VZ-6000 Punktwolke jenen Punkten der VZ-2000 Punktwolke zugeteilt werden, die räumlich am Nächsten sind. Zusätzlich darf ein maximaler Abstand nicht überschritten werden. Der maximale Abstand ist mit 2.6 cm so gewählt, dass er dem halben Punktabstand des VZ-6000 in 100 Meter Entfernung entspricht. Unter der Voraussetzung, dass sich die Punkte am selben Objekt befinden, sollte jeder Punkt der VZ-2000 Punktwolke innerhalb von 100 Meter eine Korrespondenz finden. Mit Formel 2.20 kann für jeden Punkt mit zwei Wellenlängen der NDVI berechnet werden. Die Ergebnisse und Genauigkeit der gefundenen Korrespondenzen ist dem Ergebniskapitel unter 5.2 zu entnehmen.

4.4 Bildung von Trainingsgebieten zur Analyse der Baumstrukturen

Zusammengefasst besteht der Testdatensatz nun aus ca. 63 Mio Punkten, von denen je die Attribute NDVI, Reflektivität bei 1.0 μm , Reflektivität bei 1.5 μm , Echoanzahl bei 1.0 μm , Echonummer bei 1.0 μm , Echoanzahl bei 1.5 μm und Echonummer bei 1.5 μm bekannt sind. Die Echoanzahl beschreibt die Summe der Echos, die je Laserstrahl aufgezeichnet werden. Die Echonummer beschreibt, um das wievielte Echo es sich je Laserstrahl handelt.

Um eine Analyse der unterschiedlichen Baumstrukturen zu ermöglichen, werden manuell von je ca. 20 Bäumen die Stämme bzw. die Nadeln/das Laub extrahiert und als Trainingsgebiete verwendet. Die Bäume sind so ausgewählt, dass sie in unterschiedlicher Entfernung zu den Aufnahmezentren sind und gut über das Aufnahmegebiet verteilt sind. Im Trainingsgebiet der Stämme befinden sich ca. 800.000 Punkte und in dem der Nadeln/Laub ca. 680.000 Punkte. Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, befinden sich in diesem Wald größtenteils Nadelbäume und nur vereinzelte Laubbäume. Aufgrund dessen können in diesem Datensatz nicht ausreichend Trainingsdaten für eine eigen Klasse Laub gesammelt werden, wodurch eine gemeinsame Klasse Nadeln/Laub gebildet wird. Die Punkte der Trainingsgebiete sind Abbildung 4.5 abgebildet.

4.5 Klassifizierung der Baumstrukturen

Anhand der Trainingsgebiete aus Kapitel 4.4 werden Klassifizierungen der Baumstrukturen (Stamm und Nadeln/Laub) durchgeführt. Es wird getestet, ob anhand der NDVI-Werte eine Unterscheidung der Baumstrukturen möglich ist. Weiters wird überprüft, ob die Reflektivität einer einzelnen Wellenlänge allein dazu verwendet werden kann, um die selbe Unterscheidung zu treffen. Diese Klassifizierungen werden durch Bilden eines Schwellwertes bzw. einer Klassengrenze realisiert. Die Schwellwerte und die daraus generierten Genauigkeiten sind dem Ergebniskapitel zu entnehmen.

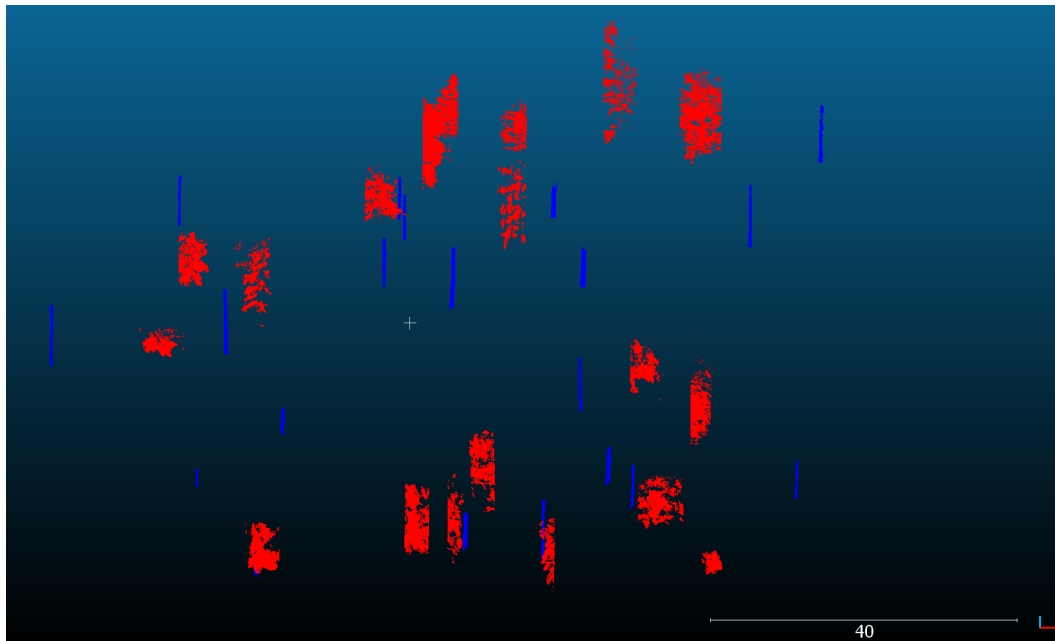


Abbildung 4.5: Trainingsgebiete für Nadeln/Laub (rot) und für Stamm (blau)

Um die Klassifizierungen zu bewerten, werden Konfusionsmatrizen gebildet und daraus die Größen der Genauigkeit abgeleitet. Tabelle 4.5 zeigt die Form einer solchen Konfusionsmatrix an. Die Matrix ist so zu lesen, dass die Werte der Diagonalen die Zahl jener Punkte angibt, die richtig klassifiziert sind (r_N und r_S). Der Wert in Zeile 1 der Spalte 2 (Tabelle 5.4) gibt jene Punkte an, die als Nadeln/Laub klassifiziert sind, aber eigentlich aus dem Trainingsgebiet Stamm kommen (f_S). Genau andersrum kommen jene Punkte aus Zeile 2 der Spalte 1 aus dem Trainingsgebiet Nadeln/Laub, sind aber fälschlicherweise als Stamm klassifiziert (f_N). Die Summe pro Spalte zeigt die Anzahl der Punkte in den jeweiligen Trainingsgebieten ($r_N + f_N$ bzw. $r_S + f_S$) und die Summe pro Zeile die Anzahl der Punkte, die jeweils klassifiziert wurden ($r_N + f_S$ bzw. $r_S + f_N$).

Tabelle 4.5: Konfusionsmatrix der Trainingsgebiete bei Klassifizierung durch NDVI bei Verwendung von Single Echos

Klasse:	Trainingsgebiete		
	Nadeln/Laub	Stamm	
Nadeln/Laub	r_N	f_S	Summe: $r_N + f_S$
Stamm	f_N	r_S	Summe: $r_S + f_N$
	Summe: $r_N + f_N$	Summe: $r_S + f_S$	Gesamt: $r_N + f_S + f_N + r_S$

Aus der Konfusionsmatrix können dann die folgenden Größen der Genauigkeit (englisch accuracy) gebildet werden:

- Producer's Accuracy zeigt den Anteil all jener Punkte, die korrekt klassifiziert sind, an der

Gesamtheit der tatsächlichen Anzahl der Punkte dieser Klasse (Anzahl an Punkten im Trainingsgebiet).

$$\text{Producer's Accuracy Nadeln} = \frac{r_N}{r_N + f_N}$$

$$\text{Producer's Accuracy Stamm} = \frac{r_S}{r_S + f_S}$$

- Error of Omission zeigt den Anteil all jener Punkte, die falsch klassifiziert sind, an der Gesamtheit der tatsächlichen Anzahl der Punkte dieser Klasse.

$$\text{Error of Omission Nadeln} = \frac{f_N}{r_N + f_N}$$

$$\text{Error of Omission Stamm} = \frac{f_S}{r_S + f_S}$$

- User's Accuracy zeigt den Anteil all jener Punkte, die korrekt klassifiziert sind, an der Gesamtheit der durch den Klassifizierungsprozess erhaltenen Klasse.

$$\text{User's Accuracy Nadeln} = \frac{r_N}{r_N + f_S}$$

$$\text{User's Accuracy Stamm} = \frac{r_S}{r_S + f_N}$$

- Error of Commission zeigt den Anteil all jener Punkte, die falsch klassifiziert sind, an der Gesamtheit der durch den Klassifizierungsprozess erhaltenen Klasse.

$$\text{Error of Commission Nadeln} = \frac{f_N}{r_N + f_S}$$

$$\text{Error of Commission Stamm} = \frac{f_S}{r_S + f_N}$$

- Overall Accuracy zeigt den Anteil all jener Punkte, die korrekt klassifiziert sind, an allen verwendeten Punkten.

$$\text{Overall Accuracy} = \frac{r_N + r_S}{r_N + r_S + f_N + f_S}$$

Die Ergebnisse der Klassifizierungen sollen mit jenen einer geometrischen Klassifizierung verglichen werden. Im Gegensatz zu den anderen, wird bei der geometrischen Klassifizierung die Nachbarschaft der Punkte zur Bildung geometrischer Attribute herangezogen. Diese Klassifizierung ist die gebräuchliche Form, um große ALS und TLS Punktwolken in Klassen einzuteilen. Dieser Vergleich soll lediglich zeigen, wie dieser Datensatz durch eine herkömmliche Variante klassifiziert aussehen kann und welche Stärken und Schwächen auftreten, wenn die Verteilung der Punkte in der Nachbarschaft einbezogen werden.

Zur Bildung des Klassifizierungsmodells werden wieder dieselben Trainingsgebiete wie zuvor verwendet. Die Erstellung und Anwendung des Modells erfolgt mit der Klassifizierungsfunktion von OPALS. Der Entscheidungsbaum wird mit jenen Attributen gebildet, die für eine geometrische Klassifizierung üblich sind: X-, Y- und Z-Koordinate der Normalen, NormalSigma0, Linearität und Planarität. Die Normalen und das NormalSigma0 können mit dem OPALS Modul *Normals* berechnet werden, wobei als Suchradius 10 cm und als maximale Nachbarschaftszahl 140 ausgewählt sind. Die Linearität und Planarität werden aus den Eigenwerten der Normalenberechnung gebildet. Das Ergebnis der geometrischen Klassifizierung und deren Vergleich zu den anderen Klassifizierungen ist wieder dem Ergebniskapitel unter Abschnitt 5.6 zu finden.

Kapitel 5

Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden zuerst die Ergebnisse der Kalibrierung und der Punktzuordnung besprochen und schließlich das Potential dieser korrespondierenden Datensätze für die Klassifizierung von Stämmen, Ästen, Nadeln und Blätter analysiert.

5.1 Ergebnis der Kalibrierung

In Kapitel 4.2 ist beschrieben, wie die Daten zur Kalibrierung der Intensitäten aufgenommen und bearbeitet werden müssen um letztendlich Kalibrierfunktionen abzuleiten. Die aus diesen Daten beider TLS geschätzten Kalibrierfunktionen sind folgende:

5.1.1 Kalibrierfunktion VZ-2000

Die Kalibrierfunktion des VZ-2000 ist in 2 Teile geteilt. Bis 16 Meter wird die Messreihe durch ein Polynom dritten Grades abgebildet:

$$f(x) = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4 \quad (5.1)$$

mit den Parametern $p1 = 0.002849$, $p2 = -0.152123$, $p3 = 2.279303$ und $p4 = 24.229356$. Abbildung 5.1 zeigt die geschätzte Funktion für den Bereich von 5 bis 16 Meter und die Residuen zu den Messwerten. Die geschätzte Standardabweichung dieser Funktion zu den Messwerten beträgt $\sigma = 0.0614[dB]$.

Für die Schätzung des zweiten Teils der Kalibrierfunktion sind nur Daten bis 50 Meter vorhanden. Um abschätzen zu können, wie die Kalibrierfunktion weiterverlaufen könnte, wird auf die physikalischen Grundlagen, der Radargleichung aus Kapitel 2.3 zurückgegriffen. In der Radargleichung wird Intensität als lineare Größe aufgefasst, Riegl gibt seine Intensitäten jedoch als logarithmische Größe (in Dezibel [dB]) aus. Die Umrechnung zwischen den beiden Größen ist mit $x[dB] = 10 * \log_{10}y$ bzw. $y = 10^{x[dB]/10}$ bekannt. Die Kalibrierfunktion ist damit für Distan-

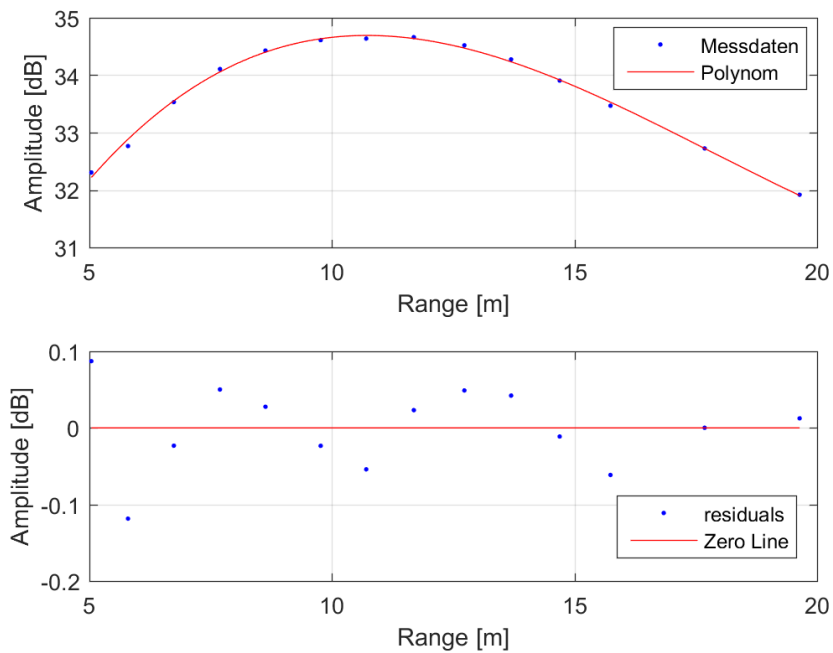


Abbildung 5.1: oben: Kalibrierfunktion VZ-2000 für den Bereich 5 bis 16 Meter, unten: Residuen der geschätzten Funktion zu den Messwerten

zen von über 16 Meter für den Fall von linearen Größen:

$$f(x) = \frac{a}{x^2} + b \quad (5.2)$$

In diesem Fall handelt es sich jedoch um logarithmische Intensitätswerte, damit verändert sich die Funktion zu:

$$f(x) = 10 * \log_{10}\left(\frac{a}{x^2} + b\right) \quad (5.3)$$

mit den Parametern $a = 541388.192120$ und $b = 86.110263$. Abbildung 5.2 zeigt die geschätzte Funktion für Distanzen größer als 16 Meter und die Residuen zu den Messwerten. Die geschätzte Standardabweichung dieser Funktion zu den Messwerten beträgt $\sigma = 0.2266[dB]$.

Abbildung 5.3 zeigt die Kombination beider Funktionen im Vergleich zu den Messdaten sowie deren Standardabweichung. Die Funktion ist hier nur bis 150 Meter angegeben, kann aber auch an Daten größerer Distanzen angewendet werden.

5.1.2 Kalibrierfunktion VZ-6000

Um für die Kalibrierfunktion möglichst gut angepasste und dennoch mathematisch einfache Funktionen zu finden, ist sie in 3 Teile geteilt. Der erste Teil liegt zwischen 5 und 12 Meter und wird durch ein Polynom zweiten Grades realisiert:

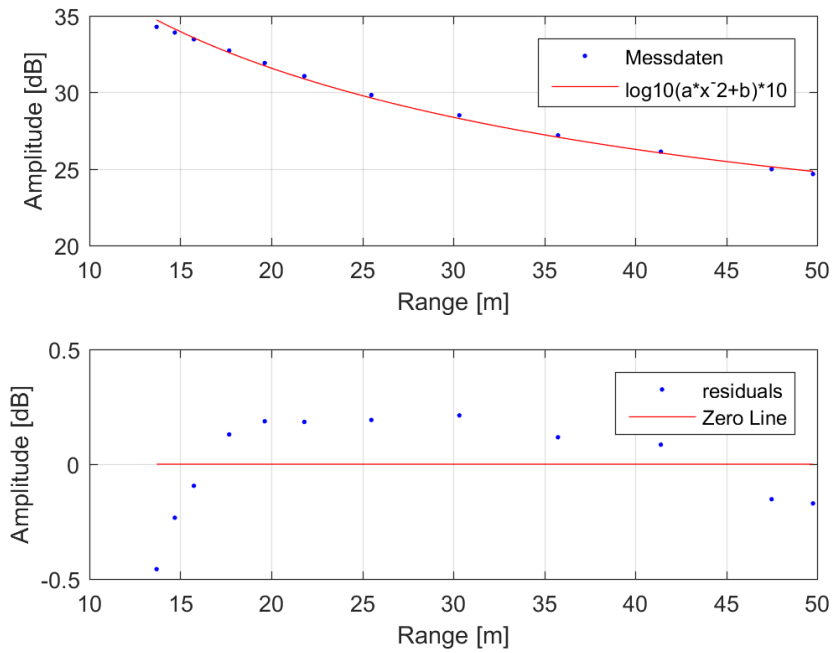


Abbildung 5.2: oben: Kalibrierfunktion VZ-2000 für Distanzen größer als 16 Meter, unten: Residuen der geschätzten Funktion zu den Messwerten

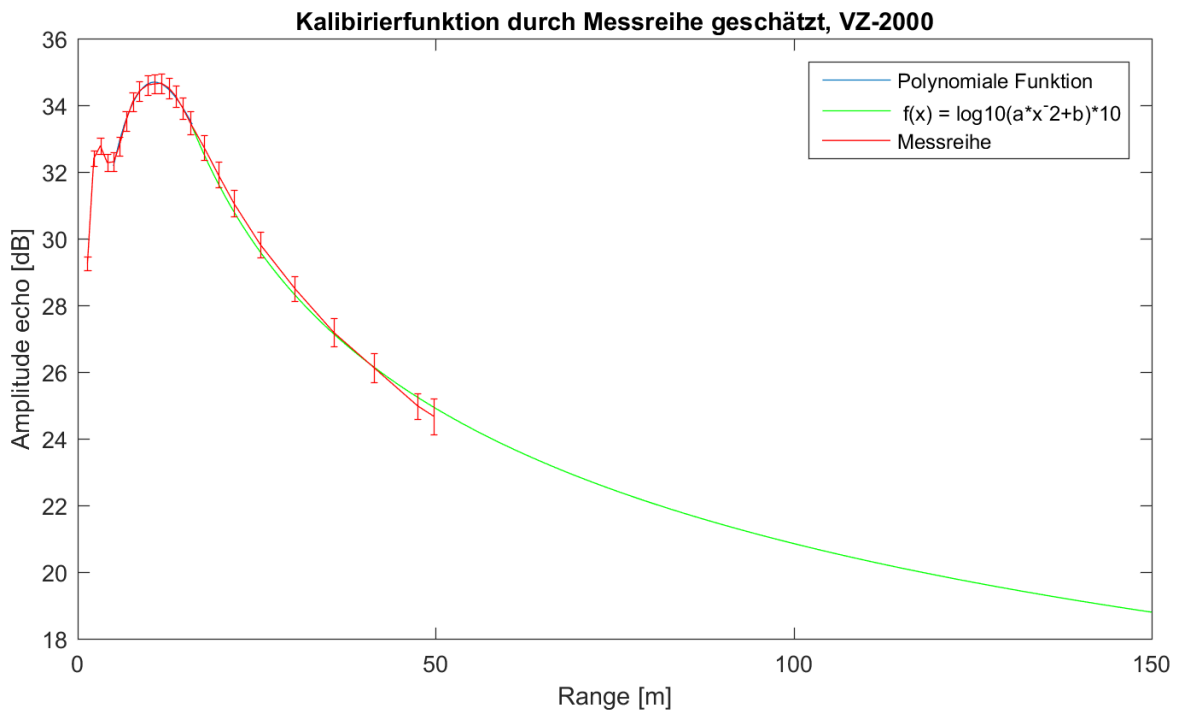


Abbildung 5.3: Kalibrierfunktion VZ-2000 im Vergleich zu den Messdaten

$$f(x) = p1 * x^2 + p2 * x + p3 \tag{5.4}$$

5.1 Ergebnis der Kalibrierung

mit den Parametern $p_1 = 0.104039$, $p_2 = -1.106174$ und $p_3 = 14.507302$. Abbildung 5.4 zeigt die geschätzte Funktion für den Bereich von 5 bis 12 Meter und die Residuen zu den Messwerten. Die geschätzte Standardabweichung dieser Funktion zu den Messwerten beträgt $\sigma = 0.0987[\text{dB}]$.

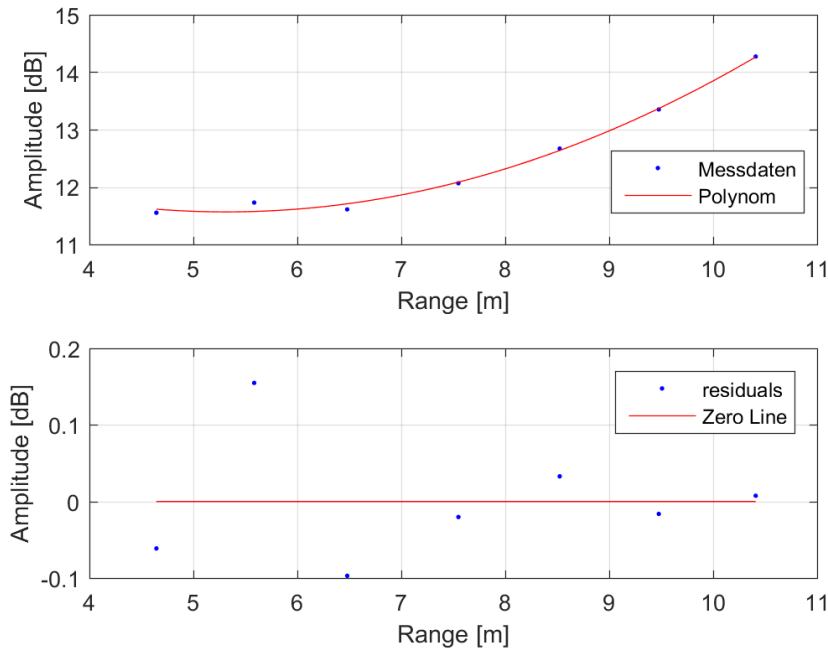


Abbildung 5.4: oben: Kalibrierfunktion VZ-6000 für den Bereich 5 bis 12 Meter, unten: Residuen der geschätzten Funktion zu den Messwerten

Der zweite Teil liegt zwischen 12 und 128 Meter und wird durch eine Exponentialfunktion realisiert:

$$f(x) = a \exp(bx) + c \exp(dx) \quad (5.5)$$

mit den Parametern $a = 36.018655$, $b = -0.000818$, $c = -45.562009$ und $d = -0.070551$. Abbildung 5.5 zeigt die geschätzte Funktion für den Bereich von 12 bis 128 Meter und die Residuen zu den Messwerten. Die geschätzte Standardabweichung dieser Funktion zu den Messwerten beträgt $\sigma = 0.2234[\text{dB}]$.

Der dritte Teil der Kalibrierfunktion wird durch die Messwerte mit Distanzen größer als 128 Meter geschätzt. Die Funktion ist, wie in Formel 5.4 dargestellt, ein Polynom zweiten Grades. Hierbei sind die Parameter $p_1 = 0.000055$, $p_2 = -0.063555$ und $p_3 = 39.713595$. Abbildung 5.6 zeigt die geschätzte Funktion für Distanzen größer 128 Meter und die Residuen zu den Messwerten. Die geschätzte Standardabweichung dieser Funktion zu den Messwerten beträgt $\sigma = 0.1417[\text{dB}]$.

Abbildung 5.7 zeigt die Kombination der drei Funktionen im Vergleich zu den Messdaten. Die Funktion ist hier nur bis ca. 250 Meter angegeben, kann aber auch an Daten größerer Distanzen angewendet werden. Die Messdaten weisen wie auch in Abbildung 4.2 zu sehen ist, eine Standardabweichung von durchschnittlich $0.4258 [\text{dB}]$ auf, die Funktionen weisen im Vergleich zu

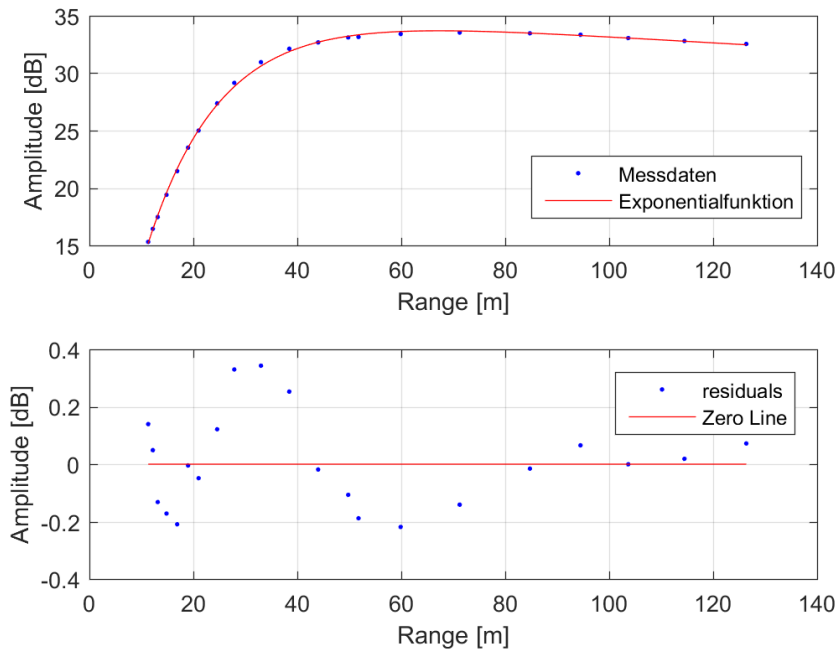


Abbildung 5.5: oben: Kalibrierfunktion VZ-6000 für den Bereich 12 bis 128 Meter, unten: Residuen der geschätzten Funktion zu den Messwerten

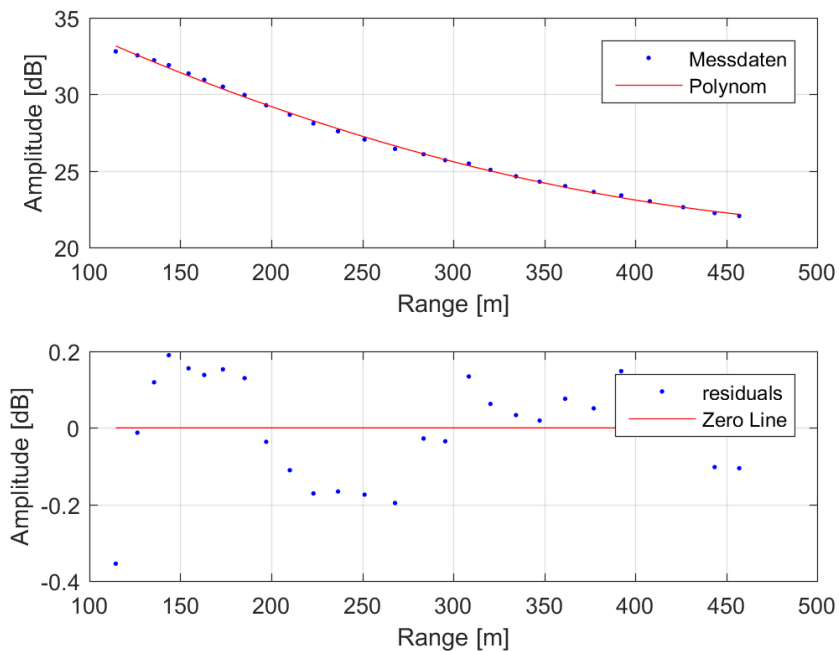


Abbildung 5.6: oben: Kalibrierfunktion VZ-6000 für den Bereich über 128 Meter, unten: Residuen der geschätzten Funktion zu den Messwerten

den Messdaten Residuen von 0.0987 [dB], 0.2234 [dB] bzw. 0.1417 [dB] auf. Die Genauigkeit

der geschätzten Funktionen liegt damit in einem annehmbaren Bereich.

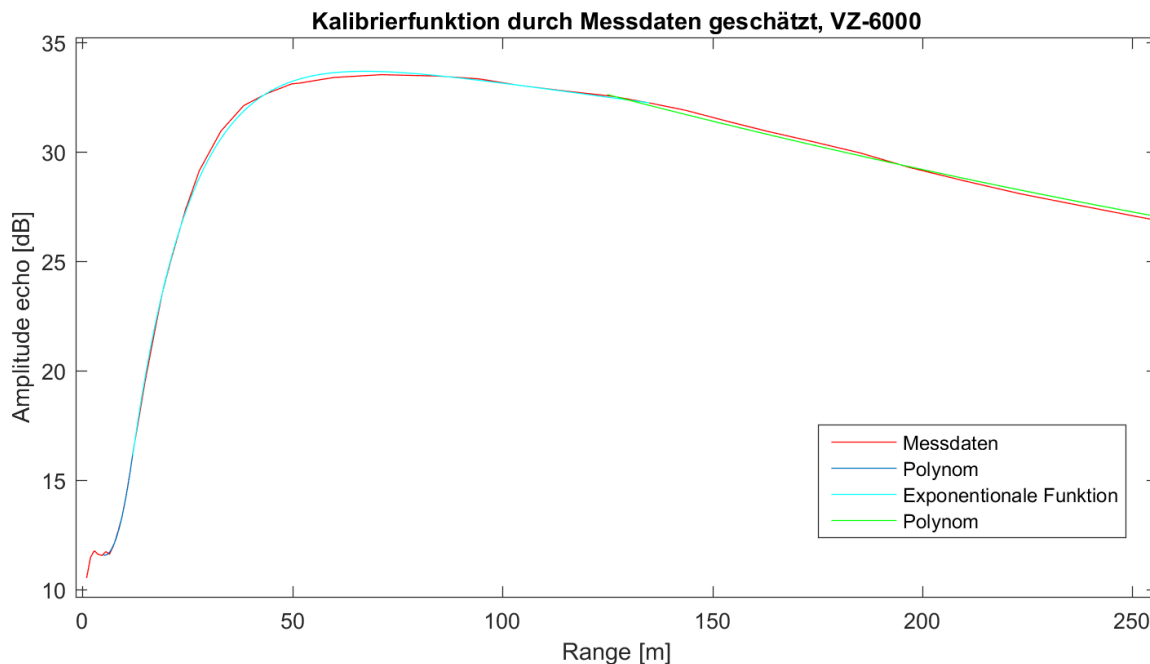


Abbildung 5.7: Kalibrierfunktion VZ-6000 im Vergleich zu den Messdaten

5.1.3 Kalibrierergebnisse

In Abbildung 5.8 sind die Ergebnisse nach dem Anbringen der Kalibrierfunktion je Laserscanner abgebildet. Bei dem Histogramm zum VZ-6000 ist zu erkennen, dass ein Teil der Daten eine Reflektivität von deutlich über 1 aufweist. Betrachtet man diese Punkte isoliert, so handelt es sich dabei vor allem um Bodenpunkte innerhalb einer Distanz von ca. 15 m oder um die Punkte auf Reflektormarken. Die Kalibrierfunktion ist also für den Nahbereich aufgrund der Stärke des Lasers nicht optimal. Die Reflektormarken andererseits haben eine größere Reflektierbarkeit als die Spektralon-Tafel aufweisen und haben somit eine Reflektivität von größer 1.

Nun soll noch getestet werden, ob die Kalibrierungsfunktion für beide Laserscanner aus den aufgezeichneten Amplituden erfolgreich Reflektivitäten berechnet hat. Dafür werden die Reflektivitäten einzelner Baumstämme in unterschiedlicher Entfernung zum Aufnahmezentrum verglichen. Abbildung 5.9 zeigt den Vergleich für beide Laserscanner. Die ähnliche Reflektivität der Baumstämme mit variierendem Abstand vom Aufnahmezentrum deutet darauf hin, dass die Kalibrierfunktion für beide Laserscanner realistische Werte liefert.

5.2 Ergebnis der Punktkorrespondenzen zur Bildung des NDVI

Abbildung 5.10 zeigt das Histogramm der Abstände der korrespondierenden Punkten. Die rote Linie gibt den Schranken des Maximalabstandes von 2,6 cm zu den Nearest Neighbours an.

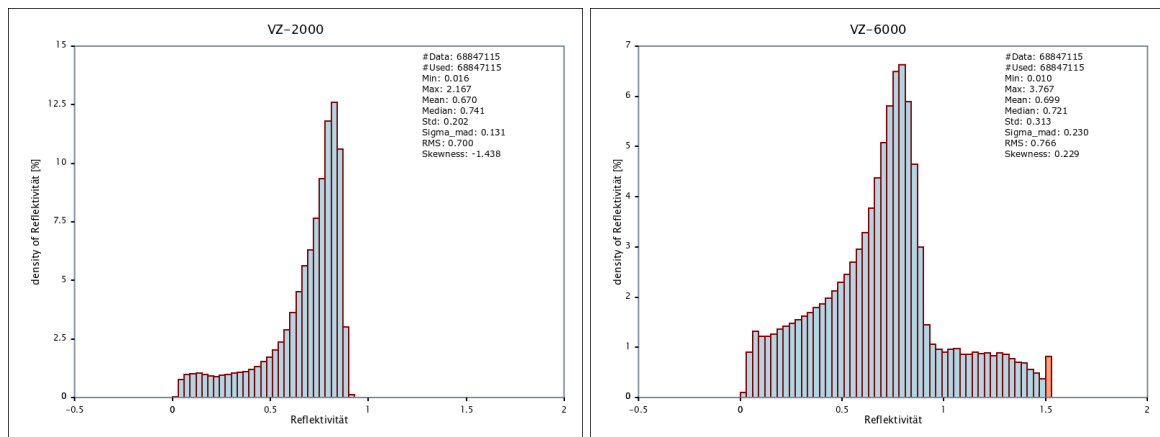


Abbildung 5.8: Histogramm der Reflektivitäten je Laserscanner (links VZ-2000, rechts: VZ-6000)

Abbildung 5.11 zeigt links das Histogramm der Distanzen all jener Punkte, die innerhalb der Schranke des Maximalabstandes liegen. Für rund 63 Mio Punkte können unter diesen Kriterien Korrespondenzen gefunden und der NDVI berechnet werden. Der durchschnittliche Abstand der korrespondierenden Punkte beträgt ca. 1,2 cm und ist damit kleiner als die Footprintgröße bei 50 m (1,5 cm). Abbildung 5.11 zeigt rechts, wie sich die Distanz der korrespondierenden Punkte mit wachsendem Abstand zum Laserscanner verhält. Angegeben sind je die Mediane inklusiver einfacher Standardabweichung in 10 Meter-Schritten zum Aufnahmezentrum.

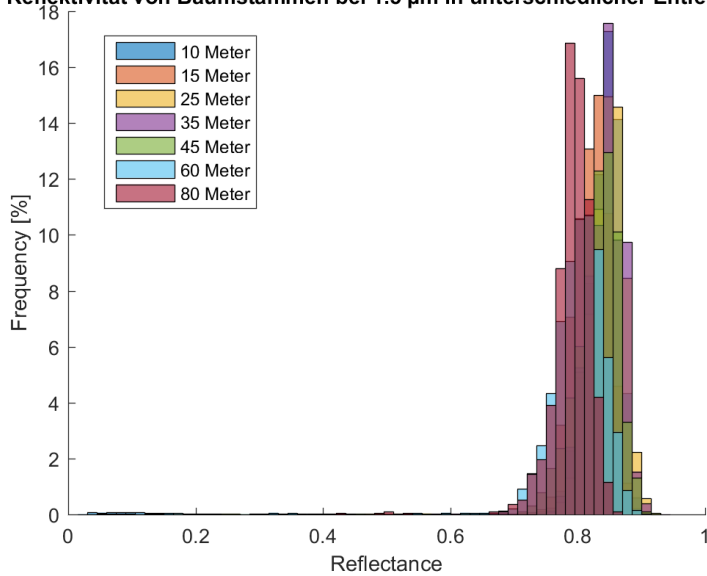
5.3 Analyse der Baumstrukturen

Im folgenden Kapitel sollen die Reflektivitäten und NDVI-Werte der Trainingsgebiete aus Kapitel 4.4 anhand ihrer Anzahl an Echos und Echonummer analysiert werden. Tabelle 5.1 zeigt, wie viele der Punkte Single Echos und wie viele Multiple Echos sind. In den Trainingsgebieten treten für die Intensitäten des VZ-2000 (Wellenlänge 1.5 μm) Multiple Echos mit maximal 2 Echos auf. In Kapitel 3.1.1 ist beschrieben, dass in den Daten des VZ-2000 bis zu 7 Echos pro Strahl auftreten können, diese kommen aber in diesen Trainingsdaten nicht vor. Bei den Intensitäten des VZ-6000 (Wellenlänge 1.0 μm) treten in den Trainingsgebieten Multiple Echos mit bis zu 4 Echos auf. Die Tabellen 5.2 und 5.3 zeigen die Summe der Punkte je nach Anzahl der Echos und der Echonummer für die beiden Wellenlängen. Zusätzlich ist noch die Anzahl der First Echos, also jenen Echos die unabhängig der Echoanzahl als erstes zurückgesendet werden, angegeben.

Tabelle 5.1: Single Echos und Multiple Echos der Trainingsgebiete

	SingleEchos 2000	MultipleEchos 2000	SingleEchos 6000	MultipleEchos 6000
Nadeln/Laub	324.121	354.071	131.321	546.871
Stamm	686.732	118.815	695.745	109.802

Reflektivität von Baumstämmen bei 1.5 μm in unterschiedlicher Entfernung



Reflektivität von Baumstämmen bei 1.0 μm in unterschiedlicher Entfernung

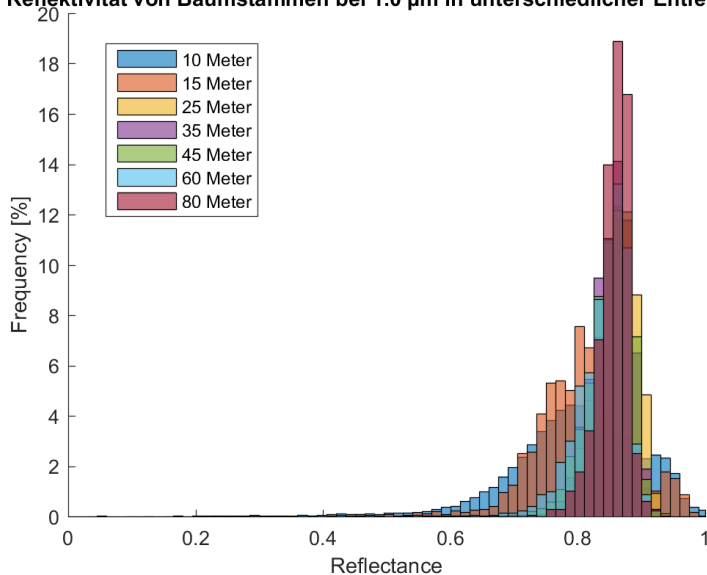


Abbildung 5.9: Vergleich von Reflektivitäten der Baumstämmen in unterschiedlicher Entfernung, oben 1.5 μm (VZ-2000), unten 1.0 μm (VZ-6000)

5.3.1 Reflektivitäten der Baumstrukturen

Um nun Aussagen über die Baumstrukturen treffen zu können, müssen die Reflektivitäten der Nadeln/Laub und der Stämme getrennt voneinander analysiert werden.

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 angesprochen, wird die Amplitude und damit die Reflektivität stark von der Art der Echos beeinflusst. So sollte sich die Reflektivität eines einzelnen Single Echo so verhalten, wie die Summe aller Reflektivitäten der Multiplen Echos eines ausgesendeten Laserstrahls. Zusätzlich hängt die Reflektivität jedes einzelnen Multiplen Echos von der Ausbreitung

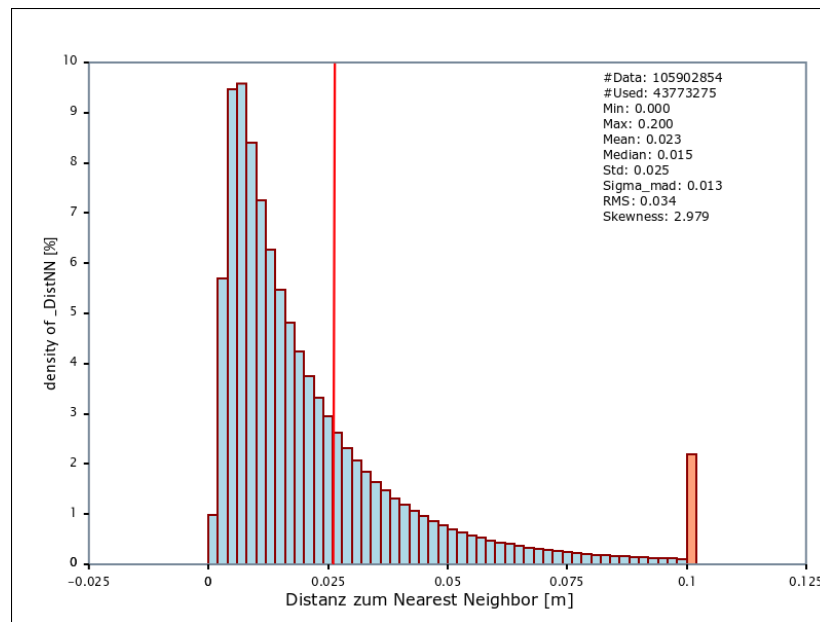


Abbildung 5.10: Histogramm der Distanzen der korrespondierenden Punkte inklusive der Schranke des Maximalabstandes (rote Linie), Daten von Standpunkt 2

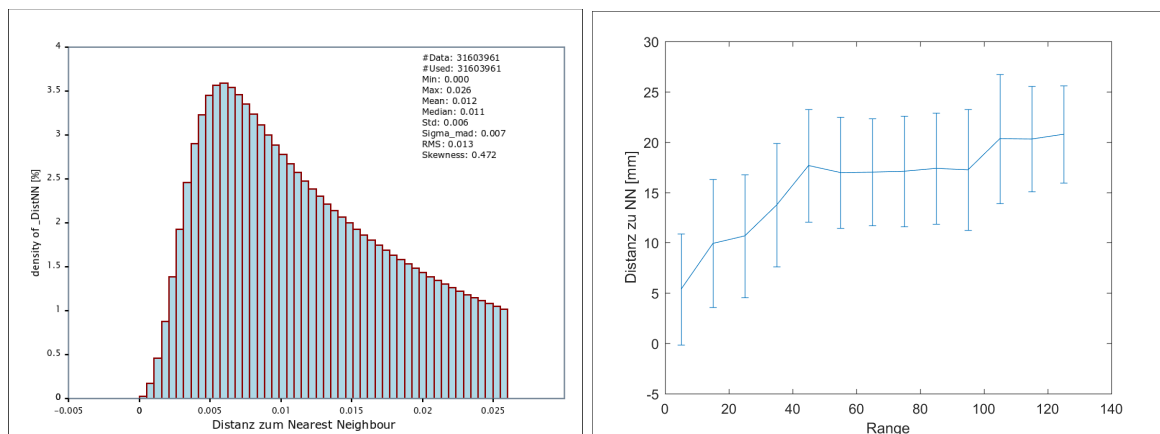


Abbildung 5.11: links: Histogramm der Distanzen der korrespondierenden Punkte, die innerhalb der Schranke der Maximaldistanz liegen; rechts: Veränderung des durchschnittlichen Abstands zu den Nearest Neighbours mit wachsender Distanz zum Scanner (Range)

des reflektierenden Objektes innerhalb des Laserfootprints ab. Um nun festzustellen, ob eine Systematik zwischen der Reflektivität und Anzahl der Echos bzw. der Echonummer zu erkennen ist, sind für die Trainingsgebiete Stamm und Nadeln/Laub Histogramme je Echonummer und Anzahl der Echos erstellt worden. Abbildung 5.12 zeigt, wie sich die Reflektivitäten bei einer Wellenlänge von $1,0 \mu\text{m}$ für Single Echos verhalten. Zu erkennen ist, dass sich die Reflektivitäten sowohl für die Nadeln als auch für die Stämme stark um ihre Mediane von 0,81 und 0,80 konzentrieren. Abbildungen 5.13 bis 5.15 zeigen die Histogramme für das Trainingsgebiet Nadeln/Laub im Falle von Multiple Echos. Die ersten Echos der Multiplen Echos weisen eine gewisse Ähnlichkeit zu dem Histogramm der Single Echos auf. Je größer die Echoanzahl desto weniger konzentrieren

Tabelle 5.2: Anzahl der Punkte je Echo und Echonummer für eine Wellenlänge von 1.0 μm

	1. von 2	2. von 2	1. von 3	2. von 3	3. von 3
Nadeln/Laub	153.691	56.057	123.609	76.239	15.552
Stamm	20.325	66.960	9.092	2.202	6.039

	1. von 4	2. von 4	3. von 4	4. von 4	First Echos
Nadeln/Laub	63.858	43.787	11.977	2.101	429.624
Stamm	3.127	869	129	220	704.959

Tabelle 5.3: Anzahl der Punkte je Echo und Echonummer für eine Wellenlänge von 1.5 μm

	1. von 2	2. von 2	First Echos
Nadeln/Laub	185072	168999	429624
Stamm	40297	78407	704959

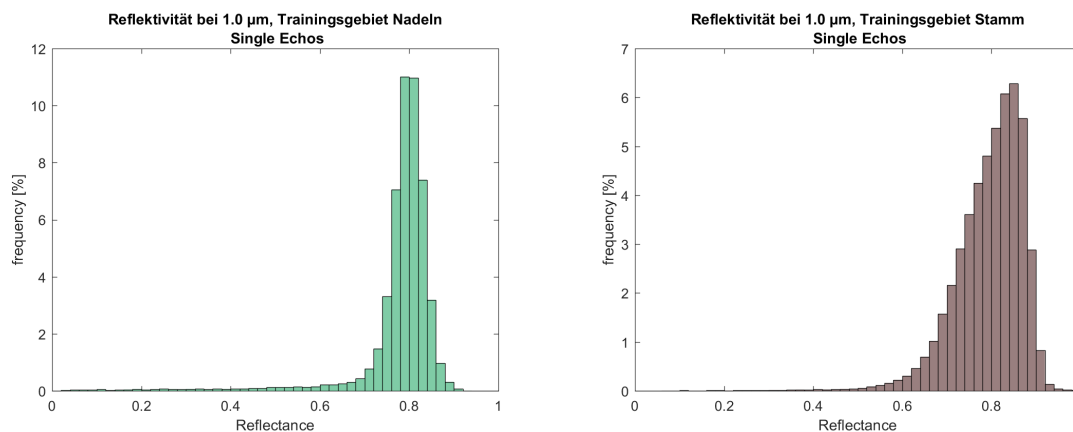


Abbildung 5.12: Vergleich der Reflektivität bei 1.0 μm , links Punkte des Trainingsgebiet Nadeln/Laub, rechts Punkte des Trainingsgebiet Stamm

sich die Reflektivitäten um einen eindeutigen Wert. Zusätzlich ist zu erkennen, dass umso höher die Echonummer ist, desto mehr verteilt sich die Reflektivität auf den gesamten Wertebereich. Ähnliches ist für die Punkte des Trainingsgebiet Stamm bei einer Wellenlänge von 1.0 μm zu sagen (Abbildungen 5.16 bis 5.18).

In Abbildung 5.19 sind nun die Histogramme der Reflektivitäten von Single Echos bei einer Wellenlänge von 1.5 μm für beide Trainingsgebiete gegenübergestellt. Hier konzentrieren sich vor allem die Werte des Trainingsgebiets Stamm stark um den Median von 0,84. Die Werte des Trainingsgebiets Nadeln/Laub weisen einen Median von 0,69 mit einer deutlich stärkeren Verteilung auf den gesamten Wertebereich auf. Vergleicht man diese Histogramme nun mit jenen der Multiple Echos (Abbildungen 5.20 und 5.21), so zeigt sich wieder, dass sich die Werte weniger deutlich um den Median der Single Echos konzentrieren und stattdessen unterschiedlichste Reflektivitäten aufweisen.

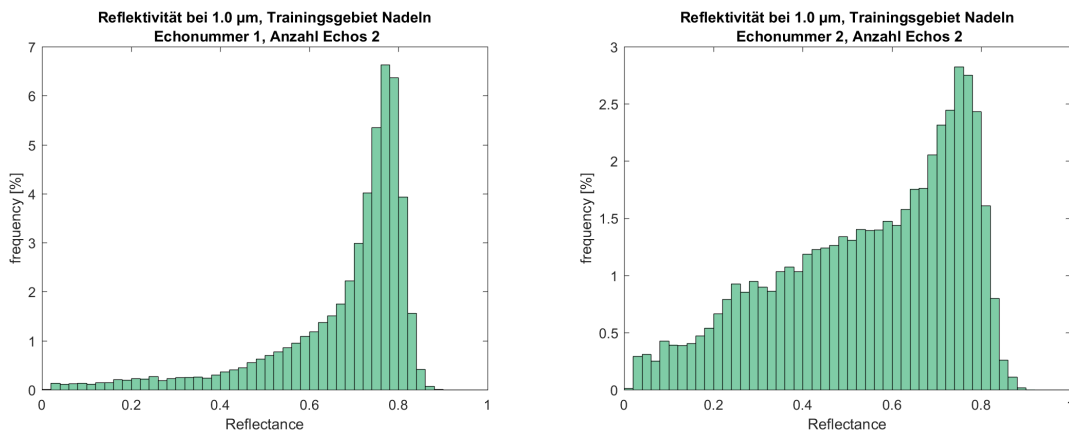


Abbildung 5.13: Reflektivität der Punkte im Trainingsgebiet Nadeln/Laub bei 1.0 μm und 2 Multiple Echos

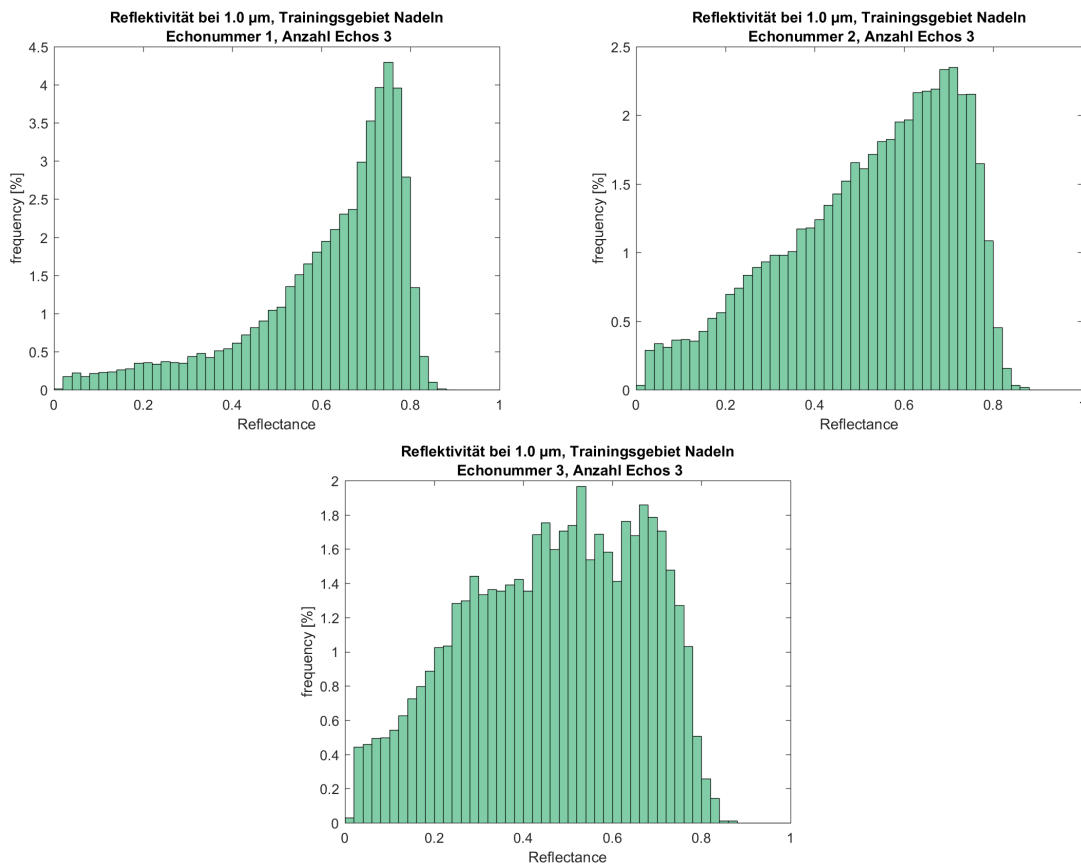


Abbildung 5.14: Reflektivität der Punkte im Trainingsgebiet Nadeln/Laub bei 1.0 μm und 3 Multiple Echos

Allgemein lässt sich keine eindeutige Systematik zwischen Reflektivität und Echonommer oder Echoanzahl erkennen. Wie etwa, dass bei 4 Echos pro ausgesendeten Laserstrahl jeder Punkt nur ein Viertel der Reflektivität aufweist. Da sich auch nicht ermitteln lässt, wie groß die Ausdehnung der reflektierenden Objekte im Footprint ist, kann man auch nicht, wie in Formel 2.18 angedeutet, auf die Reflektivität schließen, die einen Punkt als Single Echo hätte.

5.3 Analyse der Baumstrukturen

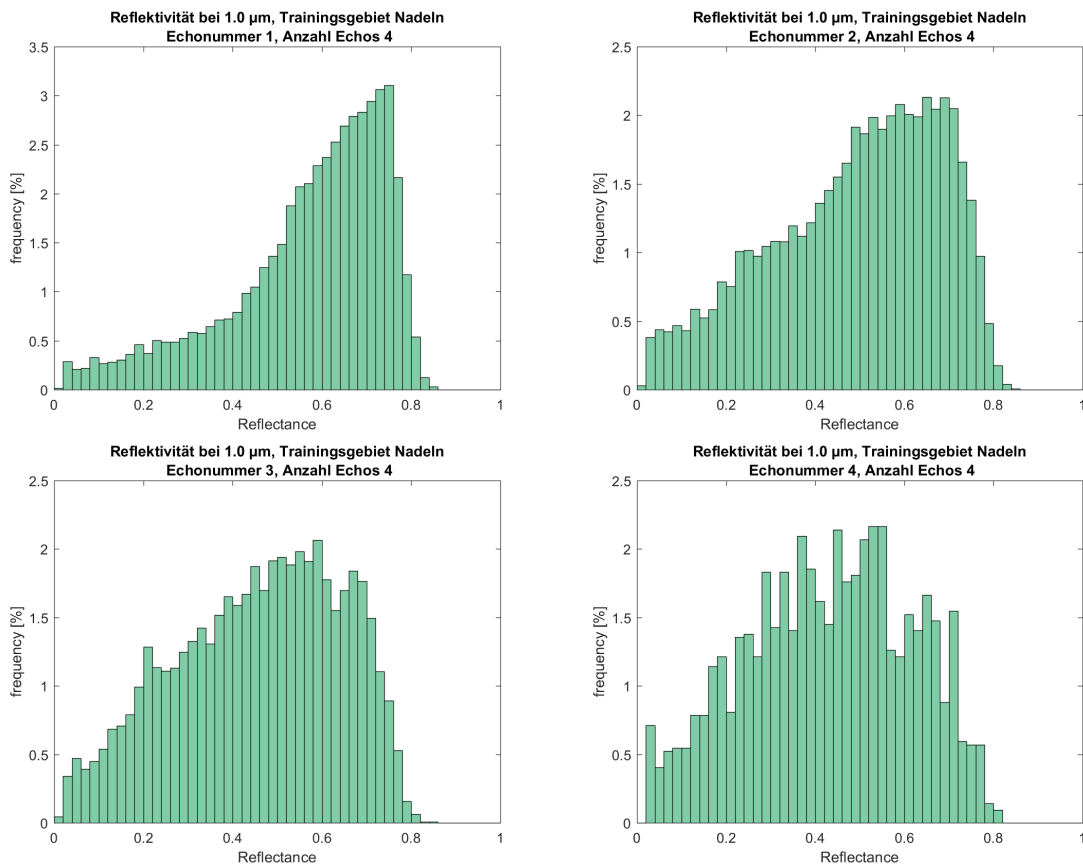


Abbildung 5.15: Reflektivität der Punkte im Trainingsgebiet Nadeln/Laub bei 1.0 μm und 4 Multiple Echos

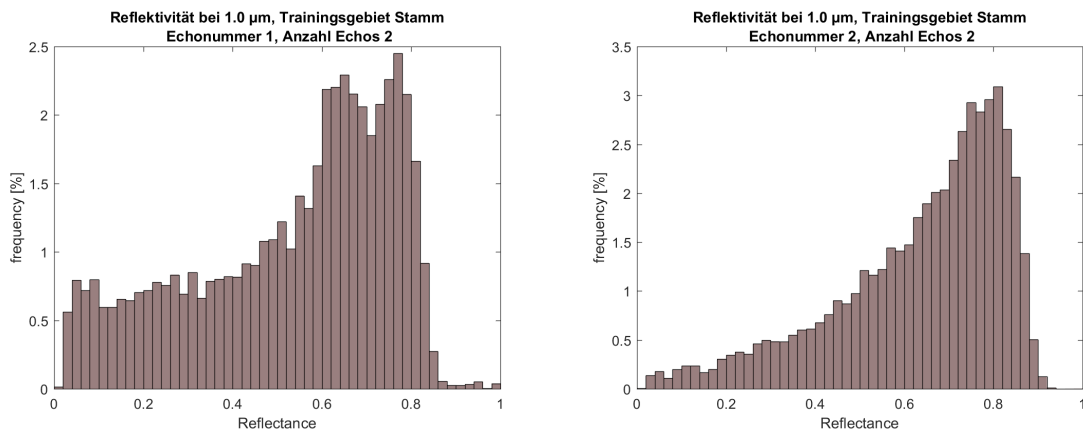


Abbildung 5.16: Reflektivität der Punkte im Trainingsgebiet Stamm bei 1.0 μm und 2 Multiple Echos

Die Histogramme haben weiters gezeigt, dass nur Single Echos verwendet werden sollten, um eindeutige Aussagen über die Reflektivität von Baumstrukturen treffen zu können.

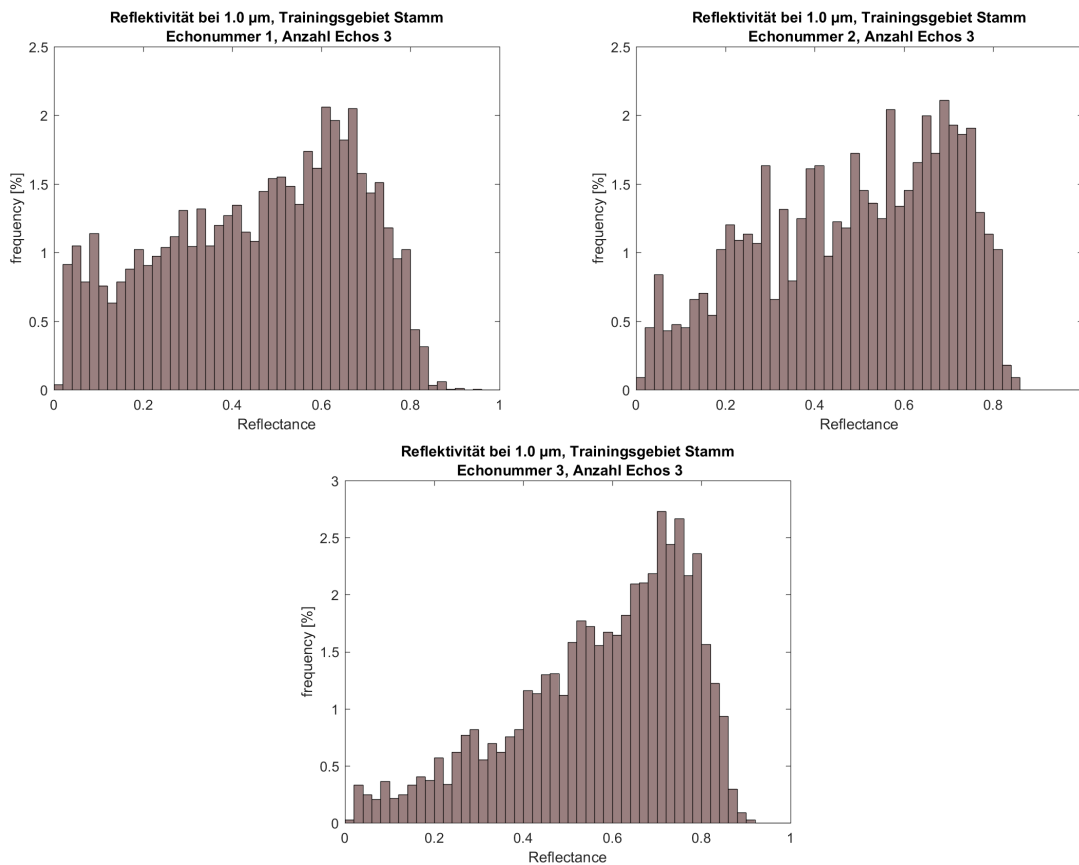


Abbildung 5.17: Reflektivität der Punkte im Trainingsgebiet Stamm bei 1.0 μm und 3 Multiple Echos

5.3.2 NDVI der Baumstrukturen

Wie sehr sich Multiple Echos auf den NDVI auswirken, ist in Abbildung 5.22 für die Trainingsgebiete gegenübergestellt. Die Histogramme zeigen, wie sich der NDVI der Baumstrukturen je im Falle von allen verwendeten Echos und im Falle von Single Echos verhält. Bei der Berechnung des NDVI für Single Echos dürfen nur jene Punkte verwendet werden, deren Echoanzahl für beide Wellenlängen 1 entspricht. Dies reduziert die Anzahl der verwendbaren Punkte des Trainingsgebiets Stamm auf ca. 660.000 und jene des Trainingsgebiets Nadeln/Laub auf ca. 118.000. Vor allem die Verteilung des NDVI der Nadeln/Laub verändert sich durch die Verwendung von ausschließlich Single Echos stark. Um also mit Hilfe von NDVI-Werten Aussagen über die Baumstruktur treffen zu können, sollten wiederum nur Single Echos verwendet werden.

5.4 Klassifizierung der Baumstrukturen anhand von NDVI-Werten

Anhand der NDVI-Werte der Trainingsgebiete soll nun ein Grenzwert erstellt werden, anhand dessen sich alle Punkte in eine Klasse Stamm und in eine Klasse Nadeln/Laub teilen lassen. Nach Abbildung 2.7 sollten Nadeln/Laub (englisch leaf) bei einer Wellenlänge von 1.0 μm deutlich stärker reflektieren als bei 1.5 μm, wodurch der NDVI positiv ausfallen sollte. Im Gegensatz dazu

5.4 Klassifizierung der Baumstrukturen anhand von NDVI-Werten

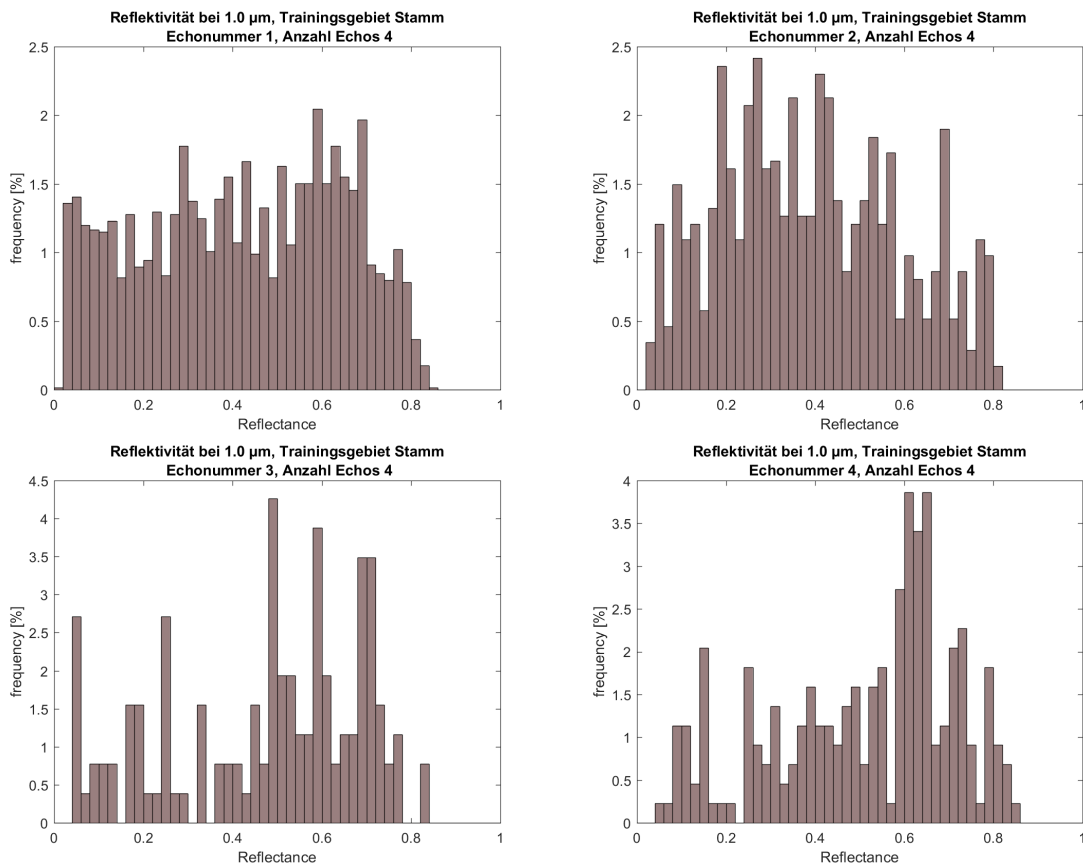


Abbildung 5.18: Reflektivität der Punkte im Trainingsgebiet Stamm bei 1.0 μm und 4 Multiple Echos

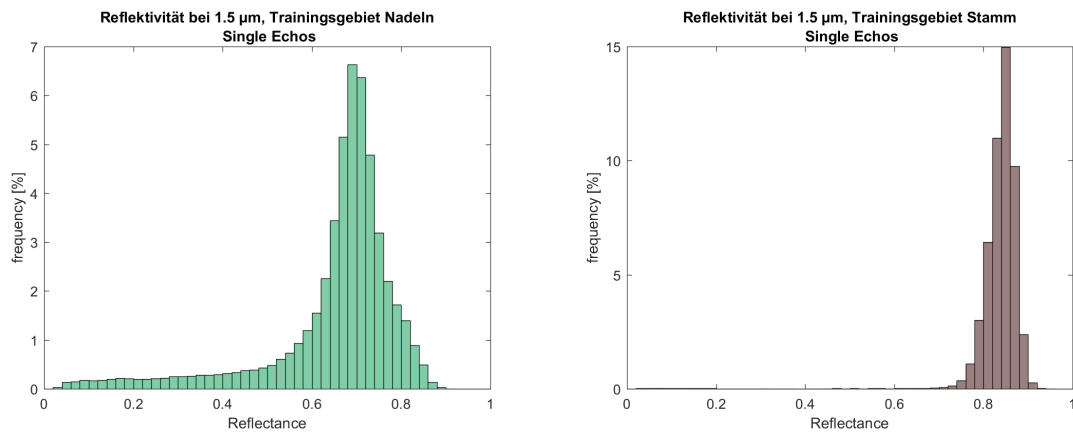


Abbildung 5.19: Vergleich der Reflektivität bei 1.5 μm, links Punkte des Trainingsgebiet Nadeln/Laub, rechts Punkte des Trainingsgebiet Stamm

sollten Stämme/Rinde (english bark) bei 1.0 μm geringer reflektieren, als bei 1.5 μm, was einen negativen NDVI zur Folge hat.

Ein Vergleich der NDVI-Werte kann erstellt werden, indem die Histogramme beider Trainingsgebiete gegenübergestellt werden. Wie bereits besprochen, sollten hierfür nur jene NDVI-Werte verwendet werden, bei denen es sich um Single Echos in beiden Wellenlängen handelt. Abbil-

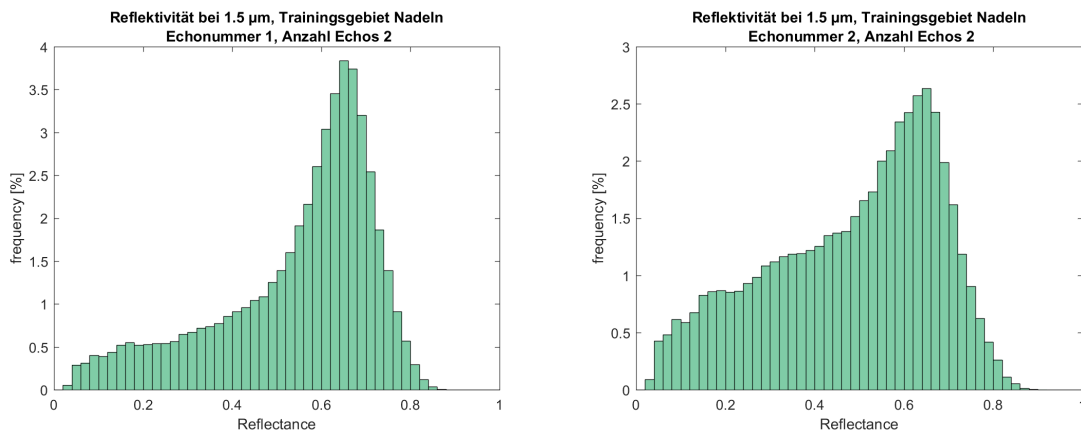


Abbildung 5.20: Reflektivität der Punkte im Trainingsgebiet Nadeln/Laub bei 1.5 μm und 2 Multiple Echos

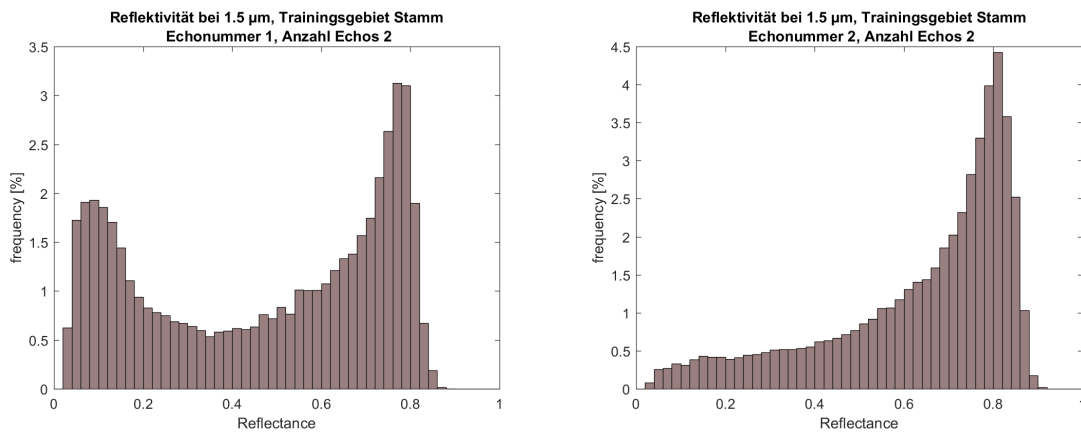


Abbildung 5.21: Reflektivität der Punkte im Trainingsgebiet Stamm bei 1.5 μm und 2 Multiple Echos

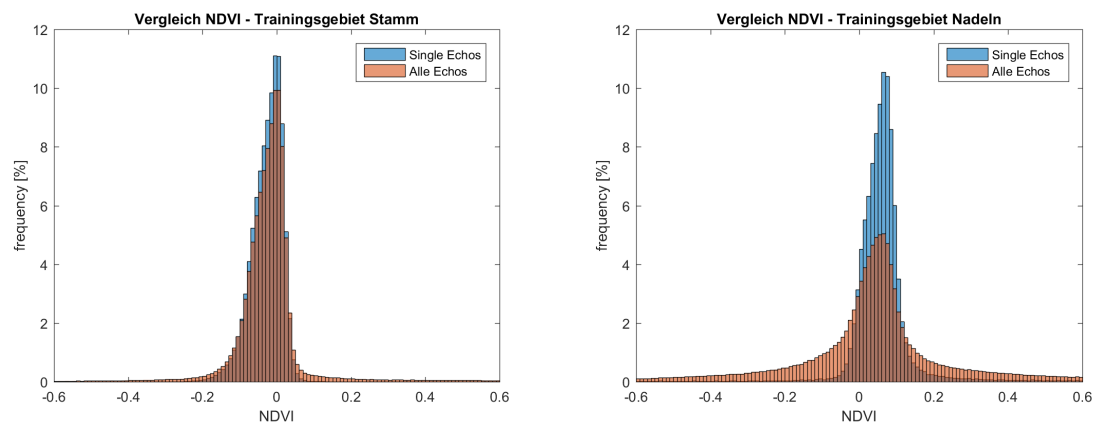


Abbildung 5.22: Vergleich der NDVI-Werte bei Verwendung von Single Echos gegenüber Allen Echos, links: Trainingsgebiet Stamm, rechts: Trainingsgebiet Nadeln/Laub

Abbildung 5.23 zeigt die Gegenüberstellung der beiden Trainingsgebiete. Zu beachten ist, dass die Histogramme je die Häufigkeit des Auftretens eines Wertes innerhalb des eigenen Trainingsgebietes zeigen. Dies ist notwendig, da das Trainingsgebiet Stamm eine um Vielfaches höhere Punktein-

zahl zählt. Durch beide Histogramme werden Normalverteilungen geschätzt. Die NDVI-Werte der Stämme entsprechen einer Normalverteilung mit Mittelwert $\mu = -0.01773$ und einer Standardabweichung von $\sigma = 0.05262$. Jene der Nadeln/Laub entsprechen einer Normalverteilung mit Mittelwert $\mu = 0.05667$ und einer Standardabweichung von $\sigma = 0.05366$. Ein Hypothesentest beweist mit einem Signifikanzniveau von 95%, dass es sich bei den beiden Stichproben um zwei Grundgesamtheiten unterschiedlicher Mittelwerte handelt.

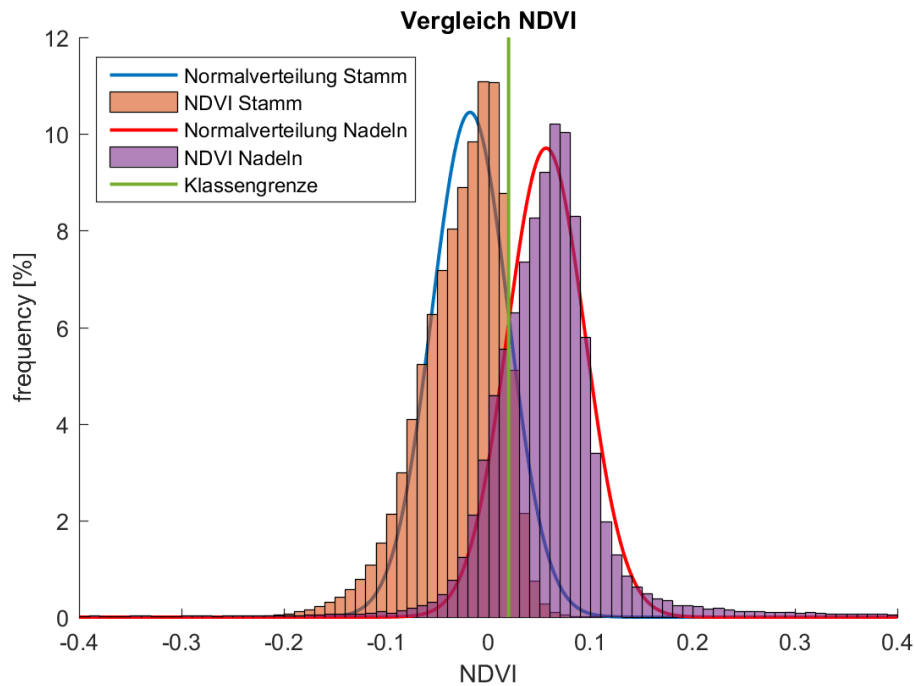


Abbildung 5.23: Vergleich der NDVI-Werte für Stämme und Nadeln, inklusive Klassengrenze, Single Echos

Die Klassengrenze, die sich aus der Gegenüberstellung ergibt, ist mit einem NDVI von 0,02 so gewählt, dass die Normalverteilungen der beiden Klassen zu gleichen Teilen in die jeweils andere Klasse fallen. So sind jeweils 15% der Punkte auf Nadeln fälschlicherweise als Stämme klassifiziert und umgekehrt 15% der Punkte auf Stämme als Nadeln.

Wendet man diesen Grenzwert an die Punkte des Trainingsgebietes an, so kann zur Bewertung des Klassifizierungsergebnis die Konfusionsmatrix (Tabelle 5.4 aus Kapitel 4.5) gebildet werden. Die dadurch abgeleiteten Größen der Genauigkeit sind Tabelle 5.5 zu entnehmen.

Die Overall Accuracy gibt an, dass mit einer Klassengrenze von 0,02 rund 89,36% der Punkte in den Trainingsdaten richtig klassifiziert werden können. Vergleicht man nun die Werte der Genauigkeit miteinander, so ist besonders auffallend, dass sich die User's Accuracy der Nadeln deutlich von dessen Producer's Accuracy abweicht. Dies liegt daran, dass bei der Verwendung von ausschließlich Single Echos in den Trainingsgebieten deutlich mehr Punkte im Trainingsgebiet der Stämme als in dem der Nadeln vorhanden sind.

Tabelle 5.4: Konfusionsmatrix der Trainingsgebiete bei Klassifizierung durch NDVI bei Verwendung von Single Echos

Klasse:	Trainingsgebiete		
	Nadeln/Laub	Stamm	
Nadeln/Laub	93444	57851	Summe: 151295
Stamm	24682	599839	Summe: 624521
	Summe: 118126	Summe: 657690	Gesamt: 775816

Tabelle 5.5: Größen der Genauigkeit der Klassifizierung anhand NDVI bei Verwendung von Single Echos

	Producer's Accuracy	Error of Omission	User's Accuracy	Error of Commission
Nadeln/Laub	79,11%	20,89%	61,76%	38,24%
Stamm	91,12%	8,80%	96,05%	3,95%

Wendet man diese Klassengrenze nun an Punkten aller Echos an, so zeigt sich vor allem für Nadeln ein deutlich anderes Bild. Zur Visualisierung werden wieder die Histogramme der NDVI-Werte beider Trainingsgebiete gegenübergestellt und Normalverteilungen geschätzt (Abbildung 5.24). Die NDVI-Werte der Stämme entsprechen einer Normalverteilung mit $\mu = -0.01740$ und einer Standardabweichung von $\sigma = 0.05509$. Jene der Nadeln/Laub entsprechen einer Normalverteilung mit $\mu = 0.04547$ und einer Standardabweichung von $\sigma = 0.08876$. Ein Hypothesentest beweist wieder mit einem Signifikanzniveau von 95%, dass es sich bei den beiden Stichproben um zwei Grundgesamtheiten unterschiedlicher Mittelwerte handelt. Die Klassifizierung der Trainingsgebiete aller Echos führt zu der Konfusionsmatrix in Tabelle 5.6.

Tabelle 5.6: Konfusionsmatrix der Trainingsgebiete bei Klassifizierung durch NDVI bei Verwendung von allen Echos

Klasse:	Trainingsgebiete		
	Nadeln/Laub	Stamm	
Nadeln/Laub	408630	120379	Summe: 529009
Stamm	269562	685168	Summe: 954730
	Summe: 678192	Summe: 805547	Gesamt: 1483739

Die Konfusionsmatrix führt wiederum zu den Größen der Genauigkeit in Tabelle 5.7. Die Overall Accuracy beträgt 0.73719 bzw. 73,72%.

Die Producer's Accuracy der Klasse Nadeln/Laub ist im Vergleich zu dem Ergebnis der Single Echos deutlich zurückgegangen, wohingegen die User's Accuracy deutlich gestiegen ist. Im Gegensatz dazu ist die Producer's Accuracy der Klasse Stamm annähernd gleich geblieben, jedoch die User's Accuracy klar gesunken. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Verwendung von al-

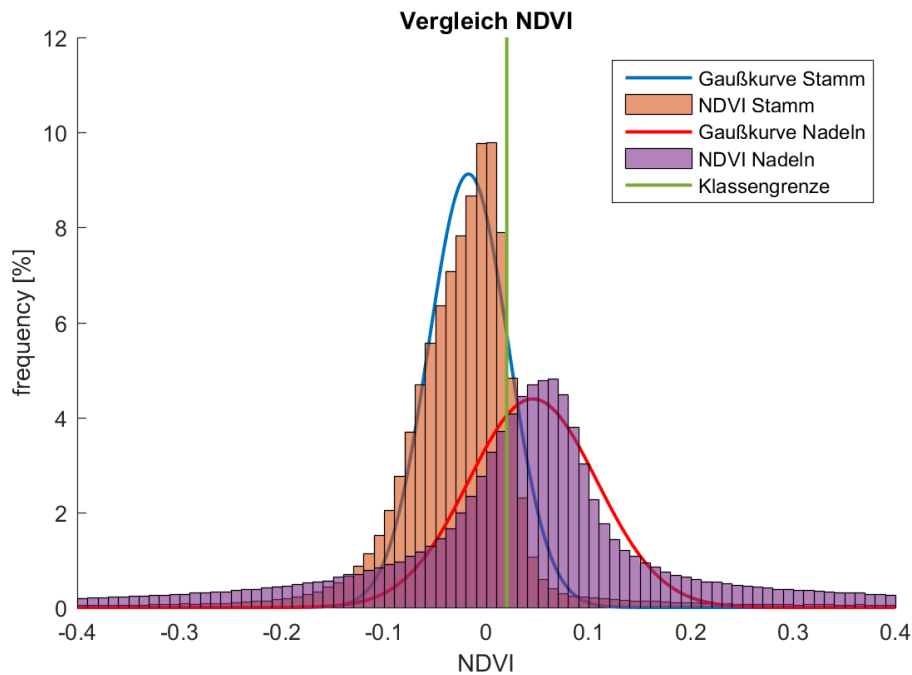


Abbildung 5.24: Vergleich der NDVI-Werte für Stämme und Nadeln, inklusive Klassengrenze, Alle Echos

len Echos merklich mehr Punkte für das Trainingsgebiet Nadeln/Laub zur Verfügung stehen. Dies hat zur Folge, dass einerseits mehr Punkte, die eigentlich zur Klasse der Nadeln/Laub zählen, fälschlich in die Klasse der Stämme fallen. In Abbildung 5.24 sind das alle Punkte des lilafarbenen Histogramms, die auf die linke Seite der grünen Klassengrenze fallen. Andererseits fallen durch die gesteigerte Anzahl der Nadel/Laub Punkte jene Punkte nicht mehr so stark ins Gewicht, die eigentlich Stammpunkte wären. In Abbildung 5.24 sind das alle Punkte des orangefarbenen Histogramms, die auf die rechte Seite der grünen Klassengrenze fallen.

Alles in allem zeigt sich, dass der NDVI sehr gut zur Klassifizierung von Baumstrukturen herangezogen werden kann. Die Genauigkeit des Ergebnisses steigt deutlich, wenn ausschließlich Single Echos verwendet werden.

Tabelle 5.7: Größen der Genauigkeit der Klassifizierung anhand NDVI bei Verwendung aller Echos

	Producer's Accuracy	Error of Omission	User's Accuracy	Error of Commission
Nadeln/Laub	60,25%	39,75%	77,24%	22,76%
Stamm	85,06%	14,94%	71,77%	28,23%

5.5 Klassifizierung der Baumstrukturen anhand der Reflektivität

Das letzte Kapitel hat gezeigt, dass anhand von NDVI-Werten eine Unterscheidung zwischen Nadeln/Laub und Stämmen getroffen werden kann. In diesem Kapitel wird untersucht, ob die Reflektivitäten einer Wellenlänge allein auch ein ähnliches Bild ergeben. Im Gegensatz zum NDVI

ist die Reflektivität vom Auftreffwinkel des reflektierenden Objekts abhängig (siehe Kapitel 4.3), was das Klassifizierungsergebnis beeinflussen kann.

Abbildung 5.25 zeigt nun die Reflektivitäten bei einer Wellenlänge von $1.5 \mu\text{m}$ der Trainingsgebiete gegenübergestellt. Links zeigt die Histogramme der Single Echos und rechts jenes aller Echos. Nach Abbildung 2.7 sollten Stämme/Rinde (englisch bark) deutlich stärker reflektieren als Nadeln/Laub (englisch leaf) oder Äste (branchlet).

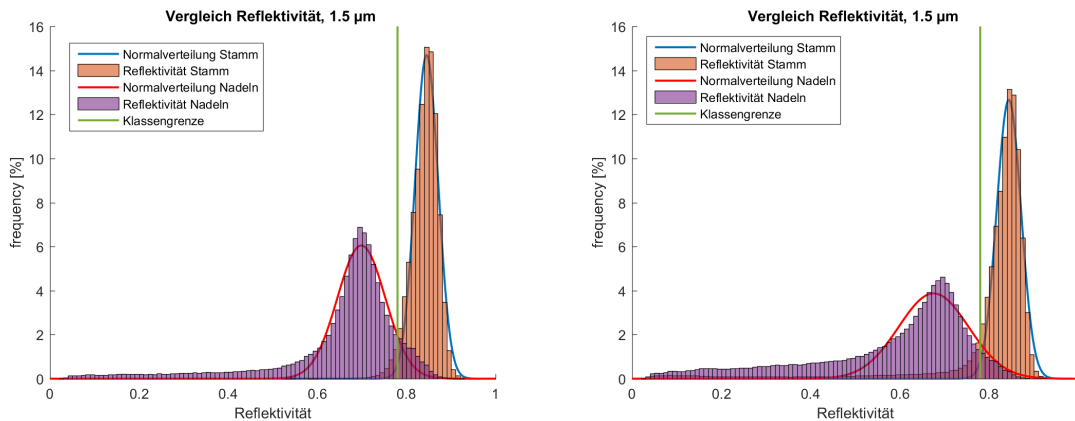


Abbildung 5.25: Vergleich der Reflektivitäten für Stämme und Nadeln, inklusive Klassengrenze, links: Single Echos, rechts: alle Echos

Die Reflektivitäten der Nadeln entsprechen im Fall von Single Echos einer Normalverteilung mit Mittelwert $\mu = 0.69878$ und Standardabweichung $\sigma = 0.07611$. Bei Verwendung aller Echos verändert sich die Normalverteilung zu $\mu = 0.67548$ und $\sigma = 0.11101$. Die Reflektivitäten der Stämme entsprechen im Fall von Single Echos einer Normalverteilung mit Mittelwert $\mu = 0.84519$ und Standardabweichung $\sigma = 0.03699$. Bei Verwendung aller Echos verändert sich die Normalverteilung zu $\mu = 0.84401$ und $\sigma = 0.03862$.

Die Klassengrenze ist mit einer Reflektivität von 0,78 so gewählt, dass die Overall Accuracy mit 94,10 % für Single Echos am Höchsten ist. Mit dieser Klassengrenze wird bei der Verwendung aller Echos eine Overall Accuracy von 89,51 % erreicht. Die Konfusionsmatrix der Klassifizierung von Single Echos ist in Tabelle 5.8 und die von allen Echos in Tabelle 5.9 angegeben. Die Größen der Genauigkeit in Tabelle 5.10 zeigen, dass eine Klassifizierung anhand der Reflektivitäten bei einer Wellenlänge von $1.5 \mu\text{m}$ sowohl für Single Echos als auch für alle Echos ein durchaus gutes Klassifizierungsergebnis liefert.

Zum Vergleich werden nun auch die Reflektivitäten bei einer Wellenlänge von $1.0 \mu\text{m}$ gegenübergestellt, siehe Abbildung 5.26. Nach Abbildung 2.7 sollten Nadeln/Laub (englisch leaf) deutlich stärker reflektieren als Äste (englisch branchlet) oder Stämme/Rinde (englisch bark). Man erkennt jedoch sehr deutlich, dass zwischen den Trainingsgebieten keine eindeutige Abgrenzung getroffen werden kann. Damit ist eine Klassifizierung der Baumstrukturen rein anhand der Intensitäten des VZ-6000 nicht möglich.

5.6 Vergleich der Klassifikationen mit geometrischer Klassifikation

Tabelle 5.8: Konfusionsmatrix bei Klassifizierung anhand der Reflektivität (1.5 μm) der Trainingsgebiete bei Verwendung von Single Echos

Klasse:	Trainingsgebiete		
	Nadeln/Laub	Stamm	
Nadeln/Laub	293852	29350	Summe: 323202
Stamm	30269	657493	Summe: 687762
	Summe: 324121	Summe: 686843	Gesamt: 1010964

Tabelle 5.9: Konfusionsmatrix bei Klassifizierung anhand der Reflektivität (1.5 μm) der Trainingsgebiete bei Verwendung von allen Echos

Klasse:	Trainingsgebiete		
	Nadeln/Laub	Stamm	
Nadeln/Laub	641213	118626	Summe: 759839
Stamm	36979	686921	Summe: 723900
	Summe: 678192	Summe: 805547	Gesamt: 1483739

Tabelle 5.10: Größen der Genauigkeit bei Klassifizierung durch Reflektivitäten

	Producer's Acc.	Error of O.	User's Acc.	Error of C.
Nadeln (Single Echos)	90,66%	9,34%	90,92%	9,08%
Stamm (Single Echos)	95,73%	4,27%	95,60%	4,40%
Nadeln (Alle Echos)	94,55%	5,45%	84,39%	15,61%
Stamm (Alle Echos)	85,27%	14,73%	94,89%	5,11%

5.6 Vergleich der Klassifikationen mit geometrischer Klassifikation

Das Modell der geometrischen Klassifizierung aus Kapitel 4.5 wird aus 70% der Punkte der Trainingsgebiete gebildet. Auf die restlichen 30% der Punkte wird das Modell angewendet und auf Übereinstimmung geprüft. Die geometrische Klassifizierung erfolgt mit einer Overall Accuracy von 97.9%. Die restlichen Größen der Genauigkeit sind Tabelle 5.11 zu entnehmen.

Tabelle 5.11: Größen der Genauigkeit der geometrischen Klassifizierung

	Producer's Accuracy	Error of Omission	User's Accuracy	Error of Commission
Nadeln/Laub	97,00%	3,00%	98,30%	1,70%
Stamm	98,60%	1,40%	97,50%	2,50%

Abbildung 5.27 zeigt nun für einen Ausschnitt des Messgebiets den direkten Vergleich der geometrischen Klassifizierung zu jenen durch NDVI und Reflektivität. Der Ausschnitt zeigt Single Echos von Bäumen in der Nähe des Aufnahmezentrums bis in 80 Meter Entfernung. Bei allen

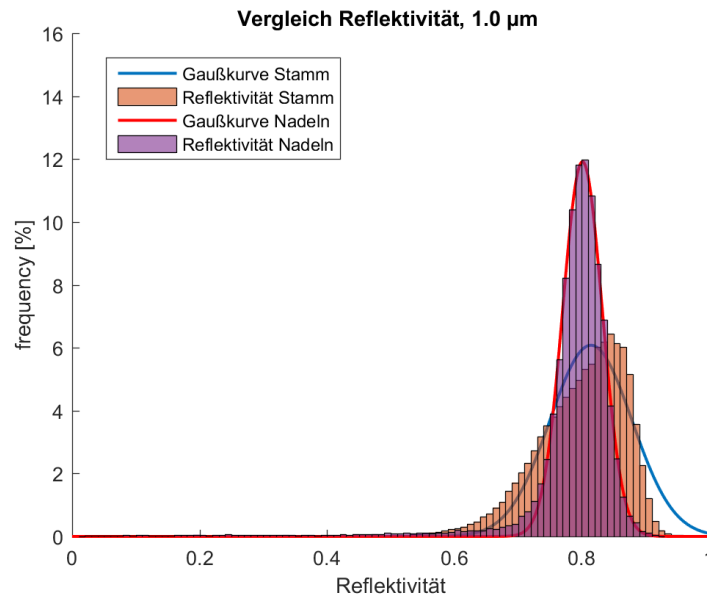


Abbildung 5.26: Vergleich der Reflektivitäten für Stämme und Nadeln, inklusive Klassengrenze

drei Klassifikationen ist zu erkennen, dass umso weiter die Bäume vom Aufnahmezentrum entfernt sind, desto unzuverlässiger wird das Klassifizierungsergebnis. Beim geometrischen Ergebnis ist dies auf die unterschiedliche Punktdichte je Distanz zum Scanner zu erklären. So kann sein, dass jener Suchradius und maximale Nachbarschaft zur Berechnung der Normalen für Bäume im Nahbereich zum Scanner gut passen, für Punkte in großer Entfernung nicht mehr optimal gewählt ist. Bei der Klassifizierung durch NDVI oder Reflektivität wird die Nachbarschaft nicht mitberücksichtigt, wodurch die unterschiedliche Punktdichte unerheblich ist. Trotz Verwendung von ausschließlich Single Echos kann sein, dass zusätzliche Objekte den Laserstrahl kreuzen, deren zurückgesendete Energie jedoch nicht stark genug ist, um als zusätzliches Echo zu zählen. Dies kann die Intensität und damit die Klassifizierung beeinflussen.

Anhand des Ausschnittes in Abbildung 5.28 sollen ein paar typische Fehler der einzelnen Klassifizierungen besprochen werden. Im Bild ganz links sieht man das Ergebnis der geometrischen Klassifizierung. Dünne Baumstämme und Äste zählen hier fälschlicherweise zu der Klasse der Nadeln/Laub. Dieser Fehler könnte durch Hinzufügen zusätzlicher Klassen und extra Trainingsgebieten etwas verbessert werden.

Das mittlere Bild zeigt das Ergebnis der Klassifizierung anhand von NDVI-Werten. Einige der Baumstämme sind eindeutig als Stämme klassifiziert, wohingegen andere aufgrund höherer NDVI-Werte teils als Nadeln/Laub gekennzeichnet sind. Dies kann auf einen erhöhten Wassergehalt im Stamm deuten. Weiters zeigt sich, dass es in Teilen der Nadeln/Laub zu Missklassifikationen kommt. Das Problem der geometrischen Klassifizierung, dass kleine Äste zu Nadeln/Laub zählen, tritt hier nicht auf, da hier nur die Intensitäten des Punkts an sich und nicht dessen Nachbarschaft herangezogen werden.

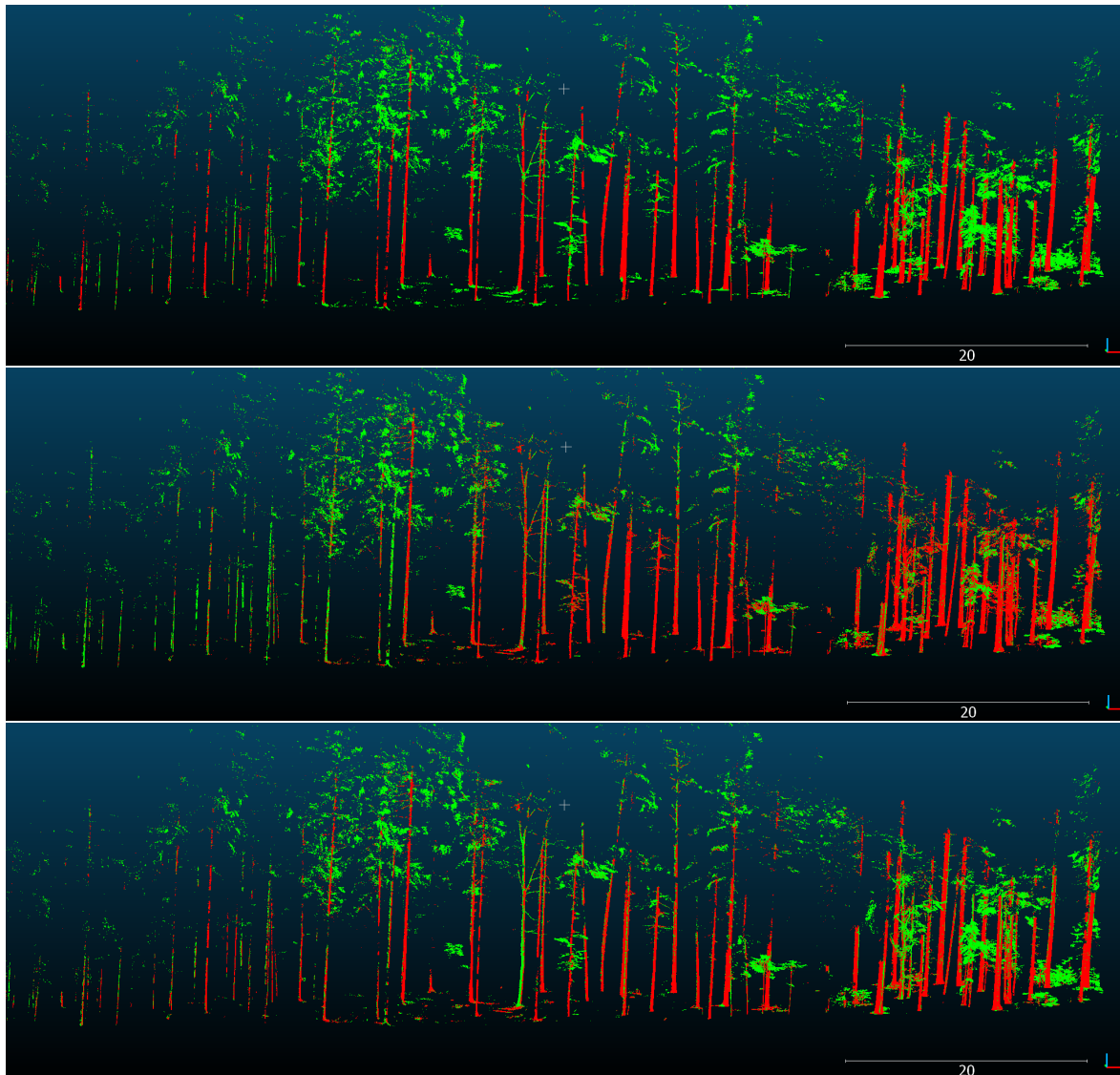


Abbildung 5.27: Vergleich der Klassifizierungsergebnisse, oben: geometrische Klassifizierung, mitte: NDVI-Klassifizierung, unten: Klassifizierung durch Reflektivität

Das Bild ganz rechts zeigt das Ergebnis der Klassifizierung anhand der Reflektivität bei einer Wellenlänge von $1.5 \mu\text{m}$. Im Gegensatz zu den beiden anderen Klassifizierungen wird hier der sehr dünne Stamm auch als solcher erkannt. Der Stamm in der Mitte zeigt ein typisches Problem bei Verwendung der Reflektivität. An den abgerundeten Seiten der Stämme ist der Auftreffwinkel deutlich anders als jener in Richtung des Scanners. Da die Reflektivität bekanntlich von diesem Auftreffwinkel abhängt, kann es bei seitlichen Rändern der Stämme zu Fehlern kommen. Die Winkelabhängigkeit könnte eventuell durch die Schätzung von Oberflächennormalen und Bereinigung der Reflektivität beseitigt werden. Da sich jedoch auf Nadeln bzw. auf kleinen Blättern nur schwer Oberflächennormalen bilden lassen, könnte dies zu vermehrten Fehlern in dieser Klasse führen. Bei jenem Stamm, der im Bild rechts deutlich falsch klassifiziert ist, handelt es sich um einen der wenigen Laubbäume des Messgebietes. Da es sich hier um eine Birke handelt, könnte

die weiße Rinde zu einer veränderten Reflektivität führen.

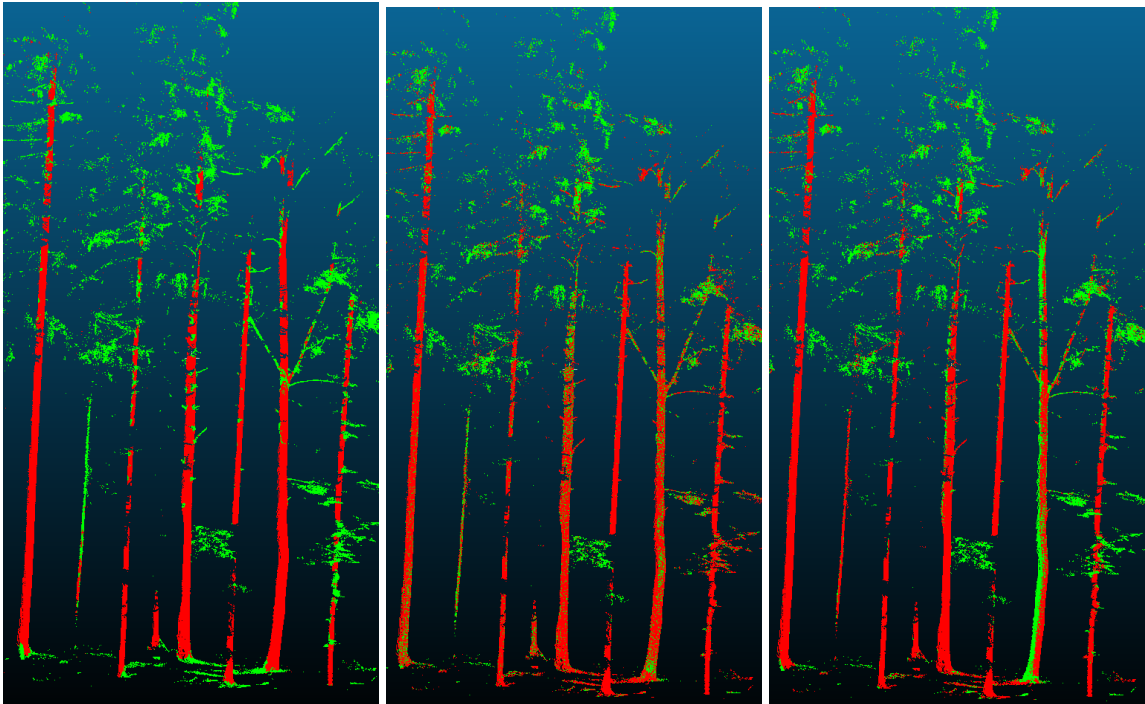


Abbildung 5.28: Vergleich der Klassifizierungsergebnisse, links: geometrische Klassifizierung, mitte: NDVI-Klassifizierung, rechts: Klassifizierung durch Reflektivität

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Um letztendlich die Fragen aus Kapitel 1 zu beantworten, werden nun die Ergebnisse nochmals zusammengefasst und interpretiert.

Ziel dieser Diplomarbeit war es zu untersuchen, ob anhand des NDVI Baumstrukturen in TLS-Punktwolken zu unterschieden werden können. Dass der NDVI bereits seit langem dazu beiträgt, Aufnahmen von Airborne und Spaceborne Systemen zu interpretieren, ist durch ausreichend Literatur bekannt. Mit dem DWEL ist schließlich auch ein terrestrischer Laserscanner entwickelt worden, der multispektrale Aufnahmen machen kann. Diese Diplomarbeit hat gezeigt, dass durch herkömmliche TLS die Funktionsweise des DWEL nachgebaut werden kann. Damit der NDVI jedoch gebildet werden kann, sind einige Kalibrierungsmessungen und Bearbeitungsschritte notwendig. Es hat sich gezeigt, dass sich Formfaktor und Kalibrierkonstante je Laserscannermodell stark unterscheiden. Damit ein Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Scanner möglich ist, ist eine gründliche Kalibrierung der aufgenommenen Intensitäten unausweichlich. Erst eine genaue Registrierung erlaubt, die Reflektivitäten zweier Laserscanner zusammenzuführen und den NDVI zu bilden.

Eine Untersuchung der unterschiedlichen Intensität je Echoanzahl und Echonummer hat ergeben, dass zur Interpretierung des Objekts durch dessen Reflektivität nur Single Echos ein akkurates Ergebnis liefern.

Eine Klassifizierung der Baumstrukturen anhand der NDVI-Werte hat gezeigt, dass bei Single Echos knapp 90% der Punkte korrekt klassifiziert werden können. Bei Verwendung aller Echos wird zumindest eine Genauigkeit von rund 74% erreicht. Ob die NDVI-Werte zu einer Interpretierung der Vitalität oder der Unterscheidung der Baumarten herangezogen werden können, benötigt jedoch zusätzliche Untersuchungen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass manche Baumstämme über einen höheren NDVI-Wert verfügen als andere. Ob dies nun wirklich an einem erhöhten Wassergehalt oder doch an der Rauheit, der Farbe oder etwa an Moosbewuchs am Stamm herührt, kann an dieser Stelle nicht festgestellt werden.

Geht es jedoch rein um die Klassifizierung der Baumstruktur, steht der Aufwand, den NDVI zu bestimmen, außer Verhältnis zum erzielten Ergebnis. Es hat sich gezeigt, dass mithilfe der Reflektivität bei einer Wellenlänge von $1.5 \mu\text{m}$ (VZ-2000) eine Unterscheidung zwischen Nadeln/Laub

und Stämmen getroffen werden kann. So erreicht eine Klassifizierung anhand dieser Reflektivität für Single Echos eine Genauigkeit von rund 94% und für alle Echos zumindest noch fast 90%. Zusätzlich treten bei der Messung mit dem TLS VZ-2000 weniger häufig Multiple Echos auf, wodurch die Einschränkung nur Single Echos zu verwenden, weniger stark ausgeprägt ist.

Betrachtet man das Ergebnis des TLS VZ-6000 (Wellenlänge 1.0 μm) allein, so lässt sich anhand der Reflektivität keine Unterscheidung der Baumstrukturen treffen. Der Laserscanner dürfte auch mit einer maximalen Messdistanz von 6 km für einen ganz anderen Messzweck vorgesehen sein. Die geringe Messrate und der fürs Auge gefährliche Laser erschweren zusätzlich jede Messung. Der Vergleich der Ergebnisse mit dem einer geometrischen Klassifizierung zeigt, dass die Klassifizierungen anhand der Intensitätswerte einer TLS-Punktwolke durchaus mit dem Ergebnis der geometrischen mithalten können. Vor allem treten jene Fehler, die aufgrund unterschiedlicher Punktdichten je Entfernung zum Scanner, bei der Klassifizierung mittels Reflektivität nicht auf. Dennoch ist die Klassifizierung anhand geometrischer Attribute mit einer Genauigkeit von fast 98% immernoch deutlich zuverlässiger. Vermutlich könnte durch Hinzunahme der Reflektivität bei Wellenlänge 1.5 μm oder des NDVI das Ergebnis der geometrischen Klassifizierung nochmals verbessert werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verknüpfung mehrerer TLS Standpunkte	5
2.2	Grundprinzip ICP-Algorithmus	7
2.3	Vergleich Punkt-zu-Punkt mit Punkt-zu-Ebene	8
2.4	Vereinfachter Effekt der Überlappung Distanzabhängigkeit und steigender Footprint	10
2.5	Multiple Echos und Full-Waveform	11
2.6	Reflektivität verschiedener Materialien	13
2.7	Reflektivität unterschiedlicher Vegetation	14
2.8	Funktionsweise eines DWEL	15
2.9	NDVI Werte eines DWEL	16
3.1	Aufbau eines Riegl Laserscanners	18
3.2	Zwei Ebenen Indizierung mit OPALS	21
3.3	Messgebiet mit Scanpositionen und Targets	23
3.4	Messung VZ-2000	24
4.1	Kalibrierungsmessungen	30
4.2	Distanzabhängige Intensität VZ-2000 und VZ-6000	31
4.3	Messreihe VZ-6000 bei Entfernungen bis 650 Meter	32
4.4	Vergleich der digitalisierten Riegl-Messreihe zur Kalibrierungsmessung	33
4.5	Trainingsgebiete	35
5.1	Kalibrierfunktion VZ-2000, 5 bis 16 Meter	40
5.2	Kalibrierfunktion VZ-2000, über 16 Meter	41
5.3	Kalibrierfunktion VZ-2000	41
5.4	Kalibrierfunktion VZ-6000, 5 bis 12 Meter	42
5.5	Kalibrierfunktion VZ-6000, 12 bis 128 Meter	43
5.6	Kalibrierfunktion VZ-6000, über 128 Meter	43
5.7	Kalibrierfunktion VZ-2000	44
5.8	Histogramm der Reflektivitäten je Laserscanner	45
5.9	Reflektivitäten der Baumstämme in unterschiedlicher Entfernung	46
5.10	Histogramm der Distanz zu den NN	47

5.11 Histogramm der Distanz zu den NN und Veränderung der Distanz mit wachsender Range	47
5.12 Vergleich der Reflektivität 1.0 μm , Single Echos	48
5.13 Reflektivität 1.0 μm , Nadeln, 2 Multiple Echos	49
5.14 Reflektivität 1.0 μm , Nadeln, 3 Multiple Echos	49
5.15 Reflektivität 1.0 μm , Nadeln, 4 Multiple Echos	50
5.16 Reflektivität 1.0 μm , Stamm, 2 Multiple Echos	50
5.17 Reflektivität 1.0 μm , Stamm, 3 Multiple Echos	51
5.18 Reflektivität 1.0 μm , Stamm, 4 Multiple Echos	52
5.19 Vergleich der Reflektivität 1.5 μm , Single Echos	52
5.20 Reflektivität 1.5 μm , Nadeln, 2 Multiple Echos	53
5.21 Reflektivität 1.5 μm , Stamm, 2 Multiple Echos	53
5.22 NDVI der Baumstrukturen, Alle Echos und Single Echos	53
5.23 Vergleich der NDVI-Werte mit Klassengrenze, Single Echos	54
5.24 Vergleich der NDVI-Werte mit Klassengrenze, Alle Echos	56
5.25 Vergleich der Reflektivitäten mit Klassengrenze, Single Echos und alle Echos	57
5.26 Vergleich der Reflektivitäten mit Klassengrenze	59
5.27 Vergleich der Klassifizierungsergebnisse	60
5.28 Vergleich der Klassifizierungsergebnisse, Ausschnitt	61

Tabellenverzeichnis

3.1	Messmodi VZ-2000	18
3.2	Messmodi VZ-6000	19
3.3	Technische Daten der TLS im Vergleich	19
3.4	Positionsgenauigkeit GPS-Punkte und Standpunkte der Totalstation	24
4.1	Statistik der ICP-Korrespondenzen Standpunkt 2	29
4.2	Transformationsparameter durch ICP-Registrierung, Standpunkt 2	29
4.3	Statistik der ICP-Korrespondenzen Standpunkt 3	29
4.4	Transformationsparameter durch ICP-Registrierung, Standpunkt 3	29
4.5	Konfusionsmatrix, Single Echos	35
5.1	Single Echos und Multiple Echos der Trainingsgebiete	45
5.2	Anzahl der Punkte je Echo und Echonummer	48
5.3	Anzahl der Punkte je Echo und Echonummer	48
5.4	Konfusionsmatrix, Single Echos	55
5.5	Größen der Genauigkeit der Klassifizierung anhand NDVI bei Verwendung von Single Echos	55
5.6	Konfusionsmatrix, Alle Echos	55
5.7	Größen der Genauigkeit der Klassifizierung anhand NDVI bei Verwendung aller Echos	56
5.8	Konfusionsmatrix, Single Echos	58
5.9	Konfusionsmatrix, Alle Echos	58
5.10	Größen der Genauigkeit bei Klassifizierung durch Reflektivitäten	58
5.11	Größen der Genauigkeit der geometrischen Klassifizierung	58

Literaturverzeichnis

- BESL, P.J., MCKAY, N.D. *et al.* (1992). A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14, 239–256.
- BRIESE, C., HÖFLE, B., LEHNER, H., WAGNER, W., PFENNIGBAUER, M. AND ULLRICH, A. (2008). Calibration of full-waveform airborne laser scanning data for object classification. *Laser Radar Technology and Applications XIII, SPIE Proceedings*, 6950, 69500H.
- CARLSON, T.N. AND RIPLEY, D.A. (1997). On the relation between ndvi, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 62, 241–252.
- CLOUDCOMPARE (2015). CloudCompare User Manual. <http://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>, accessed: 2017-11-16.
- DOUGLAS, E.S., STRAHLER, A., MARTEL, J., COOK, T., MENDILLO, C., MARSHALL, R., CHAKRABARTI, S., SCHAAF, C., WOODCOCK, C., LI, Z. *et al.* (2012). Dwel: A dual-wavelength echidna lidar for ground-based forest scanning. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, 4998–5001, IEEE.
- DOUGLAS, E.S., MARTEL, J., LI, Z., HOWE, G., HEWAWASAM, K., MARSHALL, R.A., SCHAAF, C.L., COOK, T.A., NEWNHAM, G.J., STRAHLER, A. *et al.* (2015). Finding leaves in the forest: the dual-wavelength echidna lidar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12, 776–780.
- HARDING, D.J. AND CARABAJAL, C.C. (2005). Icesat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure. *Geophysical research letters*, 32.
- HOWE, G.A., HEWAWASAM, K., DOUGLAS, E.S., MARTEL, J., LI, Z., STRAHLER, A., SCHAAF, C., COOK, T.A. AND CHAKRABARTI, S. (2015). Capabilities and performance of dual-wavelength echidna® lidar. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9, 095979–095979.
- KAASALAINEN, S., JAAKKOLA, A., KAASALAINEN, M., KROOKS, A. AND KUKKO, A. (2011). Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods. *Remote Sensing*, 3, 2207–2221.
- KRAUS, K. (2004). *Photogrammetrie. Band1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage.* Walter de Gruyter, Berlin, New York.

- MORS DORF, F., NICHOL, C., MALTHUS, T. AND WOODHOUSE, I.H. (2009). Assessing forest structural and physiological information content of multi-spectral lidar waveforms by radiative transfer modelling. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2152–2163.
- NASA (2000). Earth Observatory, NASA. https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_1.php, accessed: 2017-11-06.
- OTEPKA, J., MANDLBURGER, G. AND KAREL, W. (2012). The opals data manager—efficient data management for processing large airborne laser scanning projects. *Proceedings of the ISPRS Annals of the Photogrammetry, Melbourne, Australia*, 25, 153–159.
- PFEIFER, N., HÖFLE, B., BRIESE, C., RUTZINGER, M. AND HARING, A. (2008). Analysis of the back-scattered energy in terrestrial laser scanning data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 37, 1045–1052.
- REES, W.G. (2012). *Physical principles of remote sensing*. Cambridge university press.
- RIEGL (2017a). Riegl Homepage. <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/>, accessed: 2017-11-08.
- RIEGL (2017b). Riegl VZ-2000 Datasheet. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/DataSheet_VZ-2000_2017-06-07.pdf, accessed: 2017-11-08.
- RIEGL (2017c). Riegl VZ-2000 Datasheet. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/RIEGL_VZ-6000_Datasheet_2017-09-01.pdf, accessed: 2017-11-08.
- SUOMALAINEN, J., HAKALA, T., KAARTINEN, H., RÄIKKÖNEN, E. AND KAASALAINEN, S. (2011). Demonstration of a virtual active hyperspectral lidar in automated point cloud classification. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 66, 637–641.
- VOSSELMAN, G. AND MAAS, H.G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles publishing.
- WAGNER, W., HOLLAUS, M., BRIESE, C. AND DUCIC, V. (2008a). 3d vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1433–1452.
- WAGNER, W., HYYPPÄ, J., ULLRICH, A., LEHNER, H., BRIESE, C. AND KAASALAINEN, S. (2008b). Radiometric calibration of full-waveform small-footprint airborne laser scanners. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 163–168.
- WUJANZ, D. (2016). Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring.