



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Landschaftsarchitektur, Geoinformatik, Geodäsie, Bauingenieurwesen
Studienrichtung Geoinformatik und Geodäsie

Masterarbeit

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning
Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

ausgeführt am
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von:
Prof. Dr.- Ing. Wolfgang Kresse,
Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Norbert Pfeifer
Dipl.- Ing. Dr. techn. Christian Briese

durch
Dipl.- Ing. Marta Walicht

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2008-0054-9

Wien, im September 2008

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Master-Thesis unterstützt haben.

Besonderer Dank gebührt Prof. Dr.- Ing. Wolfgang Kresse, Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Norbert Pfeifer, Dipl.- Ing. Dr. techn. Christian Briese, für die Betreuung meiner Master-Thesis und die umfangreiche Unterstützung.

Auch dem Team des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung TU Wien danke ich für die freundliche Mitarbeit, die es mir ermöglicht hat, alle für diese Arbeit wichtigen Daten zu erfassen.

Kurzfassung

In dieser Master-Thesis wird neben der Vorstellung der konventionellen diskreten Echo Airborne Laser Scanning (ALS) Systeme und der erweiterten full waveform Airborne Laser Scanning Systeme (FWF-ALS) in einem praktischen Beispiel die Erstellung Digitaler Gelände Modelle (DGM) mit und ohne Berücksichtigung der full-waveform (FWF)-Information gegenübergestellt.

Nach einer kurzen Einleitung werden die physikalischen Grundlagen des ALS und die damit verbundenen Mechanismen der Strahlablenkung kurz vorgestellt. Auch erfolgt eine Beschreibung der natürlichen Einflussfaktoren auf den Messvorgang, welche zum Verständnis der ALS-Daten beitragen.

Danach folgt eine Erläuterung der Koordinatensysteme der Sensorplattform, welche zur Berechnung von ALS-Punkten und deren Genauigkeiten benötigt werden. Weiters behandelt diese Arbeit die Kalibrierung des ALS Systems und die Fein-Georeferenzierung von Flugstreifen.

In den folgenden Kapiteln wird auf Begriffsdefinitionen für unterschiedliche abgeleitete Modelle eingegangen und Methoden zur Klassifizierung von ALS Punktwolken in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte werden vorgestellt. Danach wird auf die Generierung von Digitalen Geländemodellen (DGM) und Oberflächenmodellen (DOM) aus ALS-Daten eingegangen.

Das vorletzte Kapitel beschäftigt sich mit diskreten Echo Systemen und FWF-ALS Prinzipien. Es wird ein Überblick über die Prozessierung von FWF-ALS Daten und der Ableitung von zusätzlichen Informationen pro detektiertem Echo gegeben.

Das letzte Kapitel befasst sich mit der Problemstellung und einem praktischen Beispiel, das zeigt, wie der jedem Echo bzw. Laserpunkt zur Verfügung stehende Wert der Echoweite genutzt werden kann, um die Grenze zwischen Niedrig-Vegetation und Boden-Punkten zu bestimmen. Weiters wird die DGM-Verbesserung basierend auf zusätzlichen Informationen pro detektiertem Echo diskutiert. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von FWF-ALS Systemen.

Abstract

This thesis presents the basic principles of conventional discrete echo airborne laser scanning (ALS) and the advanced full waveform airborne laser scanning (FWF-ALS) systems. Furthermore, the determination of digital terrain models (DTM) with and without consideration of the full waveform (FWF) information is considered and discussed within a practical example.

After a short introduction, the thesis discusses the physical fundamentals of ALS and the associated mechanisms for the beam deflection. Additionally, the natural influence factors on the measuring procedure are described. This should help to understand the ALS data.

Afterwards, the different coordinate systems of the aircraft platform, which are needed for the calculation of ALS points and their accuracies are introduced. Furthermore, this work explains the calibration of ALS systems and the fine-georeferencing of ALS flight strips.

The following chapters include definitions for different derived models and methods for the classification of ALS point clouds into terrain and off-terrain-points. Afterwards, further details for the generation of digital terrain models (DTM) and digital surface models (DSM) from ALS data are explained.

The next chapter focuses on discrete echo and FWF-ALS systems. An overview of the data processing with and without the additional information provided by FWF-ALS is given.

The last chapter discusses the issue of advanced DTM generation with FWF-ALS data with the help of a practical example. This example, shows how the echo width, which exists for each determined laser point, can be used for the determination of the border between low vegetation and terrain points. The possibility of DTM improvement based on additional information per detected pulse is discussed. Finally, a summary of the pro and cons of FWF-ALS systems for DTM generation provided.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
2. Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche	10
2.1. Physikalische Grundlagen des Laserscannings	12
2.2. Natürliche Einflussfaktoren auf den Messvorgang	14
2.3. Ein Laserimpuls – mehrfache Echos	15
2.4. Strahlablenkungsmechanismen	17
3. Orientierung der Sensorplattform im globalen Koordinatensystem	20
3.1 Innere Orientierung	21
3.2. Äußere Orientierung des Laserscanner Systems	22
3.3. Kalibrierung der Laserscanner Systeme	25
3.4. Fein-Georeferenzierung von ALS-Flugstreifen	26
3.5. Genauigkeitsbetrachtungen zum ALS	29
4. ALS-Produktionsprozess	31
4.1. Flugplanung	32
4.2. Messflug	32
4.3. Systemkalibrierung	34
4.4. GPS und IMU Prozessierung	34
4.5. Berechnung der Laserpunkte	35
4.6. Klassifizierung der Punktwolke	35
4.7. Ableitungen der Produkte	36
4.8. Die Genauigkeitsanalyse von ALS-Daten	37
5. Ableitung von digitalen Oberflächen – und Geländemodellen aus ALS-Daten	40
5.1. Begriffsdefinition	40
5.2. Möglichkeiten zur Filterung von ALS-Daten	42
5.2.1. Morphologische Filterung	42
5.2.2. Progressive TIN Verdichtung	43
5.2.3. Hierarchische Robuste Interpolation	44
5.2.4. Vergleich der Filter Methoden	45
5.3. Erstellung von Oberflächenmodellen und Geländemodellen	46
5.3.1. Digitale Oberflächenmodelle	46
5.3.2. Digitale Geländemodelle	47

5.4. Software für die ALS-Datenbearbeitung und verwendete Datenformate .	47
6. Gegenüberstellung von Diskrete-Echo- und FWF-ALS-Systemen	53
6.1. Bis jetzt durchgeführte Studien in der Interpretation der Echoweite und Amplitude	61
6.2. Untersuchungen mit FWF-ALS in Forstwirtschaft und in Stadtgebieten	64
7. Verbesserte DGM-Erstellung mit Hilfe der Echoweite	69
7.1. Problemstellung	69
7.2. Testgebiet	70
7.3. Die Bodenvegetationsgrenze auf Basis der Echoweite - DTM-Erstellung	73
7.4. Beurteilung der Ergebnisse	103
8. Zusammenfassung	105
Literaturverzeichnis	107

Anhang

I. Begriffsdefinitionen	117
II. Produktbereiche	122

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip des flugzeuggetragenen Laserscannings	12
Abbildung 2: Letztes Echo an unterschiedlichen Objekten	16
Abbildung 3: Diffuse und gerichtete Reflexion	17
Abbildung 4: Ausgesandter Laserimpuls und zeitverzögertes, verstärktes Echo	18
Abbildung 5: Mehrfache, detektierte Echos und deren Überlagerung	18
Abbildung 6: ALS-Ablenkmechanismen und dadurch erzeugte Scanmuster	19
Abbildung 7: Einbau des Laserscanner Systems	21
Abbildung 8: Die Strahlrichtung der Laserapertur im Spiegelsystem.....	22
Abbildung 9: Definition des Rollwinkels ω , Definition des Nickwinkels ϕ , Definition des Kurswinkels κ	23
Abbildung 10: Das körperfeste IMU System X^I, Y^I, Z^I und das Laserscannersystem X^L, Y^L, Z^L	24
Abbildung 11: Montage der Laserscanner Riegl LMS-Q560 und des IMU-Systems	25
Abbildung 12: Prinzip der Streifenblockausgleichung	28
Abbildung 13: Streifendifferenzen anhand des Beispiels von Dachflächen	29
Abbildung 14: Der ALS-Produktionsprozess.....	32
Abbildung 15: Digitales Oberflächenmodell in Form einer Triangulierung (Delf)	41
Abbildung 16: Digitales Geländemodell mit Bruchlinie in Form eines hybriden Gitters	42
Abbildung 17: Morphologische Filterung - großer Höhenunterschied und geringe Entfernung	44
Abbildung 18: Progressive TIN-Verdichtung - Gewichtsfunktion für die Laserpunkte	45
Abbildung 19: Hierarchische Robuste Interpolation - Gewichtsfunktion für die Laserpunkte	46
Abbildung 20: Empfangene Signalstärke; Bestimmung diskreter Echos (ALS-Empfänger) vs. full-waveform Digitalisierung (FWF-ALS-Empfänger)	55
Abbildung 21: Von FWF-ALS Daten zum DGM-Erstellung	58
Abbildung 22: Modellierung der gespeicherten Wellenform mittels der Summation von Gaußschen-Glockenkurven	60
Abbildung 23: Einfluss der Oberflächenneigung auf das Echo Signal (Amplitude, Echoweite)	61
Abbildung 24: Das Oberflächenprofil von FWF-ALS Daten	62

Abbildung 25: Das Oberflächenprofil von FWF-ALS Daten	63
Abbildung 26: Beispiel für die vertikale Verteilung der Echosignale von FWF-ALS Daten und die resultierende Impulsstärke	64
Abbildung 27: Beispiel für vertikale Verteilung der Echosignale von FWF-ALS Daten und die resultierende Impulsstärke	64
Abbildung 28: Beispiel für die Trennung zweier Echos: Grundvegetation und Boden	65
Abbildung 29: Discrete ALS Systems, FWF-ALS Systems	67
Abbildung 30: Beispielprofil eines Multiechosystems und FWF-ALS Systems	68
Abbildung 31: Das Scangebiet Leithagebirge (südöstlich von Wien)	72
Abbildung 32: Österreichische Karte 1:50 000 – Eisenstadt	73
Abbildung 33: Orthophoto vom Schlosspark Eisenstadt	73
Abbildung 34: Orthophoto vom Schlosspark Eisenstadt mit gekennzeichneten Testgebieten, mit Hilfe dessen die Grenze zwischen Boden und Nichtbodenpunkten gesucht wird	74
Abbildung 35: Modell der Echoweite – Einfärbung der Echoweite, DGM (Schummerung)	75
Abbildung 36: Modell der Echoweite – Einfärbung der Echoweite, DGM (Schummerung)	76
Abbildung 37: Modell der Echoweite – Einfärbung der Echoweite, DGM (Schummerung)	77
Abbildung 38: DGMe auf Basis der Grenzwerte der Echoweite. Links oben: DGM ohne Berücksichtigung der Echoweiteparameter, oben in der Mitte DGM mit 1,720; rechts oben mit 1,730; links unten mit 1,740; rechts unten mit 1,750 als Grenzwert.....	80
Abbildung 39: DGM-Schummerung ohne Berücksichtigung der Echoweite, DGM-Schummerung nach der Eliminierung der Echoweite über 1,764 ns und 1,757 ns	81
Abbildung 40: Orthophoto vom Schlosspark Eisenstadt	82
Abbildung 41: Orthophoto (Testfläche 1).....	84
Abbildung 42: Übersicht über die Geländebeschaffenheit im südwestlichen Teil der Testfläche 1	85
Abbildung 43: Feldskizze (Testfläche 1 – Wegkreuzung in südwestliche Teil	87
Abbildung 44: Modell der Echoweite ohne Berücksichtigung zusätzlicher Information	87
Abbildung 45: DOM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 1).....	88
Abbildung 46: DOM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo	89
Abbildung 47: Differenz Modell von DOM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe - Testfläche 1).....	90

Abbildung 48: DGM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 1)	91
Abbildung 49: DGM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo	92
Abbildung 50: Differenz Modell von DGM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe - Testfläche 1)	93
Abbildung 51: Orthophoto (Testfläche 2)	94
Abbildung 52: Übersicht über die Geländebeschaffenheit im nördlichen Teil der Testfläche 2	95
Abbildung 53: Feldskizze (Testfläche 2 – Obelisk in nördliche Teil)	95
Abbildung 54: Modell der Echoweite ohne Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo – Einfärbung der Echoweite (Testfläche 2).....	97
Abbildung 55: DOM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 2).....	98
Abbildung 56: DOM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo	99
Abbildung 57: Differenz Modell von DOM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe - Testfläche 2).....	100
Abbildung 58: DGM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 2)	101
Abbildung 59: DGM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo	102
Abbildung 60: Differenz Modell von DGM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe - Testfläche 2)	103

Histogrammverzeichnis

Histogramm 1: Auf der X-Achse ist die Reihenfolge der Echoweiten, auf der Y-Achse sind die Echogrößen in [ns] abgebildet.....	75
Histogramm 2: Auf der X-Achse ist die Reihenfolge der Echoweiten, auf der Y-Achse sind die Echogrößen in [ns] abgebildet.....	76
Histogramm 3: Auf der X-Achse ist die Reihenfolge der Echoweiten, auf der Y-Achse sind die Echogrößen in [ns] abgebildet.....	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anbieter von Softwares für die Laserdatenbearbeitung	49
Tabelle 2: Entwicklung der ALS Systeme und ihrer Eigenschaften	57
Tabelle 3: Statistische Größen mit deren Hilfe der Grenzwert der Echoweite bestimmt wird	79

1. Einleitung

Die Technologie des Airborne Laser Scanning - kurz ALS oder airborne Lidar (Light Detection and Ranging) genannt - hat sich in den letzten Jahren von einer experimentellen Technik zu einer weit verbreiteten Produktionsmethode für diverse Geodaten entwickelt [Landtwing, 2005].

Mit flugzeuggetragenen Laserscannern werden heutzutage z.B. Geländeoberflächen, Vegetation und Dachlandschaften erfasst. Für die Praxis ist der potentiell hohe Automatisierungsgrad des flugzeuggestützten Laserscannings von besonderer Bedeutung, weil dadurch große Gebiete kostengünstig bearbeitet werden können [Landtwing, 2005].

Heute verfügen viele Firmen über das nötige Know-how und die eingespielten Produktionsabläufe zur rationellen Prozessierung von ALS-Daten. In vielen Fällen hat die Erfahrung einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Endprodukts. Einige wichtige Entscheidungen bei der Auswertung der Laserpunkte könnten besser getroffen werden, wenn zuverlässige Hinweise zur Qualität der einzelnen Datensätze existieren.

Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der Technischen Universität Wien werden Fehlereinflüsse und empirische Genauigkeiten auf unterschiedliche Arten untersucht und die verwendeten Algorithmen ständig verbessert (Anhang I zeigt ALS-Begriffsdefinitionen des I.P.F. der TU Wien). Die teils sehr guten Resultate, welche mit ALS erreicht werden, sollen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass nach wie vor Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten bestehen.

Im Rahmen dieser Master-Thesis werden neben den konventionellen ALS-Systemen, die so genannten full-waveform (FWF-ALS) Systeme vorgestellt.

Um zum besseren Verständnis der beiden unterschiedlichen Sensor Systeme beizutragen, werden die physikalischen Grundlagen des ALS (Airborne Laser Scanner) und die damit verbundenen Mechanismen der Strahlablenkung vorgestellt und die natürlichen Einflussfaktoren auf den Messvorgang beschrieben.

Es folgt eine Erläuterung der Koordinatensysteme der Sensorplattform, welche zur Berechnung von ALS-Punkten und deren Genauigkeiten benötigt werden.

Im Weiteren wird die Kalibrierung der Laserscanner Systeme und die Fein-Georeferenzierung von Flugstreifen behandelt.

Der ALS-Produktionsprozess beinhaltet viel mehr als nur die eigentliche Messung. In Kapitel 4 erfolgt eine schematische Darstellung des gesamten Ablaufs.

In den nächsten Abschnitten wird auf Begriffsdefinitionen unterschiedlich abgeleiteter Modelle eingegangen und entwickelte Methoden zur Klassifizierung von automatisch gemessenen Punkt wolken in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte dargestellt [Pfeifer, 2003]. Weiters wird auf die Generierung von Digitalen Geländemodellen (DGMen) und Oberflächenmodellen (DOMen) aus ALS-Daten eingegangen.

Zum besseren Verständnis werden kurz die wichtigsten I.P.F. Programme vorgestellt, die zur Interpolation, zum Management und zur Visualisierung von digitalen Modellen dienen.

Das Kapitel 6 beschäftigt sich mit Diskrete-Echo-Systemen und dem FWF-ALS-Prinzip. Es wird ein Überblick in die Prozessierung von FWF-ALS-Daten und zusätzlichen Informationen gegeben. Danach wird auf schon durchgeführte Studien und Entwicklungen näher eingegangen.

Das letzte Kapitel befasst sich mit der Analyse von aus FWF-ALS-Systemen zusätzlich generierten Attributen pro ALS-Punkt. Anhand eines praktischen Beispiels wird gezeigt, wie der Wert der Echoweite genutzt werden kann, um die Grenze zwischen Niedrig-Vegetation und Bodenpunkten zu finden. Es wird die Möglichkeit der DGM-Verbesserung basierend auf zusätzlichen Informationen pro detektiertes Echo diskutiert. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der FWF-ALS-Systeme.

2. Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche

In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen des ALS und die damit verbundenen Mechanismen der Strahlablenkung kurz vorgestellt. Es folgt eine Beschreibung der natürlichen Einflussfaktoren auf die Entfernungsmessung, welche zum Verständnis der ALS-Daten beiträgt.

ALS ist eine Technologie zur großflächigen und berührungslosen Aufnahme der Erdoberfläche. Dabei ist der Sensor, der so genannte Scanner, auf einer luftgestützten Plattform (Flugzeug oder Helikopter) montiert und sendet in rascher Folge (heute bis zu 200 kHz) extrem kurze (üblicherweise ca. 10 ns) Laserpulse aus. Diese werden an der Erdoberfläche reflektiert und zum Sensor zurückgeworfen. Aus der Zeit, welche zwischen dem Aussenden des Pulses und dem Empfangen der zurückgeworfenen Energie vergeht, kann die vom Laserpuls zurückgelegte Distanz berechnet werden und somit die Entfernung zwischen Sensor und Erdoberfläche bestimmt werden.

Die Bestimmung der Entfernung zu den reflektierenden Objekten erfolgt beim ALS typischerweise mittels des Impulsverfahren [Kraus, 2004]. Dabei wird die Messrate durch einen Pulsgenerator vorgegeben und die Laufzeit eines oder, bei Mehrfachreflexionen auf der Erdoberfläche, mehrerer rückgestreuten Impulse gemessen. Bei der Umrechnung in Entfernungen muss berücksichtigt werden, dass der Laserimpuls sich mit einer von der Lichtgeschwindigkeit abweichenden Gruppengeschwindigkeit bewegt. Diese Abweichung beträgt bis zu 0.03 %, was bei einer Flughöhe von 1000 m immerhin eine Differenz von 0.3 m ausmacht [Rees, 2001].

Die Mehrheit aller Laser basiert heute auf dem Prinzip der Laufzeitmessung von Laserimpulsen. Es gibt noch eine andere Möglichkeit, nämlich die Phasenvergleichsmessung. Beim Phasenvergleichsverfahren wird das vom Laser erzeugte Licht zum Beispiel mit einer sinusförmigen Welle moduliert. Diese Verfahren werden im Terrestrischen Laser Scanning (TLS) verwendet [Kraus, 2004].

In der Abbildung 1 ist das Prinzip des ALS dargestellt. Mittels eines GPS-Empfängers (Global Position System) und eines Inertiales Messsystems (IMU) wird die Orientierung und Lage des Laserscanner bestimmt. Diese einzelnen Messsysteme werden in Kapitel 3 genau erläutert.

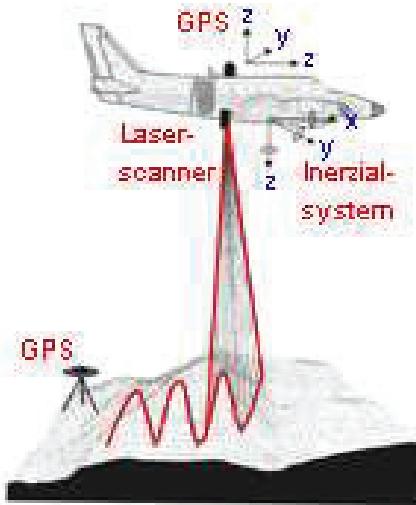


Abbildung 1: Prinzip des flugzeuggetragenen Laserscannings. [Kraus 2004]

Im Vergleich zu natürlichem Licht hat das von einem Laser erzeugte Licht spezielle Eigenschaften. Je nach Art des eingesetzten Lasers ist der Laserstrahl exakt durch die Frequenz definiert, stark gebündelt (kleiner Öffnungswinkel des Lichtstrahls), kohärent (Wellepakete schwingen zueinander in Phase) und durch hohe Intensität charakterisiert [Wagner, Ullrich, Briese 2003].

Für das flugzeuggestützte Laserscanning sind der kleine Öffnungswinkel des gebündelten Laserstrahls und die hohe Strahlintensität von großer Bedeutung. Die Bündelung kann durch den Einsatz optischer Komponenten weiter verbessert werden. So beträgt die Strahldivergenz kommerzieller Laserscanner zirka 0,2 - 2 mrad, was bei einer Flughöhe von 1000 m bedeutet, dass der Durchmesser des Laserstrahls auf der Erdoberfläche 0,2 - 2 m beträgt (footprint) [Wagner, Ullrich, Briese 2003].

Damit nicht nur ein Profil von Punkten in Flugrichtung gemessen werden kann, wird jeder Laserpuls mithilfe eines Ablenkmechanismus moduliert auch eine Datenerfassung quer zu Flugrichtung ermöglicht wird (siehe Kapitel 2.4.).

Ein großer Vorteil des Laserscanning liegt darin, dass man nicht an eine gute Beleuchtung der Objekte durch die Sonne gebunden ist. So werden Laserscanningaufnahmen nicht durch störende Wolkenschatten beeinträchtigt. Die Senderichtung und die Empfangsrichtung sind nahezu ident.

Sind zum Zeitpunkt des Aussendens des Pulses die Position und die Orientierung des Sensors bekannt (GPS und IMU), können damit die 3D-Koordinaten des getroffenen Bodenpunktes berechnet werden (siehe Kapitel 3). Dieser - für die ALS-Technologie zentrale - Vorgang

wird „Direkte Georeferenzierung“ genannt und ist im Kapitel 4.4. samt den dazugehörigen Instrumenten und Methoden näher beschrieben.

2.1. Physikalische Grundlagen des Laserscannings

Es sind in den unterschiedlichen Anwendungen eine Reihe anderer Begriffe wie Laser Radar, Lidar ("Light detection and ranging"), oder Ladar ("Laser detection and ranging") gebräuchlich, aber unabhängig von der Namensgebung arbeiten alle Systeme nach demselben grundlegenden Entfernungsmessprinzip (Impulsmessung). Laserscanner stellen eine Erweiterung konventioneller Radartechniken auf den optischen Frequenzbereich dar.

Es wird die Laufzeit (t_L) zwischen der Aussendung des Laserimpulses und dem Empfang des reflektierten Impulses gemessen.

Das Signal muss zwei Mal durchlaufen - von Sensor zur Reflexionsfläche und zurück zum Empfänger. Die vom Laser erzeugten Impulse breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit (c) aus. Die Entfernung (D) ergibt sich aus der Laufzeit des Signals (t_L) und wird durch die folgende Formel berechnet [Wehr und Lohr, 1999]:

$$t_L = 2 \cdot \frac{D}{c} \quad \rightarrow \quad D = \frac{t_L \cdot c}{2} \quad (1)$$

Die Intensität des empfangenen Laserimpulses hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab, welche in der aus der Mikrowellenfernerkundung bekannten Radargleichung erfasst werden. Der Streukörper wird normalweise einen Teil der einfallenden Strahlung absorbieren und den Rest in alle Richtungen streuen. Im Falle z.B. eines Blattes wird nur ein Teil der Strahlung das Objekt beleuchten. Oftmals wird nur ein sehr kleiner Anteil der einfallenden Strahlung zurück in Richtung des Empfängers gestreut. Das Maß für den Anteil der reflektierten Leistung ist der Streuquerschnitt σ (m^2). Die rückgestreute Leistung P_r ergibt sich aus folgender Gleichung (Radargleichung) nach [Wagner, Ullrich, Briese 2003]:

$$P_r = \frac{P_t D_r^4}{4\pi R^4 \beta_t^2} \cdot \eta_{SYS} \eta_{ATM} \cdot \sigma \quad (2)$$

P_r – die rückgestreute empfangene Leistung (Watt)

P_t – die Strahlungsleistung am Sender (Watt)

D_r – der Durchmesser der Empfangsoptik (Meter)

R – die Entfernung zwischen Sender bzw. Empfänger zum beleuchteten Objekte (Meter)

β_t – der Öffnungswinkel einer optischen Apparatur (Radian)

η_{SYS} – der Wirkungsgrad des Laserscanners

η_{ATM} – der Transmissionsfaktor durch die Atmosphäre

σ – der Streuquerschnitt (m^2)

Die Gleichung (2) ist die an das ALS angepasste Radargleichung und Grundlage für eine quantitative Bestimmung des Rückstreuquerschnittes σ . Voraussetzungen dafür sind die präzise Kalibrierung des Sensors und die Kenntnis der atmosphärischen Bedingungen (η_{ATM}).

Bei einem Laserscanner steht bei einem typischen Flugeinsatz vom Sendesignal nur ein geringer Bruchteil des reflektierten Laserstrahls am Empfänger zur Verfügung [Wagner, Ullrich, Briese 2003]. Das verdeutlicht die Anforderungen an Laserleistung und Empfängerempfindlichkeit um ein gutes Signal/Rauschverhältnis zu erzielen. Die Intensität des Rauschens hängt von einer Reihe von Einflussgrößen ab. Dabei sind die wichtigsten Faktoren: das Verstärkerrauschen, der Dunkelstrom (fließt in einer Photodiode auch wenn keine Strahlung einfällt) und die Hintergrundstrahlung. Die Hintergrundstrahlung kann durch einen Interferenzfilter vermindert werden.

Nach [Wagner, Ullrich, Briese 2003] kann der an kommende Laserstrahl durch ein Integral mathematisch ausgedrückt werden:

$$P_r(t) = \int_{R_1}^{R_2} \frac{D_r^2}{4\pi R^4 \beta_t^2} \cdot \eta_{SYS} \eta_{ATM} \cdot P_t(t - \frac{2R}{v_g}) \cdot \sigma(R) dR \quad (3)$$

v_g – die Geschwindigkeit des Laserpulses

$\sigma(R)dR$ – der differentielle Rückwärtsquerschnitt im Abstand dR

t – die Zeit

R_1, R_2 – der Abstand zwischen den ankommenden Laserimpulsen

Der Scannermechanismus lenkt den Laserstrahl quer zur Flugrichtung ab, wodurch ein Geländestreifen entlang des Flugwegs abgetastet wird.

2.2. Natürliche Einflussfaktoren auf den Messvorgang

Der Messvorgang wird durch eine Reihe natürlicher Einflussfaktoren beeinflusst. Die Sonnenstrahlung kann durch Reflexionen an der Erdoberfläche und an atmosphärischen Bestandteilen direkt zum Laserscanner hin gestreut werden. In der Photodiode werden dann die Intensitäten der reflektierten Laser- und Sonnenstrahlung aufsummiert. Die gesamte vom Laserscanner empfangene Fremdstrahlung wird als Hintergrundstrahlung bezeichnet. Diese muss, um einen optimalen Betrieb des Laserscanners zu gewährleisten, kleiner als die Intensität des reflektierten Laserimpulses sein. Daher sollte, unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Lasertypen und Empfänger, eine möglichst langwellige Laserfrequenz gewählt werden [Wagner, Ullrich, Briese 2003].

Während der Laserstrahl die Atmosphäre zweimal durchläuft, wird er durch Absorption und Streuvorgänge gedämpft. In vielen Bereichen der Atmosphäre wird die Strahlung auf kürzestem Wege absorbiert. Der atmosphärische Einfluss ist aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität von Wasserdampf, Wassertröpfchen und Aerosole oft schwer zu erfassen. Dadurch muss zwischen Auflösung und Trennungsvermögen unterschieden werden. Das Auflösungsvermögen eines Laserscanners ist durch die räumliche Ausdehnung des Laserstrahls eingeschränkt, während das des Laserstrahls in der Ausbreitungsrichtung durch den Strahlöffnungswinkel und durch die Impulsdauer begrenzt ist.

Die Übertragung der Laserimpulse in den Außenraum und deren Empfang geschieht mit Hilfe optischer Linsen. Als Folge des Wellencharakters elektromagnetischer Strahlung kommt es unvermeidlich zu Beugungerscheinungen, die das Auflösungsvermögen begrenzen. Der Öffnungswinkel einer optischen Apertur hängt sowohl von der Wellenlänge, dem Durchmesser der Apertur, und einer gerätespezifischen Konstante ab.

Das Trennungsvermögen zweier vom Laserstrahl erfassten Objekte ist von der Dauer des ausgesendeten Laserimpulses und der Ausbreitungsgeschwindigkeit die durch die Gruppengeschwindigkeit, welche etwas kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist, abhängig. Für einfache Betrachtungen reicht allerdings die Annäherung $v_g \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ [Wagner, Ullrich, Briese 2003]. Wenn der Laserstrahl den Weg bis zum weiter entfernten Punkt zweimal durchläuft, kommt das Echo vom zweiten Punkt später beim Empfänger an als das des ersten

Punktes. Damit sich die beiden Echos nicht überlappen, muss das räumliche Trennungsvermögen für einen langen Impuls vorhanden sein (siehe Kapitel 2.3.) [Wagner, Ullrich, Briese 2003].

Das räumliche Trennungsvermögen ist nicht mit der Messgenauigkeit eines Laserscanners zu verwechseln, welche sich auf die Genauigkeit der Entfernungsgabe für ein Objekt bezieht.

2.3. Ein Laserimpuls – mehrfache Echos

Derzeit zum Einsatz kommende kommerzielle Laserscannersysteme sind in der Lage, mehrere Impulse pro gesendeten Laserstrahl zu registrieren.

Die Interaktion eines Laserstrahls mit der Erdoberfläche beruht darin, dass der Laserstrahl auf ein Objekt trifft und an der Objektoberfläche gestreut wird, wobei ein Teil der Strahlung wieder in Richtung des Sensors zurückreflektiert werden kann. Befinden sich mehrere Objekte im Strahlengang, so kommt es zu mehrfachen Teilreflexionen, die der Reihe nach die Entfernung der Objekte zum Sensor repräsentieren. So wird zum Beispiel der über einem Waldgebiet registrierte erste Impuls normalerweise mit der "Oberfläche" des Kronendaches assoziiert und der letzte Impuls mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (in erster Linie abhängig von der Bestandsdichte) mit dem Boden. Statistische Methoden, die sich indirekt auf dieses Bild stützen, sind bereits in der Lage z.B. Waldparameter wie Baumhöhe oder Biomasse mit einer guten Genauigkeit zu liefern.

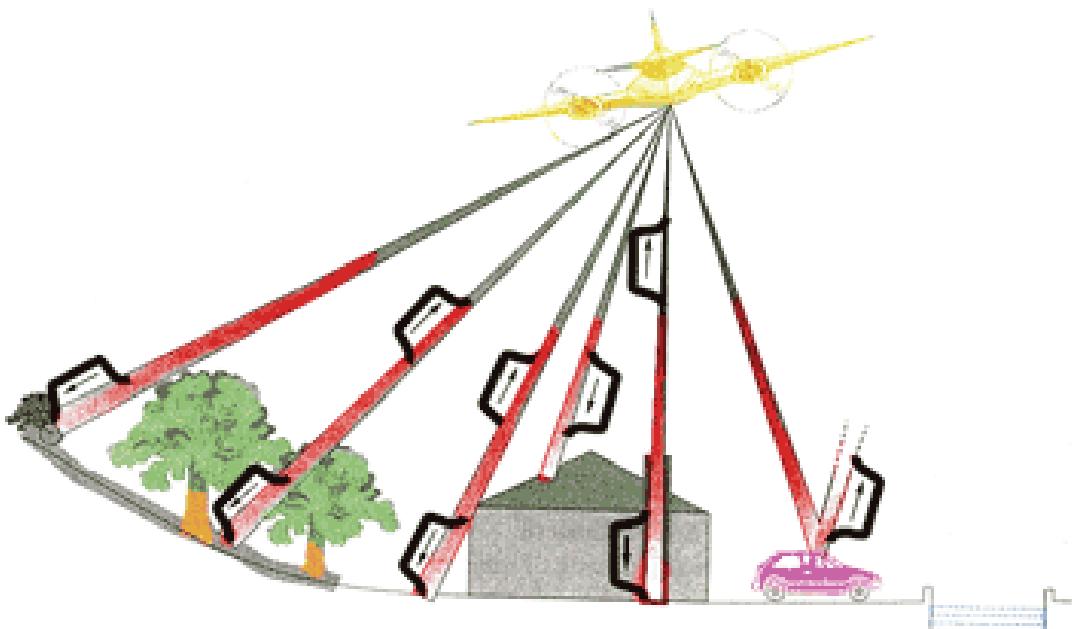


Abbildung 2: Letztes Echo an unterschiedlichen Objekten. [Kraus 2004]

Wichtig ist zu berücksichtigen, dass ein ausgesandter Laserimpuls durch die Interaktion mit der Erdoberfläche seine Form verändern kann, wenn er auf räumlich ausgedehnte Streuobjekte trifft. Die Abbildung 2 stellt die unterschiedlichen Möglichkeiten vor: Falls der Impuls auf eine (Wasser-) Fläche trifft, die sehr stark absorbiert, wird nicht genügend Strahlungsenergie für eine Entfernungsmessung zurückgestreut. Wenn der Impuls auf eine spiegelnde Fläche, z.B. ein Autodach, trifft, kann der gerichtet reflektierte Strahl später auf eine andere Oberfläche treffen, sodass dieses Echo dem Laserscanner übermittelt wird. Durch Zufall kann ein Laserstrahl teilweise an der Oberkante und teilweise am Boden eines Kamins reflektiert werden.

Je nachdem ob die Oberfläche, auf die der Laserstrahl trifft, rau oder glatt ist, kommt es zu einer diffusen oder gerichteten Reflexion (siehe Abb. 3). Diese hängt nicht nur von der Oberflächenbeschaffenheit, sondern auch von der Wellenlänge des Laserstahls ab. Der Großteil der Erdoberfläche reflektiert diffus, ruhiges Gewässer reflektiert aber gerichtet, was zu Datenlöchern bei ALS-Aufnahmen in Gebieten mit Seen oder Teichen führt, da die Reflexionsstrahlung vom Laserscanner nicht erfasst werden kann.

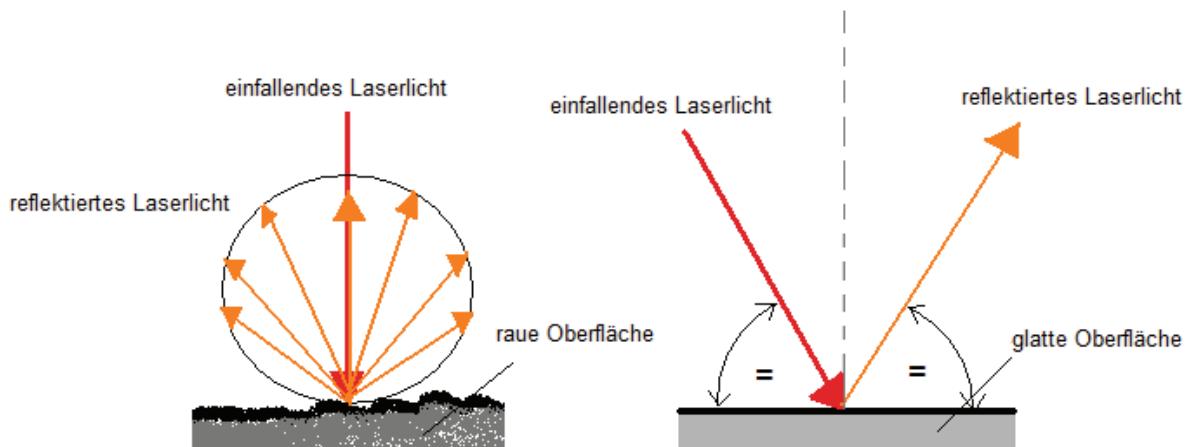


Abbildung 3: Diffuse und gerichtete Reflexion. [Rieg, 2008]

Oft passiert es, dass der Laserstrahl auf eine Gebäudekante trifft. Dann gibt es dort einen ersten und am darunter liegenden Boden einen letzten Impuls. Bei einem Baum kann es ähnlich sein, wobei der letzte Impuls aber nicht vom Boden, sondern von einem Ast kommt. Bei niedriger Vegetation - kleiner als 1.5 m, erscheint immer nur die Vegetationsoberfläche, auch wenn ein Teil des Lasterstrahles bis zum Boden vordringt.

Ein einziger vom Lasersensor ausgesandter Laserimpuls kann mehrere Echos hervorrufen. Diese Mehrfachreflexion kann auftreten, wenn reflektierende Objekte in unterschiedlichen

Distanzen entlang des Laserstrahls vorhanden sind und die Divergenz des Laserstrahles ausreicht, um diese Objekte teilweise zu beleuchten. Im Empfänger treten dann mehrere, zeitlich kurz versetzte Echos auf oder es überlagern sich mehrere Echos zu einem einzigen detektierten Echo [Briese, Beleda, Pfeifer, 2001].

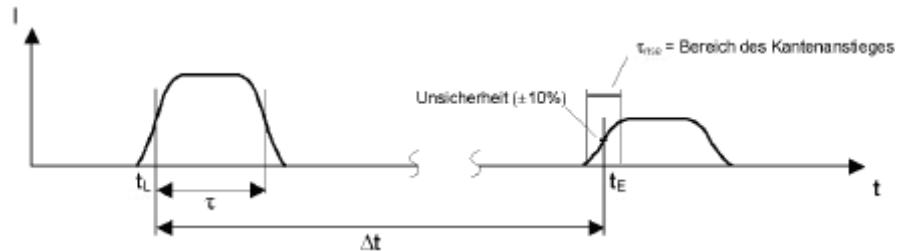


Abbildung 4: Ausgesandter Laserimpuls und zeitverzögertes, verstärktes Echo. [Briese, Beleda, Pfeifer, 2001]

Eine Trennung zweier Echos ist nur dann möglich, wenn ihr zeitlicher Abstand (Δt) größer als die Pulslänge (τ) ist (Abb.4.). Die Distanz zwischen den beleuchteten Oberflächen, die vom Laserstrahl zweimal zurückgelegt werden muss, darf demnach nicht geringer sein als die halbe Pulslänge. Außerdem benötigt die Elektronik bis zur Detektierung des nächsten Echos eine bestimmte Zeit (engl. recovery time). Für eine Pulsdauer von 5 ns liegt somit die minimale Distanz, die zwischen zwei Objekten liegen muss, um die Echos getrennt detektieren zu können, im Bereich von über 1.5m [Briese, Beleda, Pfeifer, 2001].

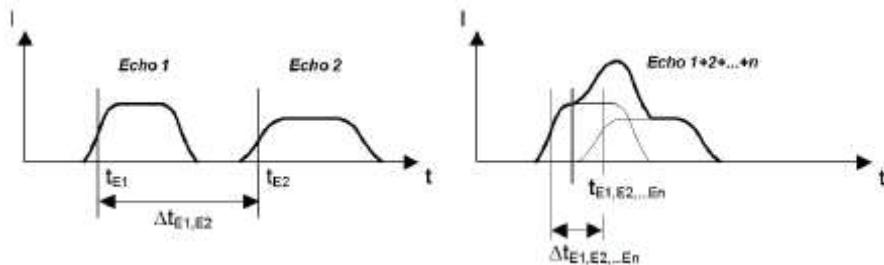


Abbildung 5: Mehrfache, detektierte Echos und deren Überlagerung. [Briese, Beleda, Pfeifer, 2001]

Im Falle der Überlagerung der Einzelechos ist die gemessene Strecke keinem konkreten Teilecho bestimmter Reflexionsflächen zuzuordnen, da es aus der Sichtweise des Detektors nur ein zu detektierendes Echo gibt (vgl. Abb. 5.).

2.4. Strahlablenkungsmechanismen

Die Orientierung des Laserstrahles im lokalen Koordinatensystem wird durch die jeweilige Ablenkeinrichtung beeinflusst. Ein Laserstrahl erzeugt mit Hilfe dieser Systeme ein charakteristisches Scanmuster auf dem Boden. Dabei kann man zwischen bidirektionalen und

unidirektionalen Ablenkungssystemen unterscheiden. Unidirektionale Systeme lenken die Strahlen innerhalb einer sich mit dem Flugzeug fortbewegenden Ebene ab, während bei bidirektionalen Systemen die Laserstrahlen auf gekrümmten, dem Flugpfad folgenden, Flächen liegen. Oszillierende Spiegel erzeugen auf der beleuchteten Oberfläche eine Zick-Zack-Linie oder mäandrierende parallele Linien bzw. Bögen. Rotierende Polygone, der Fiber-Scanner (siehe Abb. 6) und andere komplexe Spiegelsysteme produzieren als Scanmuster parallele Linien. Spiegel, die eine Nutation durchführen, beleuchten den Boden mittels eines elliptischen Scanmusters.

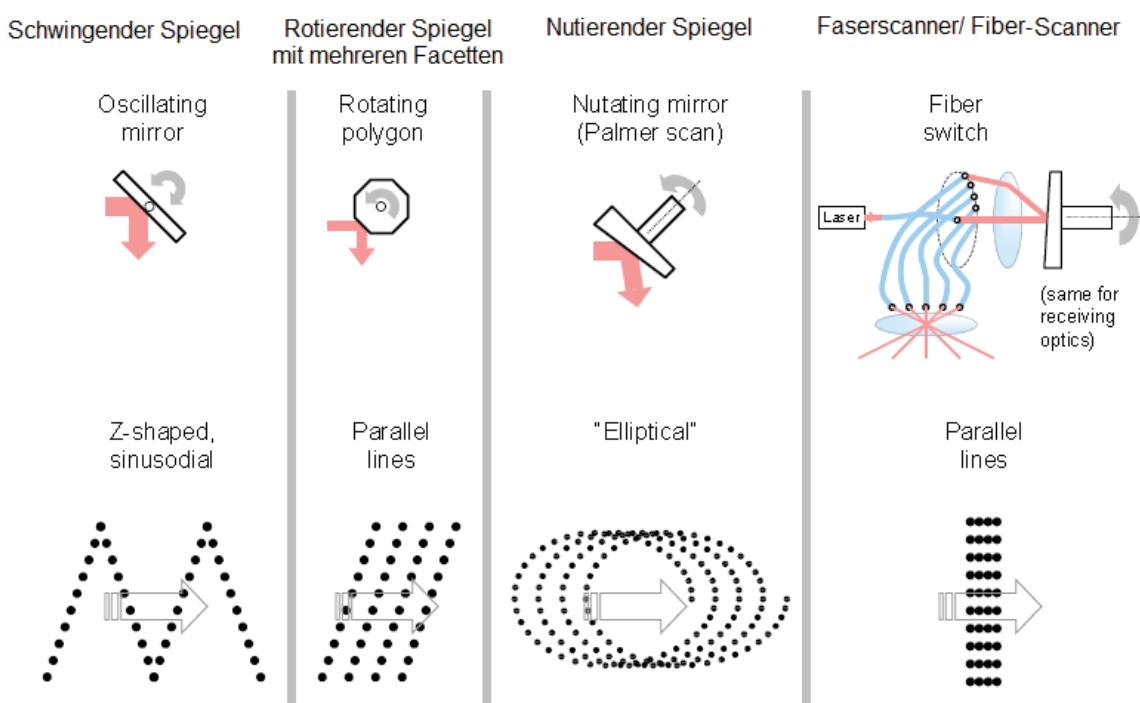


Abbildung 6: ALS-Ablenkmechanismen und dadurch erzeugte Scanmuster. [Brenner, 2006]

Der Betrag der Ablenkung muss für jede durchgeführte Distanzmessung gespeichert werden. Das Aussehen des Scanmusters variiert aber nicht nur aufgrund des Ablenksystems, sondern hängt auch von der Flugrichtung, der Fluggeschwindigkeit und der Oberflächenbeschaffenheit ab.

Der Vorteil des Fiber-Scanners liegt in seinem konstanten Punktabstand auf dem Boden, der aber in Flugrichtung und Querrichtung stark differieren kann und eine inhomogene Punktwolke liefert. Systeme mit Schwingspiegel haben den Nachteil, dass die Punktdichte abhängig vom Ablenkinkel variiert. Eine konstante Winkeländerung bedingt eine geringer werdende Punktdichte am Rand eines Scanstreifens. Dieser Tatsache wirkt bei diesen

Systemen die kontinuierliche Bewegung des Spiegels, die naturgemäß langsamer wird, wenn der Spiegel seine Richtung ändert, entgegen.

Der Vorteil des Palmer Scanners liegt in der doppelten Beobachtung der Oberfläche. Durch die Nutation des Spiegels hat er sozusagen einen "Vor- und Rückblick". Es können natürlich keine exakt identischen Punkte identifiziert werden. Zwei Laserstrahlen treffen jedoch ungefähr auf die gleiche Oberfläche. Es wird somit ein Oberflächenelement innerhalb eines Scanstreifens redundant beobachtet. Diese redundante Beobachtung kann zur Kalibrierung der Distanzmesseinrichtung genutzt werden.

3. Orientierung der Sensorplattform im globalen Koordinatensystem

In diesem Kapitel werden die Koordinatensysteme der Sensorplattform erläutert, welche zur Berechnung von ALS-Punkten und deren Genauigkeiten benötigt werden.

Weiters wird die Kalibrierung der Laserscanner Systeme und die Fein-Georeferenzierung von Flugstreifen behandelt.

Während der Distanzmessung wird die Orientierung des Laserstrahles in Bezug zur Plattform registriert. Jeder Sensor definiert ein eigenes Koordinatensystem. Da die Sensoren fix miteinander verbunden sind, können die jeweiligen lokalen Koordinatensysteme in ein gemeinsames lokales Koordinatensystem überführt und als Sensorkoordinatensystem, mit dem Ursprung im Lasersensor, betrachtet werden.

Bei der Koordinatenbestimmung für die Punkte einer ALS-Befliegung handelt es sich prinzipiell um eine Polarkoordinatenmessung, d.h. ausgehend von einer bekannten Position werden mittels einer bekannten Richtung im 3D-Raum und der Strecke entlang dieser Richtung die Koordinaten des Objektpunkts bestimmt. Für die Erfassung der Variablen Position, Raumrichtung und Strecke gibt es innerhalb eines ALS-Systems unterschiedliche Systemkomponenten: eine für die Punktbestimmung am Boden gemessen durch Richtungswinkel- und Laufzeitmessung des Laserstrahles (Scanner), eine für die Positionsbestimmung (GPS), eine für die Bestimmung der Raumorientierung des Messsystems (IMU), und eine Komponente für das Flugmanagementsystem zur Kontrolle, Steuerung und Navigation der Befliegung (CCNS).

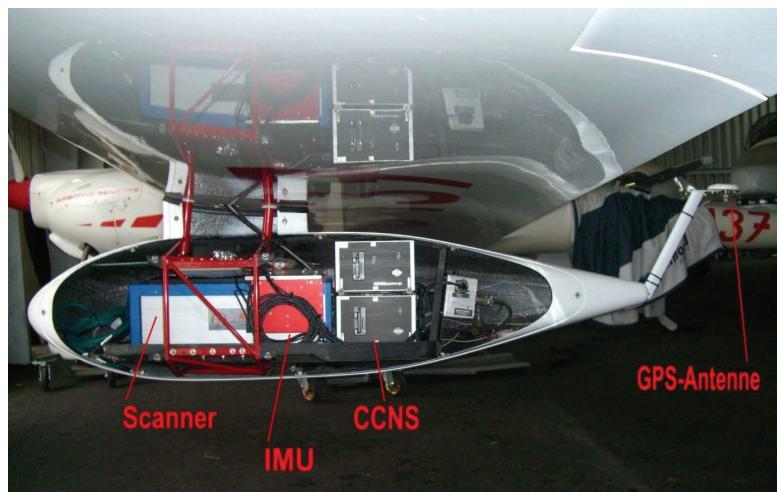


Abbildung 7: Einbau des Laserscanner Systems: IMU (Inertial Measuring Unit), GPS-Antenne (Global Positioning System) und CCNS (Computer Controlled Navigation System – siehe Kapitel 4.2.). [Diamond Airborne Sensing, 2008]

3.1. Innere Orientierung

Die Parameter der inneren Orientierung beinhalten alle mechanisch-geometrischen Einflussgrößen, die zur Berechnung der Blickrichtung des Lasermessstrahls im Spiegelsystem erforderlich sind. Diese Parameter umfassen sowohl die Position dx_L , dy_L und dz_L der Laserapertur bezüglich des Spiegels, die aktuellen Laserstrahlrichtungen β_L und γ_L zum Spiegel sowie die Winkel zur Beschreibung der Orientierung des Ablenkspiegels (siehe Abb. 8). Durch Multiplikation der Entfernungsmessung mit der Blickrichtung des Messstrahls und der Perspektivzentrumskorrektur ergeben sich die Koordinaten eines Geländepunkts bezogen auf das Laserscannersystem (siehe Kapitel 3).

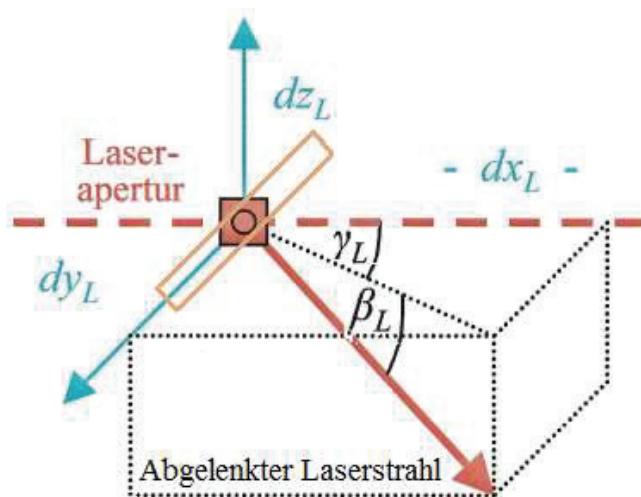


Abbildung 8: Die Strahlrichtung der Laserapertur im Spiegelsystem.

Das optische System zur Orientierung des Laserspiegels besteht prinzipiell aus einer Sendeoptik zur Fokussierung des intensitätsmodulierten Laserstrahls, einem rotierenden Oberflächenspiegel zur Ablenkung des Lasermessstrahls in Richtung Geländeoberfläche und wieder zurück, sowie aus einer Empfangsoptik zur Fokussierung der reflektierten Strahlung. Für jede diskrete Lasermessung existiert eine exakt definierte Messrichtung, welche multipliziert mit der Schrägentfernung und einer Zentrumskorrektur die orthogonalen Koordinaten eines Geländepunkts im Spiegelsystem ergibt.

Aufgrund der unsymmetrischen Abmessungen des Laserscanners und dem zur Verfügung stehenden Platzangebot im Trägerflugzeug sollte der Laserscanner quer zur Flugrichtung eingebaut werden.

Der Flugzeugeinbau muss die spezifischen Einbauvarianten des Laserscanners im Trägerflugzeug berücksichtigen. Je nach Platzangebot und Aufgabenstellung kann der

Laserscanner mit unterschiedlicher Ausrichtung gegenüber der Flugrichtung eingebaut werden. Diese Sachverhalte müssen bei der Datenprozessierung unbedingt beachtet werden.

3.2. Äußere Orientierung des Laserscanner Systems

Die Parameter der äußeren Orientierung des Laserscanner Systems setzen sich aus der Position des Spiegelrotationszentrums X^L, Y^L, Z^L und aus den drei Lagewinkeln Roll-, Nick- und Kurswinkel ω, ϕ und κ zusammen (Abbildung 9).

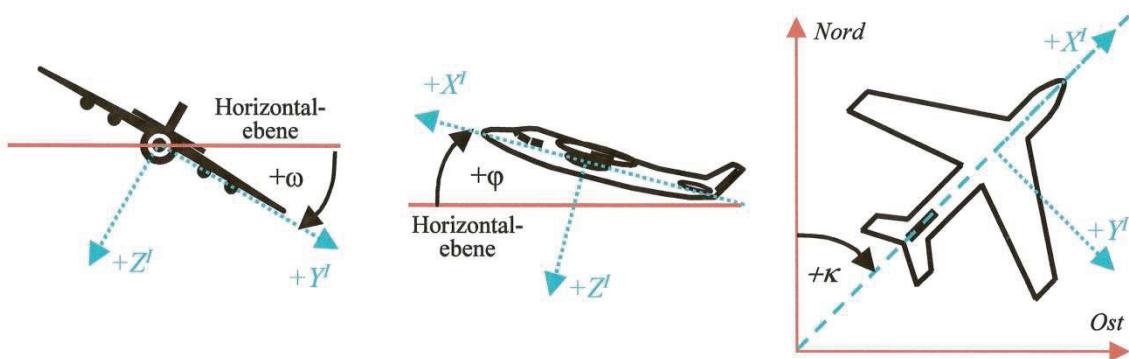


Abbildung 9: Definition des Rollwinkels ω (rechter Flügel nach unten), Definition des Nickwinkels ϕ (Nase nach oben), Definition des Kurswinkels κ . [Schiele, 2005]

Das Inertiale Messsystem (engl. Inertial Measuring Unit, IMU) kann diese drei Winkel nach einer geeigneten Initialisierung in hoher zeitlicher Auflösung messen.

Zusätzlich beinhalten IMUs auch Beschleunigungsmesser in allen drei Achsen, mit denen die Positionsveränderung des Flugzeugs ebenfalls bestimmt werden kann - und dies mit einer viel höheren Frequenz als mittels GPS (Global Positioning System). Allerdings liefern diese Beschleunigungsmesser nur über kurze Zeit stabile und zuverlässige Werte, da sie ein Driftverhalten aufweisen. Sie sind deshalb nur für die kurzfristige Stützung der GPS-Messungen und für die Interpolation zwischen zwei Messwerten zu gebrauchen.

Das IMU System (X^I, Y^I, Z^I) hat seinen Ursprung ebenfalls im Zentrum der Spiegelrotation. Allerdings werden die Fluglageinformationen in Form der Orientierungswinkel (ω, ϕ und κ bezogen auf das IMU System), parallel zu den Achsen des Laserscannersystems ausgerichtet (Abbildung 10).

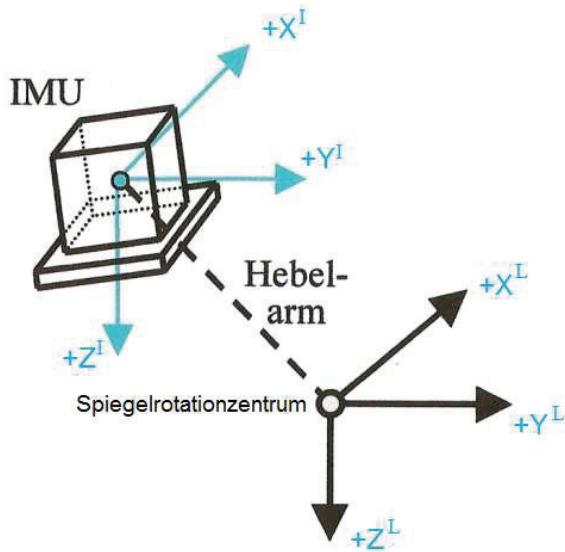


Abbildung 10: Das körperfeste IMU System X^I, Y^I, Z^I und das Laserscannersystem X^L, Y^L, Z^L . [Schiele, 2005]

Weiters sind die Achsen des X^I, Y^I, Z^I Systems typischerweise in etwa gleich wie die Achsen des Laserscanner Systems X^L, Y^L, Z^L ausgerichtet (Abb.10). In etwa gleich bedeutet hier, dass die IMU Trägerplatte am Laserscanner wegen Montage- und Fertigungstoleranzen nicht exakt mit dem Lasersystem X^L, Y^L, Z^L übereinstimmt. Dadurch ergibt sich eine kleine Verdrehung zwischen dem Laser X^L, Y^L, Z^L und dem IMU X^I, Y^I, Z^I System für jede Achsenrichtung. Diese Verdrehung kann nur als Summe beider Komponenten und mit Hilfe von Messdaten des Fernerkundungssensors bestimmt werden. Diese konstanten Verdrehungen werden unter anderem als Einbaufehlern bezeichnet und entsprechend den Orientierungswinkeln mit Einbaukorrekturwinkel bezüglich Roll-, Nick- und Kurswinkel oder $\delta\omega$, $\delta\phi$ und $\delta\kappa$ angegeben. Diese Einbauwinkel sind in der Regel kleine Winkel ($< 5^\circ$), die je nach Fernerkundungssensor und Operationsflughöhe über Grund mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden müssen [Schiele, 2005].

Auf Abbildung 11 kann man sehen, wie der Laserscanner LMS-Q560 von der Firma Riegl an dem IMU System befestigt ist. Man sieht, dass das Koordinatensystem auf das IMU System graviert wird. Dieses Foto sowie andere, die in dieser Master-Thesis zu sehen sind, wurden von der Firma „Diamond Airborne Sensing“ zur Verfügung gestellt.



Abbildung 11: Montage der Laserscanner Riegl LMS-Q560 und des IMU Systems. [Diamond Airborne Sensing, 2008]

Die Genauigkeit jeder Komponente kann durch innere Genauigkeitswerte zur Bestimmung der Messgrößen, die sich auf die Genauigkeit der Bodenpunkte auswirken, verwendet werden. Der Begriff Global Navigation Satellite System (GNSS) umfasst sowohl das US-amerikanische GPS (Global Positioning System), das russische GLONASS als auch das europäische GALILEO. Das Ziel all dieser Systeme ist es, mit Hilfe von Satelliten, die um die Erde kreisen und mit Bodenstationen kommunizieren, eine exakte Positionbestimmung zu erreichen [Wikipedia – Online Enzyklopädie, 2008].

Zur Bestimmung der ersten drei Parameter der äußeren Orientierung des Laserscanner – nämlich der Position in X, Y und Z – kommt die kinematische DGPS-Technik (Differential Global Position System) zum Einsatz.

In der ursprünglichen Konzeption wurde GPS für die statische Positionsbestimmung in geodätischen Kontrollnetzen mit Mehrdeutigkeitsbestimmung und mit der Zielsetzung von cm-Genauigkeit genutzt. Um bei der statischen Anwendung die Mehrdeutigkeiten zu lösen, war je nach Stationsentfernung eine Beobachtungsdauer von einer bis zu mehreren Stunden erforderlich. Im Gegensatz zu der statischen Positionsbestimmung ist die kinematische DGPS Technik ein schnelles und präzises Messverfahren in Echtzeit. Es ist notwendig, dass ein zweiter, auf einem Punkt mit bekannten Koordinaten aufgestellter Empfänger, als Referenzstation dient. Bei der Auswertung werden nicht direkt Positionen, sondern so genannte Basislinien zwischen Referenz und bewegten Empfänger (Rover) berechnet. Der Vorteil differentieller GPS-Messungen ist die Minimierung oder gar Elimination von systematischen Fehlern wie Uhrenoffsets, Ionosphären- oder Troposphäreneinflüssen. Diese

fallen bei der Berechnung der Basislinie zwischen der stationären Referenzstation (auf bekannten Koordinaten) und dem Empfänger aus den Gleichungen heraus, sofern ihr Einfluss bei beiden Stationen gleich groß ist. Insbesondere die Troposphäre (der unterste Teil der Atmosphäre bis ca. 10 - 14 km Höhe, in dem sich der Großteil des atmosphärischen Wasserdampfs befindet) kann aber je nach meteorologischer Lage sehr inhomogen aufgebaut sein und große lokale Variabilität aufweisen [Schiele, 2005].

Die daraus resultierenden Weglängenverzögerungen führen zu verfälschten Pseudodistanzmessungen und somit zu systematischen Fehlern in der berechneten Position. Insbesondere die Höhenkomponente ist von diesen Effekten betroffen.

Typische Werte für DGPS-Standardabweichungen sind bei guten Bedingungen etwa 4 bis 8 cm in der Lage und 6 bis 12 cm in der Höhe [Schiele, 2005].

3.3. Kalibrierung der Laserscanner Systeme

Direkte Georeferenzierung bedeutet die direkte Bestimmung der vollständigen äußereren Orientierung eines ALS-Systems. Die Bestimmung der Parameter für die Position und Lage der Projektionszentren ist bei der direkten Methode von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der Bodenpunkte. Deshalb ist eine Kalibrierung der verschiedenen Sensoren erforderlich.

Wie in den beiden vorhergehenden Abschnitten beschrieben, verfügt man über GPS- und IMU-Messungen zur Positionsbestimmung. Während GPS-Messungen mit Messintervallen von 1 bis 10 Hz, langfristig stabile Positionsdaten liefern, kurzfristig jedoch ein gewisses Messrauschen aufweisen, liefern IMU Daten mit hoher Frequenz (200 Hz) eine relative hohe Genauigkeit, sind jedoch längerfristig mit Driften behaftet. Idealerweise lassen sich diese Informationen nun kombinieren und zu einer verbesserten Schätzung des Flugweges verarbeiten [Würländer, Wenger-Oehn, 2007].

Der meist gewählte Ansatz für diese Aufgabe ist die Methode der Kalman-Filterung. Dabei wird der Zustand eines Systems (in diesem Fall etwa Position und Orientierung der Sensorplattform sowie die Genauigkeit ihrer Bestimmung) mithilfe eines dynamischen Modells vorausberechnet. Dieser Wert wird mit den tatsächlichen Messwerten verglichen. Die Differenz wird anhand der Genauigkeiten der beiden Werte gewichtet und so - im Sinn der Methode der kleinsten Quadrate- eine beste Schätzung der Zustandsgrößen berechnet.

Der Vorteil eines solchen Verfahrens besteht darin, dass Daten mit unterschiedlicher Messfrequenz und Genauigkeit miteinander kombiniert und für jeden Zeitpunkt (hier also

insbesondere für den Zeitpunkt der Abgabe des Laserpulses), jede Position und Orientierung berechnet werden können [Landtwing, 2005].

Da sich die drei Systemkomponenten an unterschiedlichen Positionen befinden (die GPS-Antenne muss z.B. nach oben freie Sicht haben, der Laserstrahl nach unten), ist auch die Lagerung der Einzelkomponenten zueinander (Exzentrizität, Orientierung) und ihre zeitliche Synchronisation von Bedeutung und sollte möglichst exakt bekannt sein. Die entsprechenden Daten werden durch direkte Messung am Fluggerät (für die Lage) und im Rahmen von Kalibrierflügen ermittelt. Bei diesen wird ein Testfeld mit bekannten Objektgeometrien mehrmals in verschiedenen Höhen und Richtungen überflogen und anschließend aus den Diskrepanzen zwischen den Laserstreifen der Kalibrierparameter bestimmt [Cramer, 2000].

Bereits geringe Abweichungen bei der Bestimmung dieser Parameter führen zu systematischen Fehlern der Koordinaten der ALS-Punktwolke am Boden.

Leistungsstarke ALS-Systeme mit hohen Reichweiten benötigen eine besondere Sorgfalt bei der Kalibrierung. Eine zusätzliche Unsicherheit entsteht dadurch, dass die über dem Testfeld ermittelten Kalibrierparameter nicht immer exakt auf das Befliegungsgebiet übertragbar sind, da die ALS-Systeme wegen innerer und äußerer Einflüsse nicht stabil sind [Landtwing, 2005].

3.4. Fein-Georeferenzierung von ALS-Flugstreifen

Die Verbesserung der GPS-Positionierung und IMU-Orientierung bekommt man durch Beobachtung der Lage- und Höhendiffidenzen der überlappenden Laserstreifen. Es wurden erkennbare Bodenobjekte in der Laserscannerpunktwolke verwendet um die Streifenblockausgleichung durchzuführen [Kager und Kraus, 2001].

Bei der Georeferenzierung von streifenweise vorliegenden Daten unterscheidet man die relative (= Übereinstimmung zwischen den Flugstreifen) und absolute Anpassung (= Übereinstimmung mit der Passinformation). Eine ALS-Befliegung erfordert zur Sicherstellung der Gebietsabdeckung eine Überlappung zwischen den Flugstreifen. Diese liegt in der Regel zwischen 10 und 30 %. Es können auch über 50 % sein, wenn eine große Punktdichte gefordert ist. In diesen Überlappungszonen lässt sich über die Höhendifferenzen an identischen Objekten die relative Genauigkeit beurteilen und entsprechend über die Differenzen zwischen Einpassobjekten die absolute Genauigkeit bestimmen.

Eine Verbesserung der Georeferenzierung kann über die Minimierung dieser Differenzen im Rahmen eines statistischen Schätzverfahrens erzielt werden.

Hierzu wurden bereits verschiedene Ansätze vorgestellt, die entweder auf einer ausschließlichen Korrektur der Punktfolge einzelner Streifen oder auf der mathematischen Beziehung der Flugpfad- und Polarkoordinatenbestimmung basieren. Diese Verfahren sind von [Burman, 2002] und [Filin, 2003] beschrieben worden.

Um die oben genannten Streifendifferenzen zu beseitigen, kann eine Georeferenzierung durch simultane Streifenblockausgleichung durchgeführt werden. Dieser Ansatz ist annähernd mit dem bekannten Verfahren der Bündelblockausgleichung mit Luftbildern vergleichbar. Anstelle der homologen Bildpunkte werden hier jedoch Punktmengen mit Ebenencharakter, so genannte Patches verwendet, da homologe Punkte in einem Laserdatensatz praktisch nicht auftreten. Ebenen lassen sich hingegen leichter auffinden, insbesondere wenn sie eine signifikante Neigung aufzeigen [Kager und Kraus, 2001].

Ein Patch ist eine Menge benachbarter Laserpunkte (siehe Abb. 12), die mit einer bestimmten Genauigkeit eine Ebene beschreiben. Aus den Laserpunkten, die um einen so genannten Saatpunkt - einem beliebigen Ausgangspunkt - liegen, wird eine ausgleichende Ebene berechnet. Erfüllt diese die vorgegebenen Qualitätskriterien (z.B. $\sigma \leq 5 \text{ cm}$), so wird sie als Patch angenommen, anderenfalls verworfen [Kager, 2004].

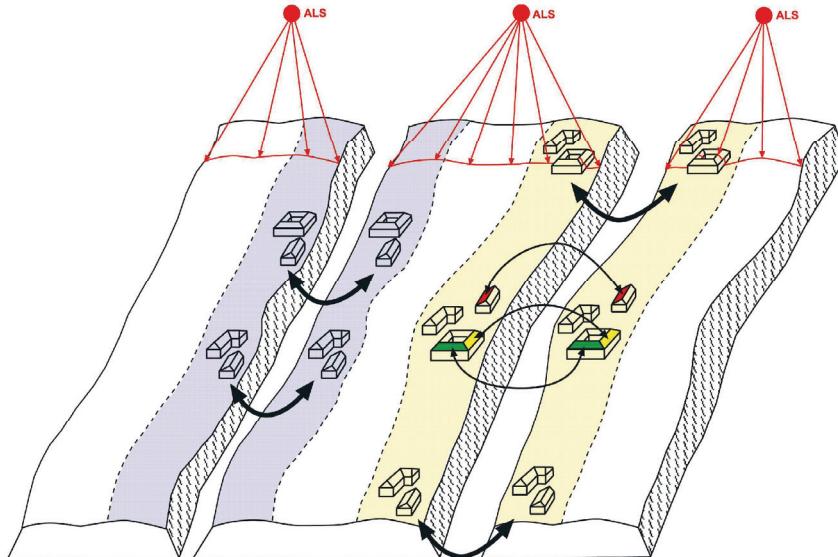


Abbildung 12: Prinzip der Streifenblockausgleichung. [Kager, 2004]

Bei den Patches kann zwischen Pass- und Verknüpfungspatches unterschieden werden. Ein Passpatch ist ein zu einem Passelement korrespondierender Patch, während Verknüpfungspatches homologe, ebene Gebiete im Überlappungsbereich zweier Streifen sind, die zu deren relativer Orientierung dienen. Als Passelemente dienen vorzugsweise Ebenen, wie z.B. Dachflächen in unterschiedlichen Expositionen, die durch jeweils mindestens drei

Punkte beschrieben werden. Auch einzelne Passpunkte sind möglich, die in einer Ebene liegen und diese stützen können. Die Stellung der Ebene wird dann ausschließlich durch die Laserpunkte bestimmt [Kager, 2004].

Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien (I.P.F.) wurde mit ORIENT-LIDAR eine strenge Lösung für die simultane absolute und relative Georeferenzierung von ALS-Flugstreifen entwickelt [Kager, 2004]. Diese enthält dieselbe Vorgehensweise wie eine Kalibrierung, d.h. es werden die Parameter der drei Systemkomponenten GPS, IMU und Scanner im Rahmen des statistischen Schätzverfahrens auf so eine Weise adaptiert, dass die Restfehler an korrespondierenden Objekten in allen Streifen minimiert werden. Diese korrespondierenden Objekte sind idealerweise glatte, geneigte und unterschiedlich orientierte Flächen.

In der Abbildung 13 ist die Auswirkung von Streifendifferenzen anhand eines Gebäudes visualisiert. Durch Anpassung von 3 verschiedenen Streifen wird versucht die Dachfläche zu ermitteln.

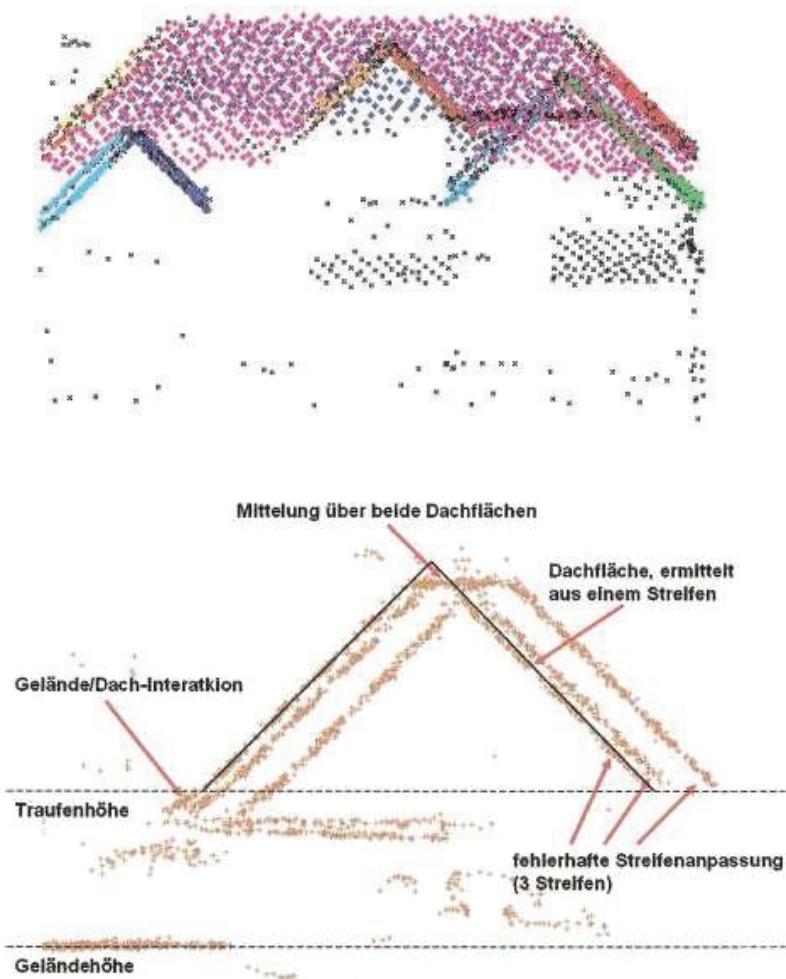


Abbildung 13: Streifendifferenzen anhand des Beispiels von Dachflächen. [Dorninger, 2008]

3.5. Genauigkeitsbetrachtungen zum ALS

Die Genauigkeit von Flugzeuglaserscannersystemen wird beeinflusst durch: die Datenrate, Fallgeschwindigkeit und Flughöhe, Geländeneigung, Breite des Geländestreifens, gewählte Scanbreite, der verwendeten Scanmechanismus und durch die Bestimmung der Plattformorientierung.

Die Gesamtgenauigkeit ist u. a. abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit. Weiters steigt der Fehler mit zunehmender Geländeneigung. Bei relativ ebenem Gelände trägt der Höhenfehler 3 - 4 cm zum Gesamtfehler bei [Maas, 2005]. Werden alle systematischen Fehler, die während der Laserdistanzmessung entstanden sind, eliminiert, kann der Gesamtfehler sogar nur 5 cm erreichen. Eine vergleichbare Höhengenauigkeit erzielt man aus Luftbildern [Maas, 2005].

Die Hauptfehlerquelle liegt in der Höhenbestimmung des Flugzeugs durch DGPS. Diese Fehler wirken sich auf die Lage- und Höhengenauigkeit des Digitalen Geländemodells aus. Die Auswirkung der Orientierungsfehler des Inertialmesssystems tritt in der Flugachse auf, d.h. dass das Koordinatensystem um diese Achse gedreht ist und diese so Auswirkungen auf die Lage- und Höhenkoordinaten des Digitalen Geländemodells hat. Der DGM-Streifen ist gegen das Gelände geneigt. Die auftretenden Differenzen sind im Zentrum des Streifens am geringsten und werden zum Rand immer größer. Wenn die Flughöhe 900 m und der Orientierungsfehler $0,01^\circ$ beträgt, ergibt sich ein Höhenfehler von maximal 8 cm am Rande des Streifens. In Streifenmitte ist der Höhenfehler vergleichsweise klein. Der Lagefehler variiert zwischen 16 cm in Streifenmitte und etwa 60 cm am Streifenrand [Koch, 1999].

Im Fall, dass das Flugzeug um die Z-Achse gedreht ist, tritt ein Lagefehler von wenigen cm auf. Je näher sich die Punkte an der Flugachse befinden, desto geringer ist der Lagefehler. Die drei möglichen Orientierungsfehler haben gemeinsam, dass ein Lagefehler die Ursache eines größeren Fehlers in der Geländehöhe sein kann. Je größer die Geländeneigung, desto stärker wirkt sich dieser aus (siehe Kapitel 3.4.).

Die Genauigkeit von GPS wird durch die Anzahl der empfangenen GPS-Satelliten, ihre Verteilung sowie durch den Abstand der Referenzstation vom Untersuchungsgebiet beeinflusst. Diese Faktoren spielen aber eine untergeordnete Rolle.

Die GPS-Positionsbestimmung beinhaltet viele systematische Fehlereinflüsse. Diese können durch die Satellitenbahn oder die Signalausbreitung (Troposphäre, Ionosphäre) bedingt sein. Die atmosphärischen Fehleranteile werden durch Differenzbildung und Verwendung eines

Zwei-Frequenz-Empfängers verringert. Wichtig ist auch der troposphärische Einfluss, weil er sich während des Fluges schnell ändert [Koch, 1999].

Die Bestimmung des Mehrdeutigkeit kann auch Ursache eines systematischen Fehlers sein. Die Mehrdeutigkeit ist eine für jeden Satelliten einmal zu schätzende Unbekannte, soweit das Satellitensignal während des Fluges kontinuierlich verfolgt werden kann. Ein Verlust der Satellitenverbindung verringert die erreichbare Genauigkeit, da die Mehrdeutigkeit erneut ausgeschlossen werden muss. Dazu wird an einer vorhergesagten und damit fehlerhaften Position angeknüpft, was eine Drifterscheinung in den nachfolgenden Positionsbestimmungen zur Folge hat [Koch, 1999].

Fehler in der Positionsbestimmung bewirken Versetzungen der Bodenpunktkoordinaten. Diese Versetzung ist unabhängig von der Flughöhe. Die Auswirkungen von Fehlern in den Orientierungsparametern steigen linear mit der Flughöhe, weiters nehmen sie von der Streifenmitte zum Streifenrand zu. Die Genauigkeit der Distanzmessung zeigt eine schwache Abhängigkeit von der Entfernung, während sich Fehler in der Winkelbestimmung des Ablenkungsmechanismus des Scanners linear auf die Bodenkoordinaten übertragen. Dadurch ist die Lagegenauigkeit der Bodenpunkte linear von der Flughöhe, die vertikale Genauigkeit dagegen nicht von der Flughöhe abhängig [Koch, 1999].

4. ALS-Produktionsprozess

Der ALS-Produktionsprozess beinhaltet viel mehr als nur die eigentliche Messung. Die Abbildung 14 zeigt eine schematische Darstellung des gesamten Ablaufs. Da die einzelnen Phasen und ihre Zusammenhänge für diese Master-Thesis von Bedeutung sind, werden sie in den nächsten Abschnitten aus praktischer Sicht genauer beschrieben. Jedem Abbildungspunkt wird ein eigenes Kapitel gewidmet.

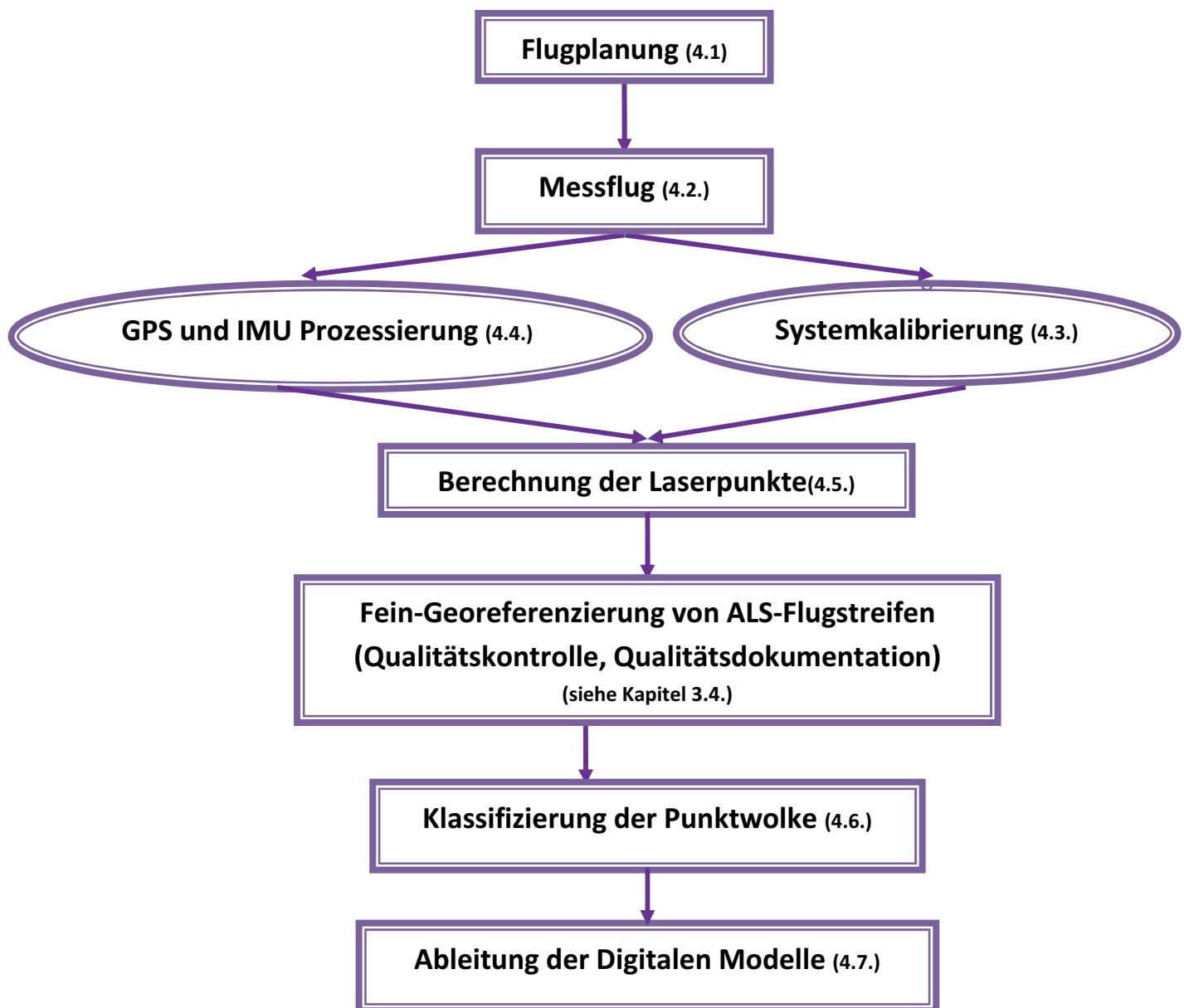


Abbildung 14: Der ALS-Produktionsprozess.

4.1. Flugplanung

Die Anforderungen an ein ALS-Projekt enthalten meist etwa folgende Eckwerte:

- Minimale Punktdichte (Punkte/m²),
- Geforderte Genauigkeit: Häufig ist nur die Höhenkomponente von Bedeutung. Je nach Anwendung kann die absolute oder die relative Genauigkeit wichtiger sein.
- Zu erfassende Objekte (z.B. Gelände, Gebäude, Leitungen).

Aus diesen Anforderungen und ökonomischen Überlegungen müssen bei der Flugplanung folgende Parameter einer Flugmission optimal gewählt werden [Medvedev, 2004]:

- Flughöhe über Grund: beeinflusst die Punktgenauigkeit und die Breite des Streifens, welcher mit einer Fluglinie abgedeckt werden kann.
- Fluggeschwindigkeit: beeinflusst die Punktdichte in Flugrichtung.
- Maximaler Scanwinkel: bestimmt die Breite des abgedeckten Streifens und hat ebenfalls einen Einfluss auf die Punktgenauigkeit, da Punkte mit großem Scanwinkel theoretisch schlechtere Standardabweichungen aufweisen.
- Pulswiederholungsfrequenz: beeinflusst die Dichte der Punkte und die Messgenauigkeit.
- Strahldivergenz: bestimmt die Größe der Fläche, welche ein am Boden auftreffender Laserpuls hat (footprint). Bei niedrigeren Flughöhen wird oft mit einer etwas größeren Strahldivergenz (z.B. 0.8 mrad) gearbeitet, um eine lückenlose Abdeckung zu erreichen. Bei höheren Flughöhen und zur Detektion kleiner Objekte (z.B. Kabel) wird oft eine kleinere gewählt (z.B. 0.3 mrad).
- Querüberlappung der Streifen: ein Minimum ist nötig, um Datenlücken zu vermeiden. Größere Überlappungen führen zu mehr Punkten und einer größeren Redundanz, erfordern aber mehr Fluglinien.

4.2. Messflug

Die Messflugdaten setzen sich aus Flugstreifen und Kontrollflächen zusammen. Die Zahl der Streifen hängt von der Größe und der Form des Untersuchungsgebietes ab. Jeder Datenstreifen muss durch mindestens einen Kreuzstreifen abgedeckt werden, d.h. für einen regelmäßigen Block mit allen Flugstreifen ist ein Kreuzstreifen und eine Kontrollfläche genügend, während im Falle der schwierigeren Blockformen mehr streifen erforderlich sein können.

Um Redundanz und Zuverlässigkeit der Initialisierung der GPS und IMU zu erhöhen wird empfohlen, die Kontrollflächen mit den Kreuzstreifen abzudecken. Die Anzahl der Kreuzstreifen verringert die Störungen, die durch GPS verursacht werden können und die während der langen Streifen noch auftreten könnten.

Wenn das Untersuchungsgebiet durch eine Reihe von unterschiedlich langen Streifen in verschiedenen Richtungen überlappt werden soll, wäre es sinnvoll, zusätzliche Kontrollfläche hinzufügen. Als Kontrollfläche wird oft eine flache Fläche gewählt, die eine möglichst horizontale Ebene darstellt z.B. ein Fußballplatz. Dadurch sind die vertikalen Einflüsse beseitigt und die Störungen bei der Bestimmung des Laserpunktes vermieden.

Die Mission wird gemäß bestimmter Spezifikationen aus der Flugplanung geflogen: Flughöhe, Fluggeschwindigkeit, Messrate, etc. Zu Beginn müssen die Geräte - insbesondere der GPS-Empfänger und die IMU - initialisiert werden. Erst wenn eine Position berechnet und die IMU orientiert ist, stehen Daten für die direkte Georeferenzierung zur Verfügung.

Während des Fluges werden folgende Daten erfasst [Sithole und Vosselmann, 2003]:

- GPS-Positionen (1 bis 10 Hz),
- IMU-Daten (Beschleunigungen und Winkeländerungen, z.B. 200 Hz),
- Laserscannerdaten (pro Punkt die momentane Auslenkung des Spiegels und die gemessene Range, heute 30 bis ca. 200 kHz),
- Präzise Zeitstempel all dieser Messungen, damit sie nachher korrekt miteinander verknüpft werden können,
- Gegebenfalls meteorologische Daten, damit an GPS- oder Rangemessungen entsprechende Korrekturen angebracht werden können.

Die Datenmenge, welche bei einem solchen Messflug anfällt, ist enorm und wesentlich von der Scanfrequenz beeinflusst.

Das CCNS (Computer Controlled Navigation System) ist ein Flugmanagementsystem entwickelt zur Kontrolle, Steuerung und Navigation der Befliegung. Der Einsatz des CCNS ermöglicht dem Navigator die Kursangaben für den Piloten zu ermitteln und die korrekten Aufnahmesequenzen einzustellen. Die Experten der Hansa Luftbild entwickelten zusätzlich ein Videosystem mit Digitalkamera und Flachbildschirm, mit dessen Hilfe der Sensoroperator den Aufnahmerraum der Laserscanner beobachten und bewerten kann. Dieses System stellt eine komplette Lösung für Flugnavigation, Flugdokumentation und für das Sensormanagement während der Befliegung zur Verfügung [Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH, 2008].

4.3. Systemkalibrierung

Um ein entsprechend genaues Ergebnis zu erzielen, muss das Messsystem vor und nach dem Flug kalibriert werden. Benötigt werden drei individuelle Kalibrierungen der einzelnen Messinstrumente GPS, INS und Lasersensor, sowie die gegenseitige Kalibrierung der Instrumente im Gesamtsystem (siehe Kapitel 3.3.). Die Systemkalibrierung kann direkt oder indirekt durchgeführt werden. Die direkte Methode erfolgt durch direkte Messung der Kalibrierparameter, bei der indirekten Methode werden die Parameter durch eine Ausgleichung über unabhängige Kontrollmessungen geschätzt [Hug 1996].

Die Kalibrierung der Systemkomponenten ist von großer Bedeutung für die Genauigkeit des Gesamtsystems, d.h. für die Erstellung des DOM bzw. DGM. Durch Selbstkalibrierung aus Flug- und Labordaten werden im Allgemeinen acht Komponenten zur Korrektur konstanter systematischer Fehler bestimmt. Dies sind zwei Parameter für den Einbauwinkel des Lasersensors, drei Translationsparameter zur Korrektur konstanter Fehler der GPS-Positionsbestimmung sowie drei Rotationsparameter zur Korrektur systematischer Fehler der IMU-Neigungsmessung. Hier sollte die Überlegung gemacht werden, ob eine Korrektur der durch die IMU verursachten Fehler für das Gesamtgebiet Sinn macht oder ob dieses flugstreifenweise durchgeführt werden sollte. Denn die einzelnen Flugstreifen können durchaus unterschiedliche systematische Fehler aufweisen. Die von GPS und IMU hervorgerufenen Fehler sind durch äußere Informationen zu bestimmen, über welche die Lasermessungen dem Gelände bzw. dem äußeren Koordinatensystem zugeordnet werden können. Das heißt, die endgültige Genauigkeit der Höhendaten hängt auch von der Genauigkeit der verwendeten Referenzdaten ab [Landtwing, 2005].

4.4. GPS und IMU Prozessierung

Zusätzlich zu den Daten vom GPS-Empfänger an Bord des Messflugzeugs dem Rover, werden für die differenzierte Auswertung die Daten der Referenzstation benötigt. Häufig wird die kinematische Basislinienprozessierung vorwärts (vom Beginn zum Ende der Mission) und rückwärts (vom Ende zum Start) durchgeführt. Damit fallen zwei Lösungen für den Verlauf der Trajektorie an. Diese sind zwar nicht unabhängig, da sie von den gleichen Daten berechnet wurden, bieten aber trotzdem eine Möglichkeit, deren Qualität zu beurteilen. Aufgrund der Differenz zwischen den Trajektorien kann abgeschätzt werden, wie gut und übereinstimmend die Phasenmehrdeutigkeiten gelöst werden konnten. Der Mittelwert der

Gewichte der Vorwärts- und der Rückwärtslösung wird anschließend ermittelt und so der "beste" Verlauf der GPS-Trajektorie berechnet [Ries, 2004].

Mit Hilfe des CCNS (siehe Kapitel 4.2.) werden die GPS-Daten mit den IMU-Daten verwaltet und dadurch eine beste Schätzung der Trajektorie berechnet.

4.5. Berechnung der Laserpunkte

Die resultierende Punktfolge sollte zuerst auf ihre Qualität hinsichtlich Punktdichte und innerer Genauigkeit überprüft werden. Es wird die Qualitätskontrolle und die Qualitätsdokumentation durchgeführt.

Schließlich werden zusammen mit den Scanwinkel- und Entfernungsmessungen die 3D-Koordinaten der Laserpunkte berechnet. Aufgrund der riesigen Datenmengen ist dies ein sehr rechenintensiver Vorgang. Um mit den Punkten vernünftig weiterarbeiten und sie mit anderen Daten kombinieren zu können, ist zudem eine Projektion in ein lokales (Landes-) Koordinatensystem notwendig.

Weiters wird die Fein-Georeferenzierung durchgeführt (siehe Kapitel 3.4.). Die Überlappungszonen der Streifen zeigen, wie gut die einzelnen Streifen aufeinander passen und ob allenfalls systematische Fehler (am häufigsten in Pitch, Roll oder Scale – siehe Kapitel 3.2.) vorhanden sind. Geeignete Objekte für solche Analysen sind geneigte Ebenen z.B. Giebeldächer, quer zur Flugrichtung und horizontal ebene Flächen wie z.B. Fußball- oder Parkplätze [Vosselmann und Mass, 2001].

Wenn die Daten die Anforderungen der Qualitätskontrolle erfüllen, können digitale Modelle abgeleitet werden.

4.6. Klassifizierung der Punktfolge

Der nächste Schritt besteht üblicherweise darin, die Punkte in Klassen zu unterteilen, welche die Art des Objekts widerspiegeln, von welchem der entsprechende Puls reflektiert wurde. Reflektionen erfolgen an Oberflächen, die sich dem jeweiligen Laserstrahl „in den Weg stellen“. Das können folgende sein [Briese et al., 2001]:

- Blätter oder Äste der Bäume,
- Kamine und Antennen auf den Hausdächern, die Masten der Straßenbeleuchtungen,
- Dächer der Fahrzeuge,
- die Oberfläche der Grasdecke,
aber auch

- Ackeroberflächen,
- Gelände bei nicht zu dichter Vegetation,
- von Fahrzeugen freie Straßenoberflächen.

So sind etwa typische Klassen:

- Boden,
- Vegetation (unterteilt in niedrige wie Maisfelder und hohe wie Bäume),
- Gebäude und Brücken,
- Masten und Kabel,
- Fehlerhafte Punkte.

Aufgrund der großen Punktmenge geschieht dies meist halbautomatisch. Es existieren viele Verfahren und Algorithmen, um einen möglichst hohen Automatisierungsgrad zu gewährleisten (siehe Kapitel 5.2.). Die Berechnung und Klassifizierung einer Punktfolge kann z. B. mit dem am I.P.F. (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) entwickelten Softwarepaket SCOP++ erfolgen (siehe Kapitel 5.4.). Dieses erlaubt mit einer Vielzahl von Parametern die Anpassung der Filterstrategie an unterschiedliche Geländetypen.

4.7. Ableiten der Produkte

Aus der klassifizierten Punktfolge können nun die eigentlichen Produkte abgeleitet werden. Auch hier kommen am häufigsten automatische oder halbautomatische Verfahren zum Einsatz. ALS-Daten eignen sich als Grundlage für eine breite Palette von Produkten. Dabei überschneidet sich das Anwendungsgebiet stark mit der klassischen Photogrammetrie.

Aufgrund seiner Eigenschaften bietet sich das ALS zunächst als Verfahren für die Generierung von räumlich hochauflösenden DOM an. Frühe Anwendungen hatten beispielsweise die Überwachung von Stränden mit dem Ziel der Erfassung von Erosions- und Anlandungsprozessen als Ziel. Im Vergleich zum konkurrierenden Verfahren der automatischen Auswertung stereoskopischer Luftbilder durch Bildzuordnungsverfahren bietet ALS als aktives Messverfahren hier den Vorteil der Unabhängigkeit von jeglicher Oberflächentextur [Maas, 2005]. Weitere frühe Anwendungen dienten der Aufnahme potentieller Überschwemmungsgebiete mit dem Ziel der Akquisition genauer Höheninformation als Basis für Simulationsrechnungen und als Grundlage für Planungsmaßnahmen. Durch das ALS generierte Geländemodelle werden beispielsweise auch von Versicherungsgesellschaften für Risikoanalysen mit dem Ziel einer räumlich detaillierten Überschwemmungsvorhersage verwendet [Murtagh und Foote, 1999].

Das DGM kann als Geodatenbasisinfrastruktur dienen. Die wichtigsten Anwendungen für die Daten sind Risikoanalyse und Überschwemmungsvorhersage, Drainage und Grundwasserspiegelplanung sowie Infrastrukturplanung. Darüber hinaus sind die Daten aber auch für Anwendungen wie Sichtbarkeitsanalysen, Telekommunikationsnetzplanung, Schallausbreitung und die Analyse der Ventilation von Stadtgebieten von Interesse.

Auch für die Generierung automatischer 3D-Gebäudemodelle besteht große Nachfrage. Darüber hinaus sind beispielsweise Versicherungen und Finanzbehörden an einer Volumenbestimmung von Gebäuden als Grundlage für Versicherungstarife oder die Besteuerung von Gebäuden interessiert.

Doch dank der vorteilhaften Eigenschaften von ALS, mehrere Echos aufzuzeichnen (z.B. in Waldgebieten) und auch kleine Objekte (z.B. Freileitungen) erfassen zu können, eröffnen sich neue Möglichkeiten.

Heute wird die ALS-Technologie hauptsächlich zur Herstellung folgender Produkte verwendet:

- Gelände- und Oberflächenmodelle,
- Vektorisierte Gebäude modelle (3D Stadtmodelle),
- Dreidimensionale Landschaftsvisualisierungen (Hydrologie),
- Aufnahme von Hochspannungsleitungen, Berechnen von Mindestabständen gefährlicher Objekte,
- Wald- und Küstenkartierung.

Im Anhang II ist eine genauere Aufstellung der mit der ALS-Technologie hergestellten Produkte zu finden.

4.8. Die Genauigkeitsanalyse von ALS-Daten

Die Qualität von Laserscanneraufnahmen und abgeleiteter Produkte wird nach [Braumann, 2006] von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Zufällige und systematische Fehler sind durch die einzelnen Systemkomponenten (Laserdistanzmesser, GPS, IMU) verursacht bzw. deren Kalibrierung. Bei der Ausgleichung der Streifen und Fehlermodellierung können diese behoben werden,
- Die Parameter, die einen Zusammenhang mit Systemparametern (Flughöhe, max. Scanwinkel) haben, sollten an das jeweilige Geländeprojekt angepasst und optimiert werden. Bei einem großen Scanwinkel ist die Menge abgeschatteter Gebiete stark

erhöht, d.h. die Anzahl der am Boden auftreffenden Laserpunkte stark verringert, es kommt schneller zu Datenlücken im DTM. Praktische Tests zeigten auch, dass Laserscannerdaten oft zu tief liegende Punkte (unterhalb der realen Geländeoberfläche) beinhalten, die vor der endgültigen DTM-Berechnung herausgefiltert werden sollten,

- Fehler die durch die Art der Bodenbedeckung der aufgenommenen Oberfläche (Gras, Schotter, Asphalt, Wald), durch die Bewuchsdichte, den Geländetyp oder die Geländeneigung entstehen (bei steilerem Gelände können Höhenfehler als Folge nicht kompensierter Lagefehler entstehen),
- Fehler, die während der Bearbeitung der Laserpunkte entstehen: Interpolationsfehler, Filterfehler, Datenglättung, etc. Sie sind abhängig vom verwendeten Algorithmus.

Die Genauigkeitsanalyse von Laserscannerdaten wird über die berechneten Koordinaten der Laserpunkte im Landeskoordinatensystem durchgeführt. Die absolute Höhengenauigkeit der Laserpunkte wird dabei meist als das wichtigste Kriterium für die Genauigkeit betrachtet. Praktische Angaben zur Koordinatengenauigkeit von Laserscannerpunkten können basieren auf: der Entführung von Passpunkten und der Bestimmung der Diskrepanzen von Verknüpfungspunkten im Überlappungsbereich benachbarter oder sich kreuzender Streifen [Kager, 2003].

Die Qualität generierter Geländemodelle kann durch die Vollständigkeit und Zuverlässigkeit der Detektion der ALS-Daten beschrieben werden. Die Positionsgenauigkeit bzw. geometrische Genauigkeit der Rekonstruktion ergibt sich im Wesentlichen aus der Lagegenauigkeit der ALS-Daten. Diese hängt stark von der Punktdichte ab. Eine bessere DTM-Genauigkeit wird im offenen Gelände erreicht [Braumann, 2006].

2001 fand in Wien-Erdberg ein Projekt zur Bestimmung von Genauigkeiten statt. Mit diesem Projekt wurde der Beweis erbracht, dass aus ALS-Daten auch in verhältnismäßig eng bebauten Gebieten sehr genaue DGMe abgeleitet werden können. Man kam zu folgenden Höhengenauigkeiten (Standardabweichungen) [Briese et al., 2001]:

- Gesamtgebiet $\pm 7,1$ cm.
- Im Park mit dichtem Baumbestand $\pm 11,1$ cm.
- Im Park mit lückenhaftem Baumbestand $\pm 7,8$ cm.
- Im Park im offenen Gelände $\pm 4,5$ cm.
- Auf den Straßen mit parkenden Autos $\pm 3,7$ cm .
- Im Straßenbereich ohne Autos $\pm 1,0$ cm.

Die genannte Genauigkeit des DGMs erfordert einen weiteren Arbeitsschritt, da der Laser bei einer Einzelmessung nur eine Genauigkeit von etwa ± 5 cm erreicht. Infolge der hohen Punktdichte auf einer gut definierten und wenig gekrümmten Straßenoberfläche liefert die Interpolation und Filterung nach kleinsten Quadraten aber - wie aus theoretischen Überlegungen bekannt [Kraus 2000] - ein Oberflächenmodell, das deutlich genauer als die Einzelmessung ist.

Die Qualität des Geländemodells nimmt in bewaldeten Gebieten mit zunehmender Dichte der Vegetation ab. Durch die geringere Anzahl der Punkte, die am Boden gemessen werden, wird auch die Beschreibung der Geländefläche unzuverlässiger.

Deshalb sind Daten, die während der laubfreien Jahreszeit aufgenommen werden, besser für die DTM-Generierung geeignet. Mehrere Laserstrahlen werden von der Erdoberfläche reflektiert und dadurch die Oberfläche besser erfasst.

5. Ableitung von Oberflächen- und der Geländemodellen aus ALS-Daten

In den folgenden Kapiteln werden Begriffsdefinitionen unterschiedlich abgeleiteter Modelle besprochen und Methoden zur Klassifizierung von automatisch gemessenen Punktwolken in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte dargestellt [Pfeifer, 2003]. Weiters wird auf die Generierung von Digitalen Geländemodellen und Oberflächenmodellen aus ALS-Daten eingegangen.

Zum besseren Verständnis werden kurz die wichtigsten I.P.F. Programme vorgestellt, die zur Interpolation, zum Management und zur Visualisierung von digitalen Modellen dienen.

5.1. Begriffsdefinition

Aus den gemessenen Rohdaten werden nach mehreren Verarbeitungsschritten verschiedene Modelle, die die Topografie beschreiben, abgeleitet. Zum Teil sind diese Modelle nur ein Zwischenprodukt auf dem Weg zu weiteren Anwendungen, wie z. B. der Gebäudedetektion. Dieses Kapitel soll einen Überblick über die gebräuchlichsten Begriffe geben. Einen interessanten Einblick in diese Thematik gibt [Pfeifer, 2003] - alle Definitionen sind auf Basis dieser Literatur zusammengefasst.

- DOM/ DSM (digitales Oberflächenmodell / digital surface model):

Dies ist die Fläche, die sich aus den vom Laserscanner registrierten Punkten mit der maximalen Höhe berechnet. Sie beschreibt die Erdoberfläche einschließlich Vegetation, Gebäuden und sonstigen Objekten. Im offenen Gelände ist das DOM gleich dem DGM (siehe unten), im Falle einer Bebauung mit Häusern verläuft die Fläche entlang der Dachflächen und bei Bäumen entlang der Baumkronen (siehe Abbildung 15).

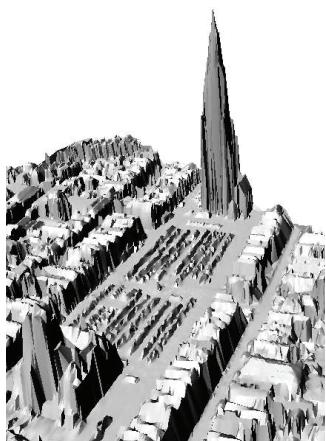


Abbildung 15: DOM in Form einer Triangulierung (Delf). [Pfeifer, 2003]

- DHM/ DEM (digitales Höhenmodell /digital elevation model):

Das DHM ist die Menge der Höhenwerte regelmäßig oder unregelmäßig verteilter Geländepunkte (Stützpunkte), die die Höhenstruktur des Geländes als eine Funktion der Lage repräsentieren. Das Höhenmodell enthält keine Vegetation, Gebäude, etc.

Die Datenstruktur kann in Form eines regelmäßigen quadratischen Rasters (Gitterhöhenmodell) oder in Form eines TIN (triangulated irregular network - Dreiecksvermaschung) gegeben sein. Durch die eindeutige Zuordnung genau eines Höhenwertes zu jedem Punkt der Ebene besteht keine Mehrdeutigkeit in der Höhe, man spricht deshalb von einem 2,5 D-Modell.

- DGM /DTM (digitales Geländemodell /digital terrain model):

Das DGM beschreibt - so wie ein DHM, die Höhe der Erdoberfläche. Allerdings ist der Begriff spezifischer, da explizit festgelegt wird, welche Höhen - nämlich die Geländehöhen - modelliert werden. Ein DGM enthält auch (im Unterschied zum DHM) Geländekanten und Bruchlinien. Dementsprechend sind die verwendeten Datenstrukturen ein hybrides Gitter (Gitter mit zusätzlichen Linien vgl. Abb. 16) und eine Triangulierung. Ein Nachteil der Triangulierung ist, dass zufällige Messfehler direkt ins Geländemodell übernommen werden und durch die Punktanordnung lange, schmale Dreiecke entstehen können, die das Gelände schlecht beschreiben.

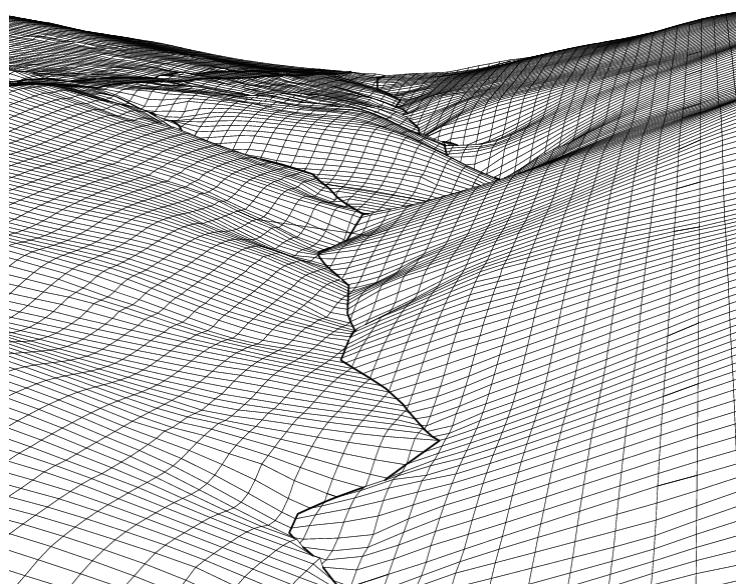


Abbildung 16: Digitales Geländemodell mit Bruchlinie in Form eines hybriden Gitters. [Pfeifer, 2003].

- nDSM (normiertes Oberflächenmodell/ normalised digital surface model):

Das nDSM ist das Differenzmodell zwischen DSM und DTM. Mit diesem Modell wird der Einfluss der Topografie ausgeschaltet. Alle erfassten 3D-Objekte (Häuser, Bäume, z. T. auch Fahrzeuge, etc.) werden mit ihrer lokalen Höhe mit Hilfe einer Referenzfläche dargestellt.

- CHM (Kronenmodell/ canopy height model):

Das Kronenmodell findet Verwendung in forstwirtschaftlichen Aufgabestellungen wie z. B. der Baumhöhenbestimmung. Es entspricht dem nDSM und berechnet sich ebenso wie das nDSM aus der Differenz zwischen DSM und DTM.

5.2. Möglichkeiten zu Filterung von ALS-Daten

Die Erstellung von verschiedenen Modellen, die die Topografie beschreiben, ist eine der wichtigsten Anwendungen des flugzeuggetragenen Laserscannings. Dieses geschieht durch Verwendung von Filter Methoden.

Bei der Filterung der Laserdaten handelt es sich um Methoden, die anhand der Höhenverteilung innerhalb eines gewissen Bereiches die Laserpunkt der Erdoberfläche (Bodenpunkte) oder der Objektoberfläche (Nicht-Bodenpunkte, das sind Punkte auf Gebäuden, Vegetation, Brücken, etc.) zuordnen. Grundlegende Annahme aller Verfahren zur Ableitung eines Geländemodells aus Laserscanneraufnahmen ist der Umstand, dass in den Daten sowohl Punkte auf Objekten als auch Bodenpunkte vorliegen.

Alle Methoden der Filterung sind anhand von [Pfeifer, 2003] zusammengefasst.

Weiterführende Informationen können der reichlich vorhandenen Fachliteratur zu diesem Thema entnommen werden. Einen tieferen Einblick in die Thematik geben: [Vosselman und Sithole, 2003], [Axelsson, 2000], [Kraus und Pfeifer, 1998].

5.2.1. Morphologische Filterung

Morphologische Filter arbeiten mit einem Strukturelement, das die Geländehöhenunterschiede in Abhängigkeit von der Entfernung beschreibt. Je größer die horizontale Entfernung, desto größer kann der Höhenunterschied zwischen den Bodenpunkten sein. Das Strukturelement kann über Annahmen über die Geländeneigung (z.B. max. 30 %) oder mit Hilfe von Testdatensätzen für einen bestimmten Geländetyp bestimmt werden. Für die Filterung wird das Strukturelement vertikal von unterhalb der Punktmenge nach oben verschoben (siehe

Abb. 17). Dazu wird es planimetrisch auf jedem Punkt zentriert und nach oben geschoben, bis es an einen Punkt innerhalb des Umkreises angepasst wird und die Verschiebung gestoppt wird.

Der untersuchte Punkt ist kein Geländepunkt, wenn er nicht das Zentrum, auf den das Strukturelement zentriert wurde, ist. Auf diese Weise wird die gesamte Punktwolke klassifiziert [Sithole und Vosselman, 2003].

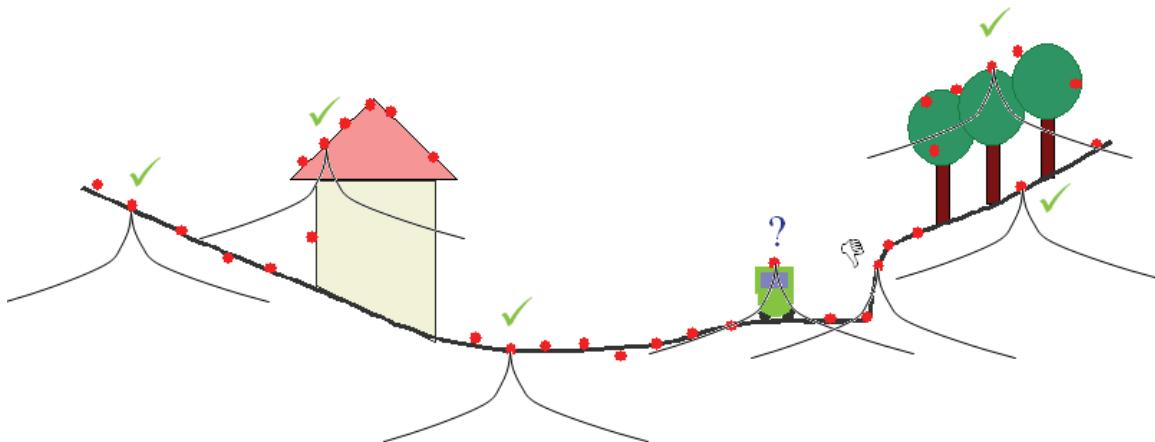


Abbildung 17: Morphologische Filterung - großer Höhenunterschied und geringe Entfernung (höherer Punkt ist kein Bodenpunkt). [Briese, 2008]

5.2.2. Progressive TIN-Verdichtung

In dieser Methode erfolgt als erster Schritt die Bildung eines TIN (Triangulated Irregular Network, Dreiecksvermaschung) auf Basis weniger, sicherer Bodenpunkte. Diese Bodenpunkte erhält man durch Einteilung des gesamten Gebietes in große Bereiche. In jedem dieser Bereiche wird der niedrigste Punkt ausgewählt (siehe Abb. 18). Durch Verbindung dieser Punkte entsteht ein Dreiecksnetz. Innerhalb jedes Dreiecks wird ein weiterer Bodenpunkt gesucht. Dazu werden der Reihe nach die Abstände der Punkte zu den Dreieckspunkten, sowie die Winkel der Verbindungen zu den Eckpunkten ermittelt. Liegen diese Werte unter bestimmten Schwellenpunkten, so wird der Punkt als Bodenpunkt akzeptiert. Auf diese Weise wird das Dreiecksnetz schrittweise verdichtet [Axelsson, 2000].

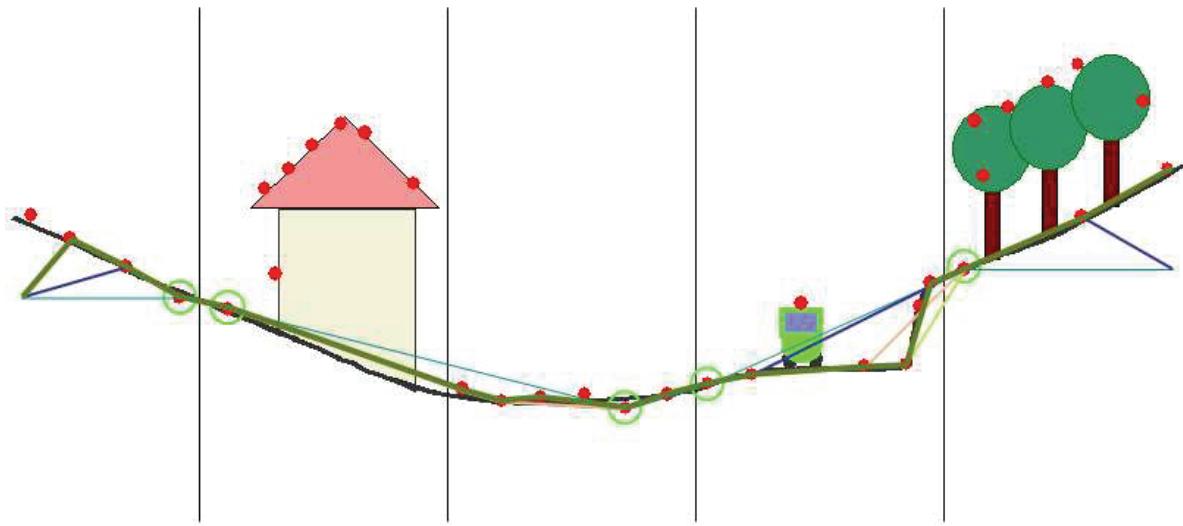


Abbildung 18: Progressive TIN-Verdichtung – Gewichtsfunktion für die Laserpunkte: Punkte über/unter Fläche erhalten kleines/großes Gewicht. [Briese, 2008]

5.2.3. Hierarchische Robuste Interpolation

In dieser Methode wird aus der Punktwolke mittels linearer Prädiktion [Kraus, 2000], eine approximierende Oberfläche berechnet. Dabei wird die Geländehöhe nach Abspaltung eines Trends als stochastischer Prozess angenommen. Der Parameter zur Bestimmung von Interpolationswerten aus den reduzierten Höhen ist die Kovarianzfunktion, die den distanzabhängigen Einfluss der reduzierten Höhen aufeinander wiedergibt. Sie kann empirisch aus dem jeweiligen Datensatz bestimmt werden und besitzt meist die Form einer Glockenkurve. Die Kovarianzfunktion bewirkt, dass sehr nahe Werte einen großen, weiter entfernte Werte einen geringeren Einfluss auf den Interpolationspunkt haben. Bei der Robusten Interpolation wird die ursprüngliche Punktwolke mit der approximierenden Oberfläche verglichen. Punkten, die unterhalb oder im Bereich dieser Fläche liegen, wird ein hohes Gewicht zugewiesen, weil es sich dabei vermutlich um Bodenpunkte handelt. Die sich oberhalb befindenden Punkte stellen meist Objektpunkte dar und werden gering gewichtet. So wird wiederum eine approximierende Oberfläche berechnet, die sich den Bodenpunkten nun besser anpasst. Daraufhin wird die Oberfläche wiederum mit der ursprünglichen Punktwolke verglichen, die Punkte werden neu gewichtet. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis ein akzeptables Ergebnis erzielt wird (siehe Abb. 19).

Eine wichtige Bedingung für die robuste Interpolation ist eine ausreichende Mischung von Boden und Nicht-Bodenpunkten. In dicht bebautem Gebiet, wo viele Punkte auf Hausdächern liegen, ist dies nicht der Fall [Kraus und Pfeifer, 1997].

Eine Erweiterung dieser Methode ist die Hierarchische Robuste Filterung, die in der Software SCOP++ (siehe Kapitel 5.4.) implementiert ist [Briese, Pfeifer, Dorninger, 2002]. Robuste Verfahren sind gegenüber groben Fehlern unempfindlich, was bei der Methode der kleinsten Quadrate nicht gegeben ist. Der hierarchische Ansatz arbeitet mit Datenpyramiden. Die verschiedenen Niveaus der Pyramiden stellen die Daten in verschiedener Auflösung (Generalisierung) dar. Ermöglicht wird damit eine Modellbildung vom Groben ins Feine.

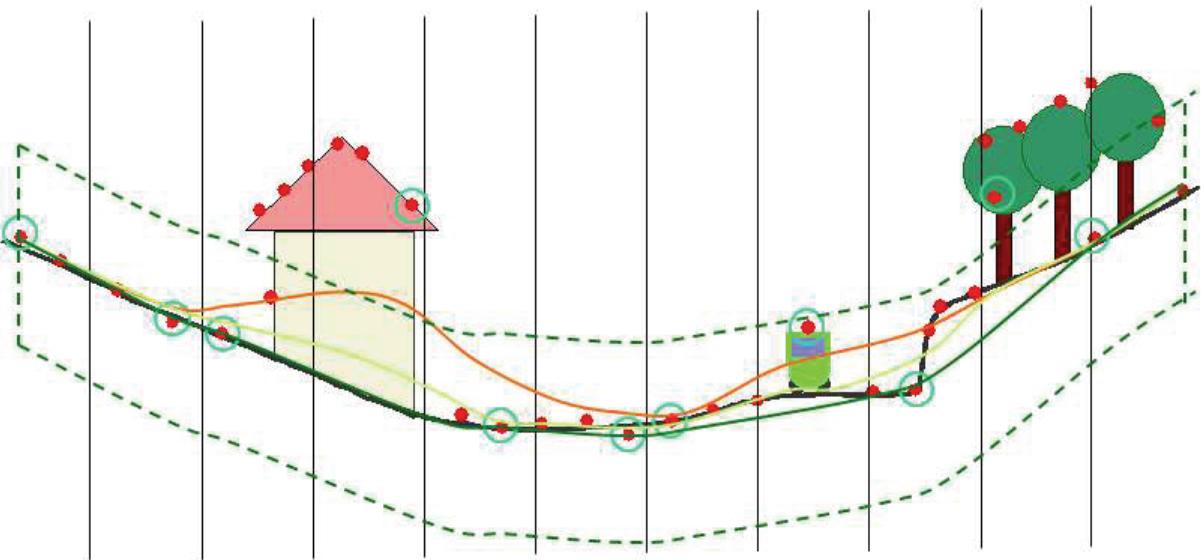


Abbildung 19: Hierarchische Robuste Interpolation - Gewichtsfunktion für die Laserpunkte: Punkte **über/unter** Fläche erhalten **kleines/großes** Gewicht. Vom Groben ins Feine (z.B. 5m → 3m → 1m). [Briese, 2008]

5.2.4. Vergleich der Filtermethoden

Einen ausführlichen Vergleich aller Filtermethoden beschreibt [Pfeifer, 2003]. Hier werden nur die wichtigsten Eigenschaften zusammengefasst.

Die morphologische Filterung und die progressive TIN-Verdichtung sind Methoden, die Annahmen über das Gelände verwenden (in Form des Strukturelements bzw. anhand von Kriterien für die Dreiecksverdichtung). Solche Annahmen sind auch in der Robusten Interpolation enthalten (Kovarianzfunktion), zusätzlich wird hier aber durch die Gewichtsfunktion für die Verbesserungen auch Information über die Verteilung der Nicht-Bodenpunkte eingebracht. Es gibt auch Filtermethoden, die die vertikale Verteilung der Boden- und Hochpunkte berücksichtigen und nur wenig Geländeinformation verwenden. In vielen Methoden kann eine Annahme von horizontalem Gelände gefunden werden. Die TIN-Verdichtungsmethode erfasst den Trend des Geländes viel besser, die robuste Filterung modelliert das Gelände bereits als eine Fläche.

Die Datenlücken nach der Filterung können die Interpolationsprobleme aufweisen, z. B. bei Wasserflächen, großflächigen Industriegebäuden oder dichtem Wald. Die korrekte Filterung von lokalen Höhensprüngen ist schwierig. Es gibt jedoch Verfahren, die geomorphologisch relevante Strukturen im DTM modellieren.

5.3. Erstellung von Oberflächenmodellen und Geländemodellen

Die Berechnung und Klassifizierung der in dieser Arbeit verwendeten Gelände- bzw. Oberflächenmodelle erfolgte mit der im Softwarepaket SCOP++ implementierten Hierarchischen Robusten Interpolation.

Diese erlaubt mit einer Vielzahl von Parametern die Anpassung der Filterstrategie an unterschiedliche Geländetypen. Allerdings würde eine häufige Änderung der Strategie zu einem inhomogenen Eindruck im resultierenden DGM führen. Ein entscheidender Parameter ist die Rasterweite (Fenstergröße): das Fenster muss groß genug sein, um zu gewährleisten, dass immer ein Bodenpunkt in der Nachbarschaft enthalten ist. Ist der Raster zu weit eingestellt, werden Geländeformen wie z. B. Kämme im Hügelland oder Punkte auf Graten im Gebirge systematisch abgeflacht. Bei zu feiner Rasterweite wiederum bleiben größere Gebäude oder auch dichte Vegetation im DGM enthalten.

5.3.1. Digitale Oberflächenmodelle

DOM beschreiben neben der Geometrie des Geländes auch die darauf befindlichen Objekte wie Bäume, Gebäude und sonstiges. Somit entstehen auch Informationen über die lokalen Höhen von Objekten über der Geländeoberfläche. Bei der Berechnung der verschiedenen Oberflächenmodelle spielt der Messmodus eine große Rolle: Je nach verwendetem Modus (erste Echo, letzte Echo) erhält man eine Fläche, die entweder den Baumkronen oder dem Boden näher ist. Speziell für die Datenerfassung in Bereichen mit Vegetation kann zusätzliche Information in Form des ersten und letzten gemessenen Echo genutzt werden. Im „erste Echo“ Datenmodus sind Bäume und Büsche enthalten, im „letzte Echo“ Modus kommen sie fast nicht mehr vor, wenn die Befliegung in laubfreier Zeit stattfindet.

Für ein einfaches Oberflächen- oder Baumkronenmodell zur Darstellung der Kronenoberfläche werden die Daten im „erste Echo“ - Modus herangezogen. Für Modelle im Stadtgebiet lassen sich z. B. mittels Triangulierung oder Flächeninterpolation der „erstes Echo“ Originaldaten einfache Dachflächenmodelle beschreiben. Das Haus wird als Objekt behandelt, die Dachfläche wird nicht detailliert analysiert. Je nach Punktdichte werden einzeln

stehende Objekte (z.B. Bäume, Büsche, Autos, Straßenlaternen) von einem oder mehreren Punkten erfasst, bei geringer Dichte ist das nicht der Fall.

Abhängig von der Punktdichte lassen sich detailliertere Modelle ableiten, wie z. B. Einzelbaum- oder Stadtmodelle, bei denen die Dächer aus einzelnen ebenen Flächen zusammengesetzt werden. Welche Flächen die Oberflächenmodelle repräsentieren sollen, hängt vom Messmodus, Zeitpunkt der Befliegung, Vegetationszustand und der Laubdichte ab [Pfeifer, 2003], [Braumann, 2006].

5.3.2. Digitale Geländemodelle

ALS war ursprünglich ein neues Verfahren zur Generierung räumlich hochauflösender DOM und DGM. Es bot die einzigartige Möglichkeit der Erstellung von DTM in bewaldeten Gebieten. Als Durchdringungsrate wird in Waldgebieten und Vegetationsbeständen das Verhältnis zwischen der Punktzahl auf dem Boden und der Gesamtzahl der gemessenen Punkte bezeichnet. Sie ist abhängig von der Flughöhe, dem Vegetationstyp etc. Die gemessene 3D-Punktfolge enthält erst alle Punkte, die auf und über der aufgenommenen Oberfläche liegen. Für die DTM-Erzeugung sind nur die Bodenpunkte relevant, die auf den Objekten liegenden Punkte (Nicht-Bodenpunkte) müssen über einen Filterprozess von den Bodenpunkten getrennt werden (siehe Kapitel 5.2.) [Braumann, 2006].

5.4. Software für die ALS-Datenbearbeitung und dazu verwendete Datenformate

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Dateiformate und Programme beschrieben. Bei der Berechnung der DGM oder der DOM bilden SCOP++ und GVE die Basis der Softwareumgebung. Diese Programme wurden vom I.P.F. der TU Wien und der INPHO GmbH in Stuttgart entwickelt.

Die zur DGM Berechnung zum Einsatz kommende Software ist SCOP++ (Stuttgart Conture Program). Primär dient sie zur Interpolation, Verwaltung, Bearbeitung und Visualisierung digitaler Geländedaten und wurde speziell für die Verarbeitung großer Datenmengen entwickelt. Sie wurde für die Berechnung des digitalen Geländemodells eingesetzt, weil sie eine hohe Genauigkeit der Geländedarstellung gewährleistet [SCOP++ Handbuch, 2003].

Mit der Software GVE (Graphical and Viewer Editor) können DGMe interaktiv nachbearbeitet und editiert werden. GVE ist ein Programm zur Visualisierung und Bearbeitung von räumlichen Daten. Es kann dazu verwendet werden, Dateien verschiedener Formate zu kombinieren [INPHO GmbH, 2008].

Um die Unstetigkeitsstellen in den Punkt wolken oder in der Geländeoberfläche aufzufinden, zu modellieren und weiter zu prozessieren, ist eine Datenbank hilfreich. Eine entsprechende Softwareapplikationen zur Verwaltung und Bearbeitung der Modelle sowie dafür geeignete Dateiformate sind schon implementiert. Beispielsweise bietet die am I.P.F. entwickelte topographische Datenbankapplikation TopDM die entsprechende Funktionalität.

Weltweit gibt es mehreren Anbieter von ALS-Software. Die führenden Unternehmen sind in folgender Tabelle 1 angeführt:

Entwickler/ Unternehmen	Software	Homepage
Airborne 1 Corporation	LiDARXLR8R	http://www.airborne1.com/products/software_rentals_sales.shtml
Ambercore Software	Amber IQ	http://www.ambercore.com/Amber_iQ.php
Applied Imagery LLC	QT Modeler	http://www.appliedimagery.com/products.html
* Arizona State University	LViz	http://lidar.asu.edu/LViz.html
FLI-MAP	FLIP7	http://www.flimap.com/site5.php
GeoCue Corporation	LIDAR 1 CuePac	http://www.niirs10.com/Products/lidar1.htm
GeoLAS Consulting	LASTools	http://www.geolas.com/Pages/servTools.html
* Helica, OGS	TARGET	http://www.helica.it/eng/prodotti/prodotti.html
IPF, TU Vienna; inpho	SCOP++	http://www.ipf.tuwien.ac.at/products
Merrick	MARS	http://www.merrick.com/servicelines/gis/mar~
* NOAA Coastal Services Center	LIDAR Data Handler	http://www.csc.noaa.gov/crs/tcm/lidar_handler.html
PCI Geomatics	Geomatica Engine	http://www.pcigeomatics.com/products/lidarEngine.html
* Politecnico di Torino	VELOCE	ftp://gps.polito.it/lidar/gnu/readme.txt
QCoherent Software	LP 360 Version	http://www.qcoherent.com/product.htm
Riegl	RiPROCESS 560	http://www.riegl.com/
Sanborn Map Company	FASE	http://www.sanborn.com/technologies/lidar.asp
Terrasolid	TerraScan	http://www.terrasolid.fi/en/products/terrascan
TopoSys GmbH	TopPIT	http://www.toposys.com
Visual Learning Systems Inc.	ESRI Lidar Analyst	http://www.featureanalyst.com/lidar_analyst.htm
* free/open source software		

Tabelle 1: Anbieter von Softwares für die Laserdatenbearbeitung. [Geist und Höfle, 2007]

Auf vier der wichtigsten Software-Produkte wird nun genauer eingegangen:

1) „LIDAR 1“ ist ein Anwendungsmodul der Firma GeoCue aus Huntsville in den USA.

Durch diese Software ist es möglich die ALS-Software von TerraScan zu integrieren.

GeoCue verspricht eine hohe Leistung bei der ALS-Datenbearbeitung mit „LIDAR 1“, bei der folgende Eigenschaften im Vordergrund stehen:

- ein graphisches Projektmanagement und Steuerungswerkzeuge,
- eine Realzeitprojektansicht über die gesamte Befliegung,
- eine automatische Darstellung der TerraScan-Flugbahn,
- Unterstützung für Projektbezugsdaten wie Orthophotos und Diagramme
- Werkzeuge, um ALS-Daten zu importieren
- Analysewerkzeuge, um die Projektdeckungsqualität zu überprüfen
- ein integriertes PointView zur Sichtbarmachung in 3D von ALS-Daten
- etc. [GeoCue, 2008]

2) Die Firma GeoLAS Consulting bietet ein Softwarepaket namens „LASTools“ an. Diese deutsche Firma entwickelt kundenspezifische Algorithmen und Software für die Verarbeitung von ALS-Daten und dreidimensionalen topographischen Daten.

„LASTools“ ermöglicht [GeoLAS Consulting, 2008]:

- Kalibrierung und Spurausgleich (Detektion von Roll-, Nick- und Kurswinkeloffsets, Ablenkwinkelskalenfehlern, Kompensation von Winkeloffsets und Skalenfehlern)
- Filterung und Objektextraktion (Filterung von 3D-Daten zur Entfernung von Oberflächenobjekten, Fehlmessungen, Objekterkennung und Extraktion z. B. Gebäude, Vegetation)
- Datenfusion und thematische Analyse (Nutzung der Intensitätsdaten von Laserscannern zur Oberflächenklassifizierung, Fusion von 3D-Daten mit Bilddaten aus anderen Quellen, wie z.B. Luftbilder, Thematische Datenanalyse und Oberflächenklassifizierung, Integration von ALS-Daten und DSMs in GIS-Datenbanken)

3) Die Software „RiPROCESS 560“ (Firma Riegl) ist für die Verarbeitung, das Analysieren und Visualisieren von ALS-Daten basierend auf RIEGL Lasergeräten bestimmt.

„RiPROCESS 560“ ermöglicht dem Benutzer alle Daten zu handhaben, die innerhalb eines einzelnen Projektes erfasst und verarbeitet werden. Die verwendeten Daten schließen Projektdaten, ALS-System Informationsdaten wie Montageinformationen mit ein. Auch Kalibrierungsdaten, ursprüngliche Laserdaten wie die digitalisierten Echosignale vom RIEGL

LMS-Q560 Lasergerät, Positions- und Lagebestimmungsdaten vom GPS/INS, Zwischendateien - zugänglich für alle Daten- und georeferenzierte Punktwolkendaten mit zusätzlichen Attributen für jeden Punkt können verarbeitet werden [Rieg, 2008].

4) Die Firma Terrasolid aus Finnland bietet eine leistungsfähige Software zur Prozessierung von ALS-Daten. „TerraScan“ ist ein vielseitiges Softwarepaket für die Verarbeitung von Rohdaten. Der Benutzer hat die Möglichkeit außer binären Formaten wie das LAS- und TerraScan-Format, seine eigenen Formate für praktische Anwendungen zu definieren. Alle Verarbeitungsschritte dieses Programms sind optimiert, um die höchste Leistung der Software zu erreichen. Im Falle großer Datenmengen können die Daten in kleinere, geographische Blöcke durch „TerraScan“ geteilt und die Verarbeitung durch benutzerdefinierte Makros automatisiert werden. Zusätzliche Tools zu „TerraScan“ zur Laserdatenverarbeitung sind TerraSlave, TerraMatch, TerraModeler und TerraPhoto von Terrasolid [Terrasolid, 2008].

Es existieren bereits mehrere Dateiformate von der Erfassung über die Auswertung bis zum Endprodukt von Laserscannerdaten. Um die Anschaulichkeit zu wahren, werden als Input/Output nur die Dateiformate angeführt, die in diesem Rahmen verwendet wurden.

XYZ - Die ASCII Datei enthält drei Spalten mit zeilenweise X, Y, Z Koordinaten der einzelnen Punkte.

WNP - Jede Zeile der ASCII Datei besteht aus vier getrennten Einträgen. Der erste Eintrag entspricht einem Punktcode, die weiteren drei Einträge den X, Y, Z Koordinaten von Objektpunkten. Die Verwendung von Punktcodes ermöglicht die Speicherung zusätzlicher Informationen zu einem Punkt. Dadurch können Punkte verschiedenen Objekttypen (z.B.: Punkthaufen, Linien) zugeordnet werden [SCOP++ Handbuch, 2003].

DTM - Das bevorzugte Dateiformat zur Verwendung der SCOP-internen Verwaltung von DGMen. Es entspricht der binären Speicherung der berechneten Gitterpunkte. Weiters besteht die Möglichkeit, mit diesem Format zusätzlich Linieninformation (z.B.: Geländekanten) zu speichern [SCOP++ Handbuch, 2003].

DXF (Drawing eXchange Format) - Dieses Dateiformat wurde von der Firma „Autodesk“ entwickelt. In jeder Zeile der ASCII Datei steht wechselweise ein Gruppen-Code (z.B. X) oder der zugehörige Wert (z.B. der Koordinatenrechtswert), so dass immer zwei Zeilen eine Informationseinheit bilden. Sie können verschiedene Arten von Daten beinhalten, z.B. Ebenen-, Linienform-, Symbol- und Objektdefinitionen oder Zeichnungselemente [Wikipedia – Online-Enzyklopädie, 2008].

TIFF (Tagged Image File Format) - Dieses Dateiformat wird zum Speichern von Bitmaps, Grautönen, RGB (Rot, Grün, Blau) und CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black) Farbwerten verwendet. Zur Speicherung werden die Bilder in Felder unterteilt und mit einem Schlüssel versehen (Tag). Wie viele Felder in einer Datei vorhanden sind, steht am Anfang der Datei im Header [Wikipedia – Online-Enzyklopädie, 2008].

Die ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing) unterstützt nachdrücklich die Annahme des LAS Standards, der schon in der Version LAS 1.2 vorhanden ist. Das ist ein allgemeines Datenformat für die Lieferung, den Austausch, die Analyse und die Verwaltung von ALS-Daten zwischen Verkäufern und Kunden. Dieses Binärdateiformat ist eine Alternative zu den firmeninternen Systemen oder zu einem generischen ASCII Daten

- Austauschsystem, das von vielen Unternehmen benutzt wird. Ein Problem mit Firmensystemen ist, dass die Daten nicht leicht von einem System oder von einem Bearbeitungsprozess zum anderen übernommen werden können. Allerdings wird die Verarbeitung von den Messwerten beschleunigt, weil die Daten extrem groß sein können.

Diese Liste stellt die derzeitigen Softwarepakete dar, die das LAS Daten Format unterstützen [LibLas, 2008]:

- LAStools implementiert von Martin Isenburg und Jonathan Shewchuk auf der Basis der LAS Daten Format 1.0 und 1.1.
- PCI Geomatics Geomatica 10.1.1 und LidarEngine 1.0
- Leica Photogrammetry Suite 9.1
- ERDAS Imagine 9.1
- ER Mapper 7.1
- MapInfo 8.5 Pro
- ENVI 4.3
- IDL 6.3
- LIDAR 1 CuePac 4.0
- ArcGIS 9.2 Workstation
- Safe FME 2007
- Quick Terrain Modeler 6.0.2
- Global Mapper 8.0
- MARS Explorer 4.0 Pro

- TerraSolid, [TerraScan](#)
- [LIDAR Analyst 4.1](#)
- [LAS Reader for ArcGIS 9](#)
- [MATLAB R2007a](#)
- [DTM Software SCOP++](#)

Dieses Datenformat ist frei verfügbar und kann auf in Verbindung stehende Software verteilt, geliefert und erkannt werden. Weitere Einzelheiten sind unter www.liblas.org zu finden.

6. Gegenüberstellung von Diskrete-Echo- und FWF-ALS-Systemen

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit Diskrete-Echo-ALS- und FWF-ALS-Systemen. Es wird ein Überblick über die Prozessierung von FWF-ALS-Daten und die Bestimmung von zusätzlichen Informationen pro detektiertem Echo gegeben. Danach wird auf bereits durchgeführte Untersuchungen zur Nutzung dieser Informationen näher eingegangen.

Diskrete-Echo-ALS-Systeme

Zur diskreten Speicherung des empfangenen analogen Signals findet man beim ALS momentan zwei unterschiedlichen Konzepte. Die Mehrzahl der zur Verfügung stehenden Systeme nutzt konventionelle analog basierte Techniken zur Detektion der Echos (Diskrete-Echo-Systeme). Diese Systeme speichern den jeweiligen Zeitstempel sowie eine repräsentative Signalstärke (Amplitude, oft auch als Intensitätswert bezeichnet) des detektierten Echos [Wagner et al., 2006].

Die konventionellen Diskrete-Echo-Sensoren nutzen analoge Detektoren zur Bestimmung der empfangenen Echos. Sie können dabei zumeist im Fall von mehreren Echos pro ausgesendetem Laserpuls sowohl das erste als auch das letzte Echo bestimmen und speichern. Die Differenz zwischen der ersten und letzten Echo-Reflexion gibt Auskunft über die "Rauigkeit" der Oberfläche und ist somit ein Indikator für die Vegetation. Sie zeigt eine bestimmte Charakteristik hinsichtlich der Klassifizierung. Dächer bestehen in der Regel aus glatten, geneigten Oberflächen, sodass keine Differenzen zwischen erstem und letztem Echo zu beobachten sind. Im Gegensatz dazu tritt in der Vegetation, die für einen Teil des Laserstrahls durchlässig ist, oftmals mehr als ein Echo auf. Dieses Verhalten lässt sich zur Trennung von z.B. Vegetation und Gebäuden nutzen (siehe Kapitel 2.3.). Zu beachten ist, dass oft entlang von Dachkanten große Differenzen beobachtet werden können. Einige „erste Echo“-Reflexionen repräsentieren noch die Dachfläche, während die „letzte Echo“-Echos der entsprechenden Laserpulse bereits von Reflexionen am Boden stammen [Maas, 2005].

Während eine zuverlässige Trennung zwischen ersten Echos aus hohen Vegetationsschichten und letzten Boden-Echos möglich ist, stößt man allerdings bei niedriger Vegetation an die Grenze des Trennvermögens, da sich bedingt durch die Pulslänge (5 ns entsprechen einer Länge von 1.5 m) das Boden- und Vegetationsecho überlagern (falls die Entfernung zwischen den Objekten kleiner ist als die halbe Pulslänge) und somit die analogen Detektoren keine

zwei getrennten Echos bestimmen können [Kraus, 2004]. Im Falle der Überlagerung wird somit ein einziges Mischecho aus den beiden überlagernden Signalen registriert (siehe Kapitel 2.3). Aus dem letzten detektierten Mischecho ergibt sich ein Punkt, der zwischen dem niedrigen Vegetationsniveau und der Geländeoberfläche liegt. In Abb. 20 ist dieser Fall am Beispiel des letzten Echos dargestellt (zweite Zeile). Diese Abbildung veranschaulicht die Digitalisierung des reflektierten Echos. Der erste (rote) Impuls bezieht sich auf einen Bruchteil des detektierten Echos, die folgenden zwei (blauen) Echos entsprechen den Reflexionen von den Baumästen; das letzte Echo entspricht der Grundreflexion.

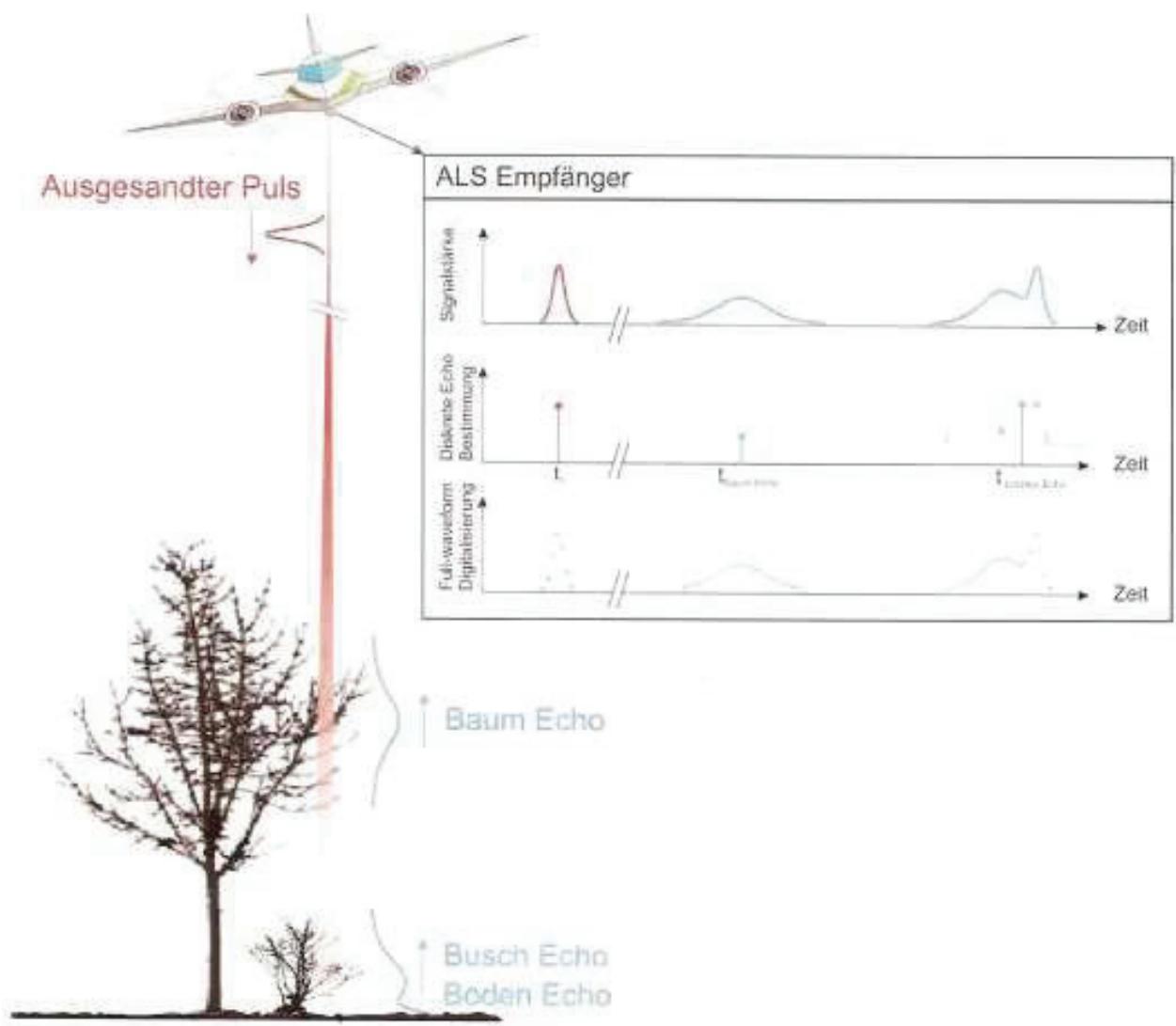


Abbildung 20: Empfangene Signalstärke (ALS-Empfänger, erste Zeile); Bestimmung diskreter Echos (ALS-Empfänger, zweite Zeile) vs. full-waveform Digitalisierung (FWF-ALS-Empfänger, dritte Zeile). [Briese et al., 2008]

FWF-ALS-Systeme

„Im Gegensatz zu den Diskrete-Echo-Systemen zeichnen neu zur Verfügung stehende Sensoren, so genannte full-waveform ALS (FWF-ALS) Systeme, das gesamte im Empfänger über dem Detektionsschwellwert liegende Signal auf“ [Briese et al., 2008]. Die Digitalisierung des gesamten Echos (full-waveform) erlaubt weitergehende Analysemöglichkeiten über die Verteilung der vertikalen Strukturen entlang des Laserstrahls: statt diskreter Echos wird hier für jeden ausgesandten Laserpuls ein komplettes Intensitätsprofil des reflektierten Echos aufgezeichnet (siehe Abb. 20, dritte Zeile) [Hug, Ullrich, Grimm , 2004]. Der Empfänger speichert die FWF-Informationen des Echosignals. Diese werden als Werte gespeichert und in ein binäres Format umgewandelt. So kann das Signal bei der Nachbearbeitung rekonstruiert und analysiert werden. Weitere neue Attribute pro Punkt der aufgenommenen Daten außer der Intensität sind: ein GPS-Zeitstempel pro zurückreflektiertem Echo, Amplitude und Echoweite [Briese et al., 2008].

Die FWF-ALS wurden für bathymetrische Zwecke in den 1980iger Jahren entwickelt. Das erste einsatzfähige topografische System wurde 1999 von der NASA entwickelt. Der LVIS Sensor (Laser Vegetation Imaging Sensor) war eine verbesserte Version eines zuvor entwickelten Satellitensystems namens SLICER, das 1994 entwickelt wurde [Blair und Hofton, 1999]. SLICER wurde konstruiert, um die vertikale Struktur der Vegetation großer Areale zu beschreiben. Die Daten-Prozessierung von LVIS, demonstrierte die Fähigkeit aller zurückkommenden Signale, die Beschaffenheit von bewaldeten Gebieten aufzunehmen und die Fähigkeit, die Erdbeschaffenheit und sogar die Bodenvegetation zu messen. Die ersten Algorithmen zur Klassifizierung von Bodenpunkten durch Analysierung der zurückgelieferten Signale wurden entwickelt und für das darauffolgende System GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), das vom Satellit ICESAT (2003-2006) getragen wurde, zusammengefasst [NASA, 2008]. Das erste kommerzielle FWF-ALS ist seit 2004 einsatzfähig (Riegl LMS-Q560 Laser Scanner) [Bretar et al., 2008].

Die Tabelle 2 stellt die wichtigsten Hersteller von ALS Systemen dar:

System	Optech	TopoSys	Leica	Riegl
Laser	ALTM 3100	Falcon II	ALS50-II	LMS-Q560

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Flughöhe	80 – 2500m	30 – 2500m	max. 3000 m	30 – 1500 m
Scanfrequenz	max. 70 Hz	165 – 415 Hz	120 -160 Hz	max. 160 Hz
Scan winkel	$\pm 25^\circ$	$\pm 7^\circ$ (fixed)	$\pm 22.5^\circ$ oder $\pm 30^\circ$	$\pm 45^\circ$ oder $\pm 60^\circ$
Pulsrate	max. 100 kHz	83 kHz	150 kHz	max. 240 kHz
Öffnungswinkel	0.3 mrad oder 0.8 mrad	0.5 mrad	1.2 mrad	0.5 mrad
Bereichsmessungen	Erste und letzte Echo	Erste und letzte Echo FWF optional	Erste und letzte Echo FWF optional	FWF
Scannmechanismus	oscillating sawtooth	fiber switch	rotation polygon	rotating polygon

Tabelle 2: Entwicklung der ALS Systeme und ihrer Eigenschaften. [TopoSys, Leica, Optech, Riegl, 2008]

Kennzeichnende Parameter für die Beurteilung des Potenzials von Laserscannersystemen sind vor allem Pulsrate, Genauigkeit und Reichweite. Während die ersten kommerziellen Systeme Mitte der 90er Jahre Pulsraten von 2 - 5 kHz aufwiesen, bieten aktuelle Systeme Pulsraten von 25 - 200 Hz. Die Höhengenauigkeit der erzeugten Bodenpunkte liegt in flachem Gelände üblicherweise bei 10 - 20 cm [Huisng und Pereira, 1998]. Die maximale Flughöhe über Grund wird u.a. durch die aufgrund der Forderung nach Augensicherheit beschränkte Laserleistung bestimmt. Sie liegt bei den meisten Systemen zwischen 1000 und 3000 Metern. Bei Öffnungswinkeln des Scanmechanismus, der von der Flughöhe abhängt, von 15° - 60° , beträgt die Breite der in einem Überflug aufgenommenen Geländestreifen meist 500 - 2000 Meter. Die resultierende Punktdichte lag bei früheren Systemen bei etwa einem Punkt pro zehn Quadratmeter. Moderne Systeme sind in der Lage, Punktdichten von einem Punkt pro

Quadratmeter zu erzeugen. Für Sonderanwendungen sind auch schon Datensätze mit Punktdichten von mehr als 10 Punkten pro Quadratmeter erzeugt worden.

Die Bestimmung der Echos und ihrer zusätzlichen Attribute erfolgt nicht in Echtzeit während der Datenaufnahme, sondern später im „post-processing“ mit individuellen Algorithmen, die auch an die jeweilige Anwendung (DGM, Vegetationskartierung, etc.) angepasst werden können. So könnte man auch auf das Problem von sich überlagernden Echos speziell eingehen und versuchen die Trennung der Echos durch ein geeignetes „post-processing“ Verfahren zu ermöglichen [Briese et al., 2008].

Um die Übersicht dieser Master-Thesis zu bewahren, ist auf der Abbildung 21 die Reihenfolge der FWF-Daten Bearbeitung veranschaulicht. In vielen englischsprachigen Artikeln, die von FWF-ALS handeln, ist das „post-processing“ und „pre-processing“ erwähnt. Die Diskrete-Echo-Systeme und die FWF-Systemen unterscheiden sich hauptsächlich durch die Datenbearbeitung. Diese beruht bei FWF-Systemen nämlich darauf, dass die Echos durch eine bestimmte Funktion bestimmt sind. Dieser Schritt findet bei Diskrete-Echo-Systemen nicht statt.

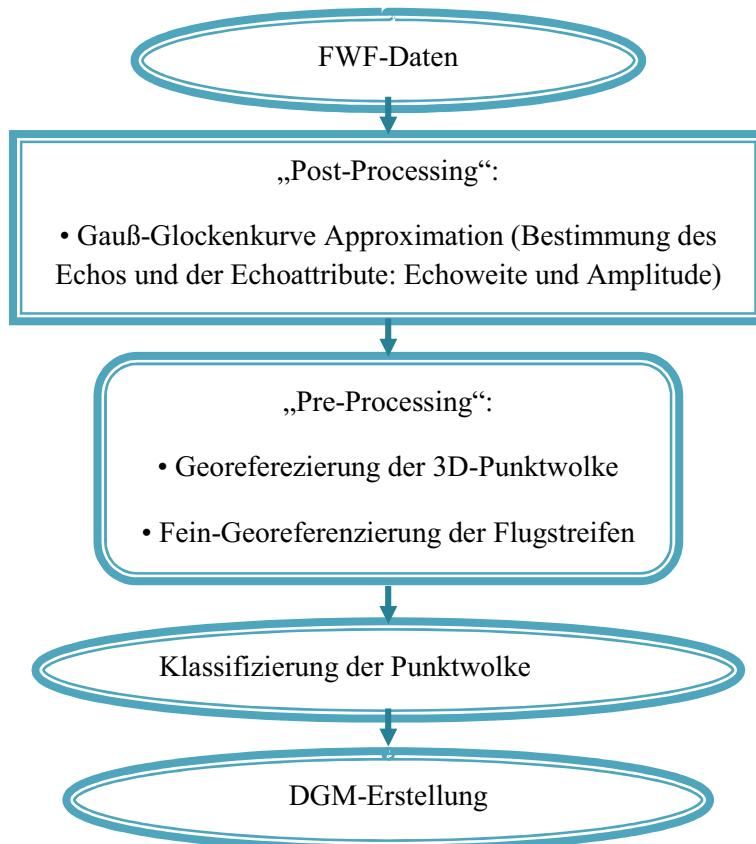


Abbildung 21: Von FWF-ALS-Daten zum DGM-Erstellung

Typischerweise erfolgt die Modellierung der Signalform bei den im Moment verfügbaren FWF-ALS-Sensoren (mit einem Zeitintervall von 1 ns) mit der Gaußschen Glockenkurven-Approximation [Briese, Mandlburger, Pfeifer, 2007].

Bei jedem gesendeten Laser Impuls wird angenommen, dass er eine Gaußsche Funktion ist. Die gesammelten Impulse sind deshalb eine Vereinigung zwischen dieser Gaußschen Verteilung und einer Oberflächenfunktion, die vom Zielobjekt abhängt. Es wurde gezeigt [Wagner, 2006], dass das reflektierte Signal einer Summe von Gaußschen Funktionen angenähert werden kann, wenn die vertikale Höhenverteilung der Elemente innerhalb des Beleuchtungskegels dem Gaußschen Gesetz folgt. [Wagner, 2006] hat gezeigt, dass mehr als 98 % der beobachteten Signale zu einer Summe von Gaußschen Funktionen passte. Dennoch ist diese Annahme nicht immer zufriedenstellend. Abhängig vom ALS System muss das übertragene Signal nicht immer durch eine Gaußsche Funktion beschrieben sein, sondern kann leicht verzerrt (asymmetrisch), verflacht oder erhöht sein [Bretar et al., 2008].

Es wäre gut, die Signalprozessierungsmöglichkeiten zu erweitern, indem man komplexere, parametrische Modelle verwendet. Dadurch kann man die Signalanpassung verbessern und mehr Informationen von dem Rohsignal bekommen. Die Standarderweiterungsfunktionen sind Lognormale und generalisierte Gaußsche. Die Form der verspeicherten Echos kann asymmetrisch sein und mit lognormalen Funktionen modelliert werden. Durch Verwendung eines generalisierten Gaußschen Modells kann die Modellierung der komplexen Signalform verbessert werden [Chauve et al., 2007].

In dieser Phase des Modellierens der Wellenform ist der erste Schritt gewöhnlich die Ermittlung der Anzahl der Echos, ihrer ungefähren Position und ihres Umfanges, indem alle lokalen Maxima im verspeicherten Signal gesucht werden. Gegründet auf diesen ungefähren Werten kann die Wellenform modelliert werden, indem man die Abstände zwischen den gespeicherten FWF-Daten und dem Modell minimiert. Weiters können, begründet auf den einzelnen Kurveneigenschaften, Attribute wie der maximale Amplituden-Wert (A) und die Echobreite (EW) für jedes Echo bestimmt werden. Während die Amplitude die Reflexionstände der beleuchteten Oberfläche beschreibt, stellt die Echobreite die Entfernungsvariationen zum Oberflächenelement dar [Briese, Mandlburger, Pfeifer, 2007].

Das wichtige zusätzliche Attribut, das die Verbindung zu anderen Attributen enthält, ist die GPS-Zeit des ausgestrahlten Impulses. Dieser Zeitstempel lässt es zu, Echos chronologisch zu systematisieren und mehrfache Echos zu finden (zusammenzubringen von einem ausgesendeten Laserimpuls) [Wagner et al., 2006].

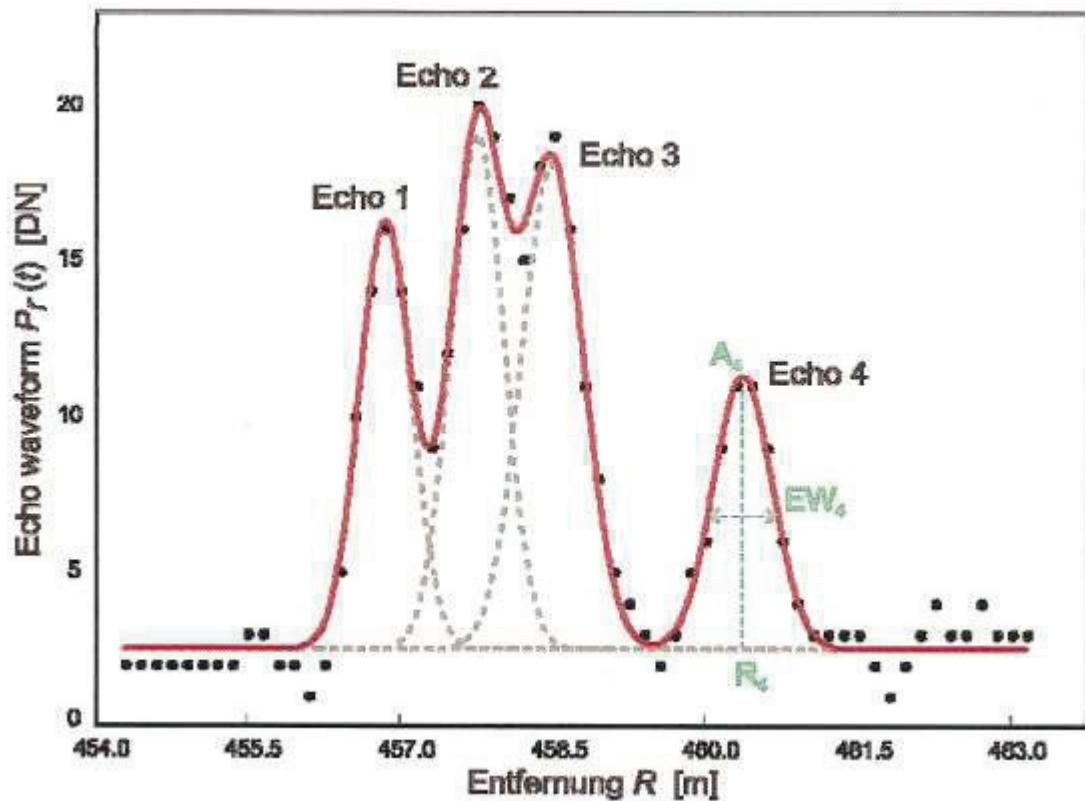


Abbildung 22: Modellierung der gespeicherten Wellenform (schwarze Punkte) mittels der Summation von Gaußschen-Glockenkurven (Rot: Summe aller Glockenkurven, Grau gestrichelt: individuelle Gauß-Kurven pro Echo); Neben der Entfernung R_i kann man die einzelnen Echos durch weitere Kenngrößen, wie die Amplitude A_i und die Echoweite EW_i charakterisieren (vgl. Echo 4). [Briese et al., 2007]

Abbildung 22 zeigt die gespeicherten Amplitudenwerte der Wellenform, die individuellen Gauß-Kurven pro Echo, sowie das Gesamtmodell des an die Daten bestangepassten Modells. Auf Basis dieses Modells können weitere charakteristische Kenngrößen pro Echo wie die maximale Amplitude (A) und die Echoweite (EW) bestimmt werden. Während die Amplitude die Rückstrahleigenschaften der beleuchteten Objektoberfläche charakterisiert, beschreibt die Echoweite unter der Annahme gleicher Rückstrahleigenschaften die Laufzeitvariationen (= Entfernungsvariationen) aller kleinen Oberflächenelemente, die zur Ausprägung des Echos beigetragen haben. So deutet eine große Echoweite (in Relation zur Weite des ausgesandten Pulses) darauf hin, dass mehrere Objektoberflächen in unterschiedlicher Entfernung zu dem Signal beigetragen haben (Echoüberlagerung), während eine kleine Echoweite auf ein glattes (in Bezug zur Strahleinfallsrichtung) Oberflächenelement schließen lässt [Briese, Mandlburger, Pfeifer, 2007].

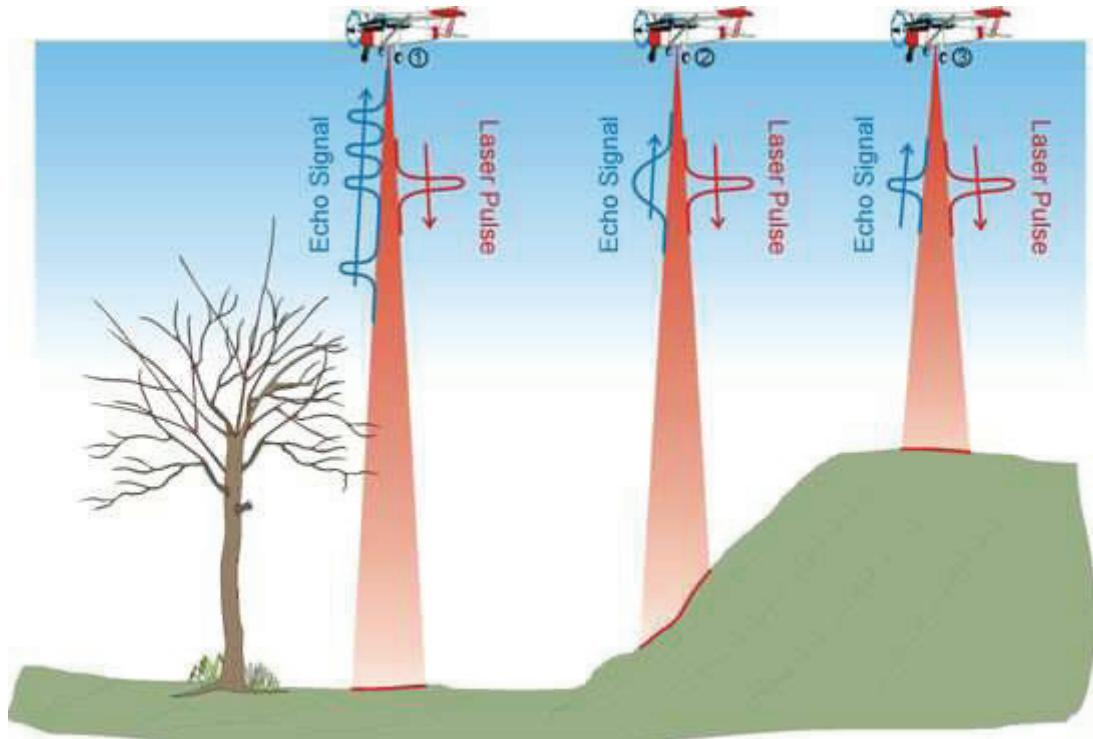


Abbildung 23: Einfluss der Oberflächenneigung auf das Echo-Signal (Amplitude, Echoweite). [Kremer, 2005]

Die Abbildung 23 veranschaulicht die Erfassung von FWF-ALS auf unterschiedliche Arten von Zielen und den Zusammenhang zwischen Amplitude, Echoweite und Oberflächenneigung. Die rote Impulsform symbolisiert das Lasersignal, das mit Lichtgeschwindigkeit in Richtung Boden gesendet wird. Wenn das Signal auf ein Objekt trifft wird nur ein Teil der ausgesendeten Energie in Richtung Laser reflektiert, dies wird durch die blaue Impuls-Form angezeigt. Im Falle der ersten Situation trifft die ausgesendete Laser-Energie auf den Ast und ein Bruchteil auch auf den Boden. Es werden mehrere Echos in Richtung Empfänger reflektiert. Man kann sagen, dass diese Echos eine große Echoweite und kleine Amplitude haben. Im zweiten Fall wird der Laserstrahl von einer geneigten Fläche reflektiert, die eine kleine Echoweite mit einem großen Amplitudenwert verursacht. Im letzten Fall wird der Impuls durch eine flache Fläche reflektiert, die Echoweite und die Amplitude haben eine einfache Ausdehnung [Kremer, 2005].

Die FWF-Systeme zeichnen sich besonders in bewaldeten Bereichen dadurch aus, dass der ausgesandte Laserstrahl innerhalb der Abtastflecken kleine Lücken in der Vegetationsdecke durchdringen kann und dadurch zeitversetzte Echos von unterschiedlichen reflektierenden Objektoberflächen empfangen werden können [Kremer, 2005].

Seit einiger Zeit werden in kommerziellen FWF-Systemen immer kleinere Strahldurchmesser gewählt; gewöhnlich 0,3 - 1m Durchmesser, abhängig von Höhe und Lichtstrahl-

geschwindigkeit über Grund [Bretar et al., 2008]. Sie werden als „small footprint“ oder „single mode“ bezeichnet. Mit solchen Sensoren verringert sich die Anzahl von zurück kommenden Echos pro ausgesendetem Impuls. Je kleiner der Fleck, der vom Laserstrahl auf der Oberfläche getroffen wird, desto weniger Informationsgehalt pro Laserstrahl. Eine Klassifikation dieser Daten ist dann nur unter Berücksichtigung von Nachbarechos möglich [Wagner, 2006]. Um FWF-Daten zu speichern, haben die kommerziellen Hersteller spezielle Systeme hinzugefügt (CCNS-siehe Kapitel 3.2.) und die Speicherkapazität erhöht.

Die FWF-ALS-Systeme besitzen viel Potenzial, weil sie viele Nachteile von klassischen ALS überwinden und der Nutzer mehr Kontrolle bei der Interpretation der physikalischen Messung hat. Anstelle von 3D-Punktwolken, werden detailliertere und zusätzliche Informationen über die Struktur der beleuchteten Oberfläche geliefert. Auf Basis von FWF-ALS werden weitere physikalische Eigenschaften von Objekten geliefert z.B. können in bewaldetem Gebiet mehr 3D-Punkte bestimmt werden, die niedrige Vegetation kann vom Boden unterschieden werden und die Bodenbedeckung kann genauer gemessen werden [Dubayah und Blair, 2000].

6.1. Bis jetzt durchgeführte Studien in der Interpretation der Echoweite und Amplitude

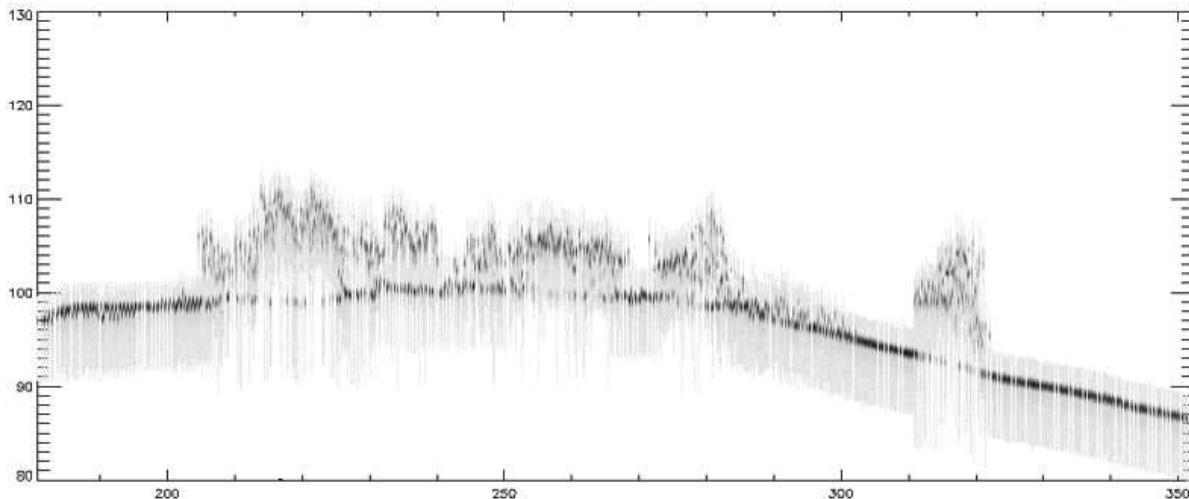


Abbildung 24: Das Oberflächenprofil von FWF-ALS-Daten. [Hug, Ullrich und Grimm 2005]

Die Abbildung 24 zeigt ein Oberflächenprofil von FWF-ALS. Es wird die Rauigkeit der einzelnen Bäume des Waldes dargestellt, um die Möglichkeiten von FWF-ALS zu zeigen. Der Amplitudenwert der FWF-ALS ist durch die Graustufen veranschaulicht. Die dunklere Farbe stellt einen großen Amplitudenwert dar. Minimale Werte der Amplitude werden hellgrau dargestellt, um registrierte Wellenformdaten anzuzeigen. In jedem Diagramm

wird auf der X-Achse das reflektierte Echosignal geplottet, während die Höhe auf der Y-Achse angezeigt wird [Hug, Ullrich und Grimm 2005].

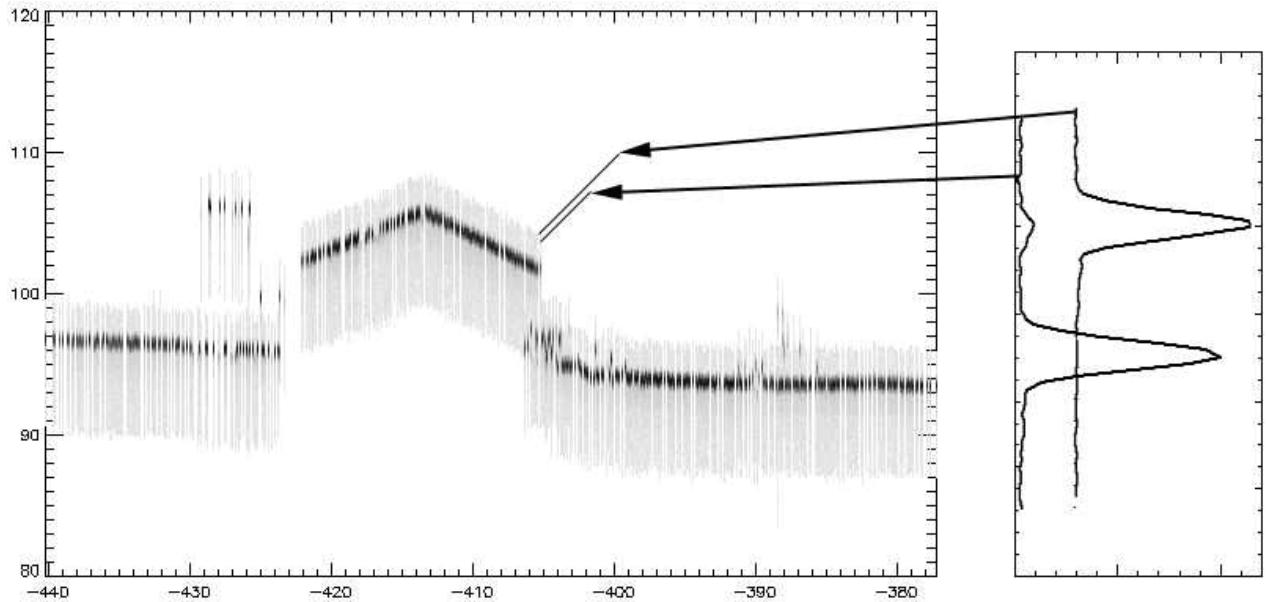


Abbildung 25: Das Oberflächenprofil von FWF-ALS-Daten. [Hug, Ullrich und Grimm 2005]

In Abbildung 25 wird gezeigt, wie FWF-ALS helfen kann, Gebäudekanten zu erkennen. In diesem Fall war der Punktabstand ungefähr 1 m groß, während der Abtastfleck des Laserstrahles auf dem Grund ungefähr 0.17 m war [Hug, Ullrich und Grimm 2005]. Einige Laserpulse sind auf das Dach getroffen, andere auf den Boden. Die Wahrscheinlichkeit zwischen Echos von der Dachfläche und vom Boden unterscheiden zu können, ist gering. Neben dem FWF-Messungsprofil in der Abbildung 26 ist die vertikale FWF-Echoverteilung auf der Gebäudekante gezeigt. Abhängig vom Reflexionsvermögen des Dachs und des Bodens könnte man eventuell die Dachkante erkennen. Die Position der Bruchkante könnte man auf Basis der durchschnittlichen Lichtstrahlungsenergie zwischen Dachfläche und Boden errechnen [Hug, Ullrich und Grimm 2005].

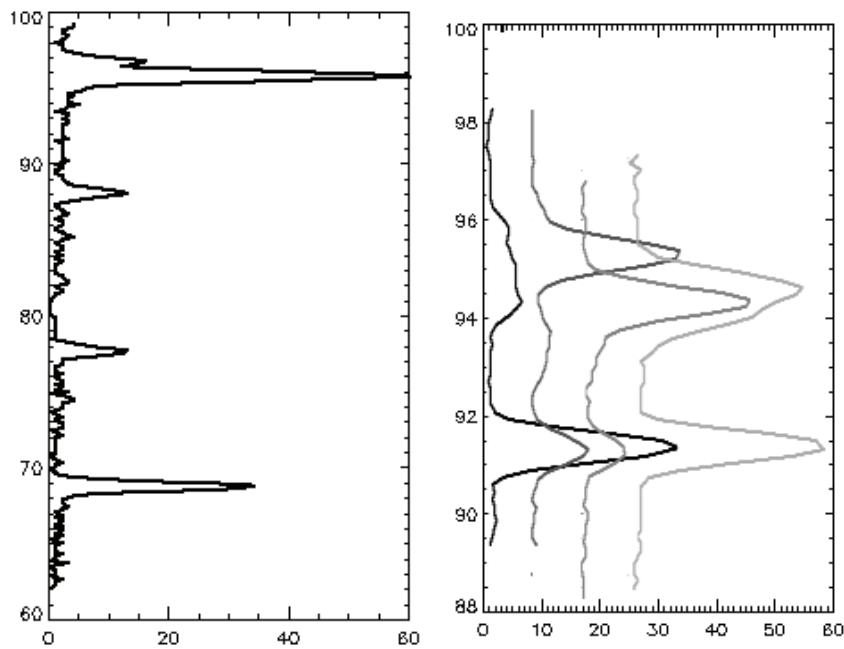


Abbildung 26: Beispiel für die vertikale Verteilung der Echosignale von FWF-ALS-Daten und die resultierende Impulsstärke. [Hug, Ullrich und Grimm 2005]

Die linke Teil der Abbildung 27 zeigt mehrfache Niveaus der Vegetation innerhalb des Waldes durch die Spitzen von Echosignalen. Die niedrigste Spitze stellt den Boden dar, die höchste die Oberseite der Vegetation. Die obere Spitze hat eine kleine Vorspitze auf einer Seite, die anzeigt, dass es auf dem höchsten Punkt der Vegetation viel Struktur gibt. Auf Basis dieses Beispiels kann man vermuten, dass die Vegetationshöhen entlang der vertikalen Echoverteilung genauer festgestellt werden können. Der Benutzer hat die Möglichkeit zu entscheiden, welche Echos die Spitze der Baumkronen definieren (z.B. Beginn an der ersten Hauptspitze) [Hug, Ullrich und Grimm 2005].

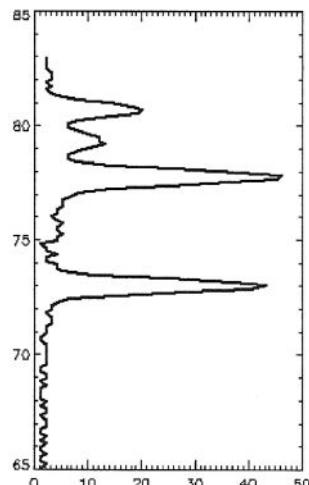


Abbildung 27: Beispiel für vertikale Verteilung der Echosignale von FWF-ALS-Daten und die resultierende Impulsstärke. [Hug, Ullrich und Grimm 2005]

Die Abbildung 28 stellt vier Echos mit weiteren kleinen Echosignalen dar und veranschaulicht die unterschiedliche Impulsstärke sehr gut. Das erste Echosignal hat eine kleine Amplitude, aber eine große Echoweite. Dadurch schließt man auf die allgemeine Stärke der Vegetation. Das zweite FWF-Echosignal zeigt eine einzelne Reflexion von der Vegetationsoberfläche und eine viel schwächere Signalstärke als das erste Echo. Das dritte Echo hat ein stärkeres Signal und ist mit dem letzten Echo vermischt. Schließlich ist das letzte Echo fast genauso stark wie das vorletzte, aber zwischen den beiden sind unterschiedliche Vegetationsbereiche vorhanden („Rauhigkeit“).

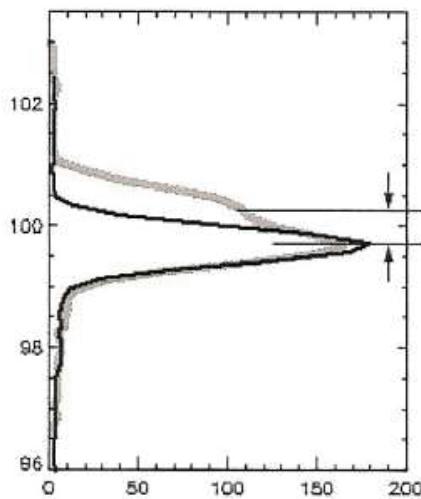


Abbildung 28: Beispiel für die Trennung zweier Echos: Grundvegetation und Boden. [Hug, Ullrich und Grimm 2005]

Die Abbildung 28 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen niedriger Grundvegetation und Boden. Das schwarze Echosignal stammt von einem flachen Boden, das graue von niedriger Vegetation. Die diskreten ALS-Echosignale ermöglichen eine Trennung von Echos, die ungefähr 1,5 m voneinander entfernt sind. Das neue FWF-ALS ermöglicht es, überlappende Signalechos zu trennen, wenn sie mindestens 0,5 m von einander entfernt sind [Hug, Ullrich und Grimm 2005].

6.2. Untersuchungen mit FWF-ALS in Forstwirtschaft und in Stadtgebieten

Seit Erscheinung der ersten FWF-ALS Systeme sind bereits verschiedene Untersuchungen durchgeführt worden, um die Oberfläche möglichst genau darzustellen.

Es wird besonders in Vegetationsgebieten geforscht, um die vertikale Verteilung der Vegetationsstruktur zu bestimmen. Man kann besonders viele Anwendungen in der Forstwirtschaft beobachten. Mit Hilfe dieser FWF-ALS Systeme können:

- Bäume in kleinen Bereichen erkannt werden [Brandtberg et al., 2003],

- Höhen extrahiert und der Kronendurchmesser bestimmt werden [Persson und Soderman, 2002],
- Vegetationsvolumina bestimmt werden [Naesset und Bjerknes, 2001],
- die entsprechenden Baumarten erkannt werden [Holmgren und Persson, 2004] und ihre bestimmten Eigenschaften [Andersen et al., 2005],
- das Wachstum des Waldes geschätzt und Bäume ermittelt werden, die umgefallen sind [Yu et al., 2004],
- Archäologische Gegenstände in Wälder erkannt werden, wie z.B. Grabhügel [Doneus und Briese, 2006].

Die Tatsache, dass ALS in der Lage ist, digitale Geländemodelle auch in bewaldeten Gebieten zu erzeugen, liegt darin begründet, dass ein Teil der Laserscannerpulse bis zum Waldboden durchdringt. Im Falle des Einsatzes über Waldgebiet erhält man eine erste Reflektion aus den Baumkronen und die letzte vom Waldboden. Im idealen Fall wird also mit einem Laserpuls sowohl ein Punkt des Oberflächenmodells (hier: Kronenmodell) wie auch ein Punkt des Geländemodells gemessen, woraus sich dann direkt Informationen über Baumhöhen ableiten lassen [Persson et al., 2005].

Die Abbildung 29 veranschaulicht die unterschiedlichen Punktwolken, die bei Disckrete-ALS-Systemen (Histogramme oben) und bei FWF-ALS Systemen (Histogramme unten) entstehen. Daraus können idealerweise sogar Baumarten bestimmt werden. [Hyppä et al., 2001] erreicht dabei Standardabweichungen von 1,8 m (10%) für die Baumhöhe, 10% für die Kronenfläche und 10% für das Holzvolumen. [Schardt et al., 2002] erzielt ähnliche Werte.

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

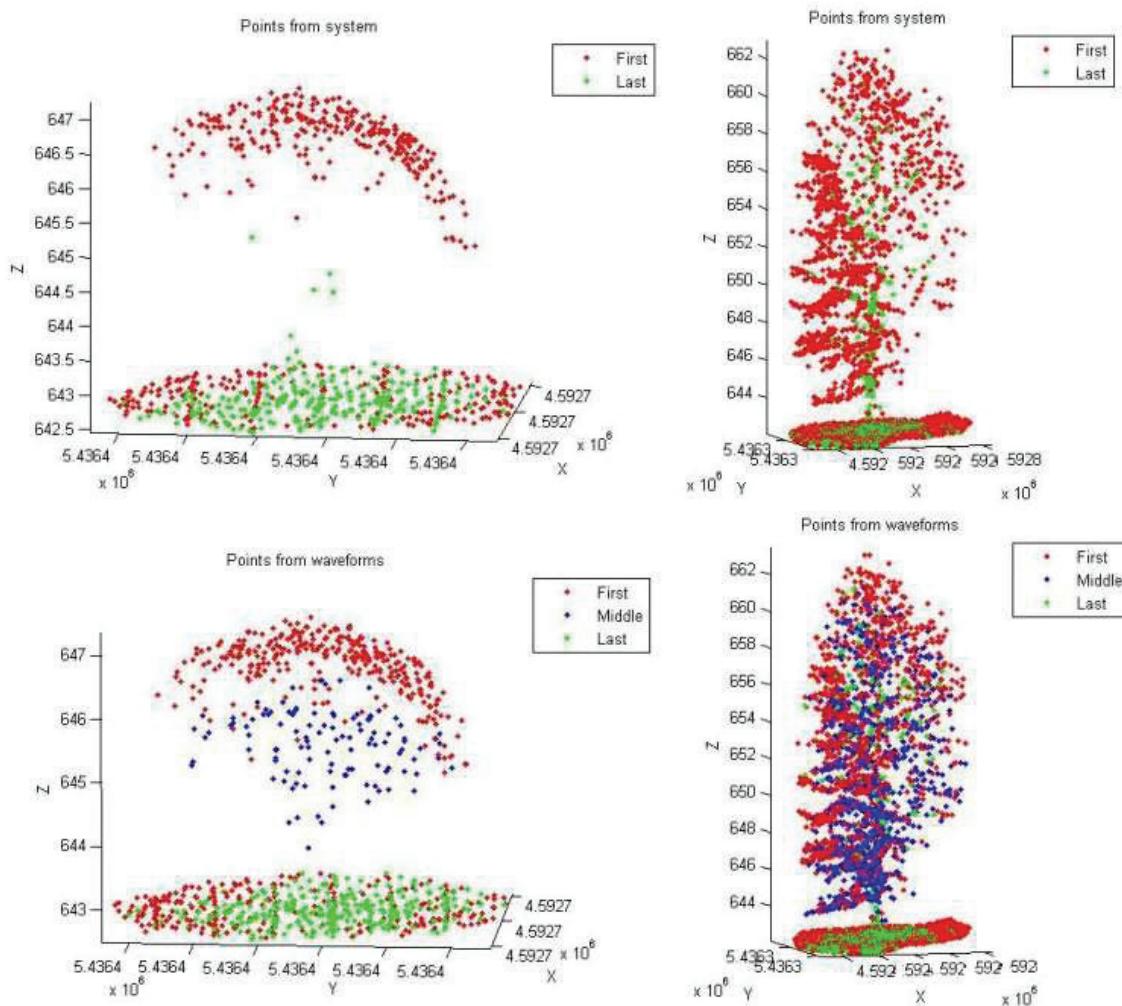


Abbildung 29: Diskrete-ALS-Systeme (Histogramme oben), FWF-ALS-Systemen (Histogramme unten). [Reitberger, Krzystek, Stilla 2006]

Die Qualität des DGM nimmt in bewaldeten Gebieten mit zunehmender Dichte der Vegetation ab. Durch die geringere Anzahl der Punkte, die am Boden gemessen werden, wird auch die Beschreibung der Geländefläche unzuverlässiger [Briese et al., 2008].

Die verbesserten FWF-ALS Systeme erhöhen die Anzahl der empfangenen Echosignale. Es können zwischen 30 und 130 % zusätzliche Punkten ermittelt werden, abhängig von der Vegetationsdichte [Chauve et al., 2007]. Die Punkte sind hauptsächlich innerhalb der Baumkronen und in der Unterschicht (Abbildung 30) vorhanden. Das Ermitteln solcher schwachen Echos ermöglicht es, die Struktur der Vegetation und des Bodens besser zu schätzen [Bretar et al., 2008].

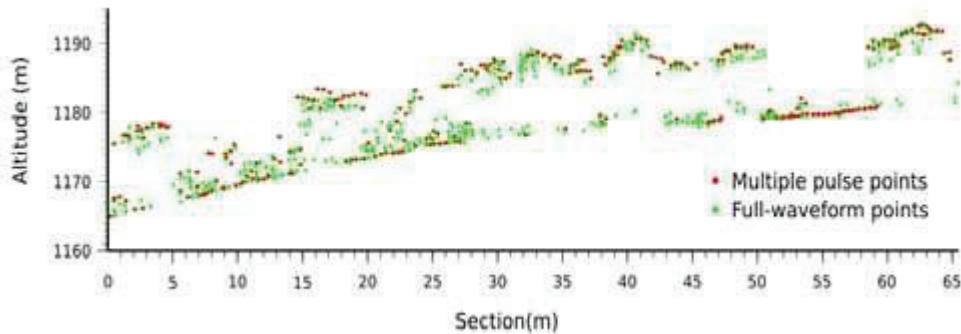


Abbildung 30: Beispielprofil eines Multiechosystems (rot) und FWF-ALS-Systems (grün). [Bretar et al., 2008]

Laserscannerdatensätze führen aufgrund des Verhältnisses zwischen dem mittleren Punktabstand (ca. 1 m) und dem Pulsdurchmesser (ca. 25 cm) meist eine Unterabtastung durch, die bewirkt, dass nicht immer der höchste Punkt einer Baumkrone getroffen wird. So werden Baumhöhen tendenziell zu niedrig bestimmt [Hug, Ullrich und Grimm, 2008].

Zusätzlich gibt es am Stamm und unterhalb der Baumkrone Reflexionen, die herausgefiltert werden müssen, aber das wiederum unter der Annahme von Vorwissen über Geländeform und Geländeneigung. Um das hohe Genauigkeits- und Automatisierungspotenzial des FWF-ALS auszunutzen, müssen also die systematischen Fehler eliminiert werden, die Durchdringungsrate muss in bewaldeten Gebieten ausreichend hoch sein und es müssen qualifizierte Methoden zur Filterung der Daten eingesetzt werden. Als Folge dessen wird erwartet, dass DGM, DOM und das abgeleitete Kronenmodell (CHM) verbessert werden können.

Stadtgebiete

Wenn man die FWF-ALS Daten in städtischen Gebieten verarbeitet, kann man beobachten, dass die meisten Echos auf Gebäudedächern gefunden werden, weil Gebäude, Straßen und andere künstliche Objekte keine undurchlässigen Strukturen sind. Mehrfache Echos können auf Gebäudeändern und auf überdachten Flächen erscheinen. In der Tat ermöglichen nachbearbeitende Algorithmen (Lognormale und generalisierte Gaußsche Funktionen), die schwachen Echos zu extrahieren, die nicht durch Gaußsche Detektionstechniken modelliert werden können (siehe Kapitel 6.) [Chauve et al., 2007].

In den städtischen Bereichen wird beobachtet, dass der Laserstrahl oft auf Gebäudekanten trifft. Die resultierende Signalenergie besteht folglich aus verteilten Echosignalen des Dachs und des Bodens, die überlappenden Echos können häufig nicht durch den Modellierungsalgorithmus getrennt werden [Bretar et al., 2008]. Es ist schwierig, ein

bestimmtes Verhalten für jeden städtischen Gegenstand zu erkennen. Die Echoweite ist relativ groß hinsichtlich der Gebäudedächer, der Straßen oder Grasflächen, aber das bedeutet nicht, dass eine große Echoweite mit kleiner Amplitude in Zusammenhang mit der Vegetation stehen muss. Eine große Amplitude entsteht auf Gras und Asphalt. Mit unterschiedlichen Amplituden kann man auf den Gebäudedächern rechnen, abhängig von den Dachmaterialien. Es ist theoretisch möglich zwischen städtischen Materialien, die durch den Laserstrahl abgetastet werden, zu unterscheiden [Gross, Jutzi, Thoenessen, 2007]. Eine Methode, die auf einem überwachten Klassifikator (supervised classifier SVM) basiert, ist von [Mallet, Soergel, Bretar, 2008] entwickelt worden. Sie liefert eine verwendbare Segmentation des Bodens, der Gebäude und der Vegetationsbereiche, verlangt aber klassische geometrische Eigenschaften als Hinzufügung zu den Parametern, die für die FWF Modellierung extrahiert werden. Zur Klassifizierung mehrerer Punktsegmentationen in städtischen Bereichen ist das Wissen, wie der Impuls auf die Oberfläche reagiert, über den Einfluss der geometrischen und radiometrischen Eigenschaften auf die belichtete Oberfläche (d.h. differential cross-section) und wie sich das auf die Echosignalform auswirkt, notwendig.

7. Verbesserte DGM-Erstellung mit Hilfe der Echeweite

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Problemstellung (vgl. Kapitel 7.1.) und einem praktischen Beispiel, das zeigt, wie der jedem Echo bzw. Laserpunkt zur Verfügung stehende Wert der Echeweite genutzt werden kann, um die Grenze zwischen Niedrigvegetation und Bodenpunkten zu bestimmen. Es wird die Möglichkeit der DGM-Verbesserung basierend auf zusätzlichen Informationen pro detektiertem Echo diskutiert.

7.1. Problemstellung

Im Rahmen dieser Master-Thesis wird gezeigt, wie der zu jedem Echo bzw. Laserpunkt stehende Wert der Echeweite durch angepasste Gaußsche Funktionen genutzt werden kann, um die Grenze zwischen Niedrigvegetation und Boden-Punkten zu finden. Das Ziel ist, zu überprüfen, ob dadurch eine Verbesserung der DGM-Erstellung vor allem in Bereichen niedriger Vegetation zu erreichen ist. Danach werden die DGMe einander mit und ohne Berücksichtigung der FWF-Information gegenübergestellt.

Zur DGM Erstellung ist eine Klassifizierung der ALS Daten in Boden- und Nicht-Bodenpunkte notwendig. Einige Methoden zu Filterung sind in Kapitel 5.2. dargestellt. All diese Verfahren haben gemeinsam, dass sie die Klassifizierung aufgrund lokaler geometrischer und topologischer Kriterien durchführen. In Gebieten mit dichter und niedriger Vegetation gelingt es aber, auf Basis der nicht ausreichenden Bodeninformation (oftmals keine Durchdringung und Überlappung der Boden- und Vegetationsechos) und der geringen Differenz der Nicht-Bodenpunkte zur Geländeoberfläche, kaum eine zuverlässige Klassifizierung der Daten zu erreichen.

Das Potenzial der Echeweite, die aus dem FWF-ALS-Daten pro Echo abgeleitet werden kann, um Bereiche mit niedriger Vegetation bzw. niedrigen Objekten auf der Geländeoberfläche zu detektieren, wurde untersucht. Eine ähnliche Untersuchung wurde bereits im Rahmen eines Forschungsprojektes (FWF-Projekt PI8674-G02F) von [Doneus und Briese, 2006] durchgeführt, mit dem Ziel, in bewaldeten Gebieten archäologische Strukturen (Grabhügeln) zu finden. Dazu wurde in einem kleinen Testprojekt untersucht inwieweit die Echeweite als ein Indiz auf vorhandene niedrige Vegetationsbereiche verwendet werden kann. Daraus konnte geschlossen werden, dass eine zuverlässige Trennung in Boden- und Nicht-Bodenpunkte möglich war. Die bodennahe Vegetation führte zu einer zeitlichen Aufweitung des empfangenen Signals. Daher versuchten Doneus und Briese, durch eine Vorfilterung der

letzten Echos (Elimination aller ALS-Punkte mit signifikant großer Echoweite) eine Verbesserung der DGM-Erstellung. Das Ergebnis einer DGM-Erstellung inklusive dieser Vorfilterung basierend auf der Echoweite pro ALS-Punkt war zu überprüfen. Verglichen mit dem DGM ohne Vorfilterung konnte in Bereichen niedriger Vegetation eine deutlich zuverlässigere Klassifizierung und somit eine verbesserte DGM-Erstellung ermöglicht werden. So stand im Testprojekt von Doneus und Briese ein deutlich verbessertes DGM für die archäologische Interpretation zur Verfügung. Dieses erweiterte Verfahren zur DGM-Erstellung war die Basis zur Detektion von niedrigen Grabhügeln, da so nun zuverlässig Bereiche mit niedriger Vegetation, die sich zuvor in Visualisierungen des konventionell erstellten DGMs (ohne Berücksichtigung der FWF Information) oftmals ähnlich wie Grabhügel abzeichneten, eliminiert werden konnten. Wie aus dem Forschungsprojekt ersichtlich ist, erkennt man die signifikante Verbesserung der Geländemodellierung durch das Ausnützen der aus den FWF-Daten abgeleiteten Echoweite. Es war der Ansatz zur Vorelimination der Punkte und das Potential dieser Zusatzinformation diskutiert.

Zunächst muss erwähnt werden, dass eine Aufweitung der Echoweite auch durch ein Oberflächenrauschen zu erwarten ist. Dieser Fall konnte im Rahmen des Testbeispiels nicht untersucht werden, da die Geländehöhenvariation innerhalb des in diesem Fall sehr kleinen footprints (0,3 m) gering war. Wenn starke Geländeneigungen und somit Höhenvariationen innerhalb des Abtastfleck existieren, müssten diese berücksichtigt werden. Außerdem muss erwähnt werden, dass die Genauigkeit der Bestimmung der Echoweite von der Signalamplitude abhängt. Daher sollte die Echoweite bei Echos mit geringer Amplitude nur bedingt für eine Klassifizierung der Daten eingesetzt werden. Eine Abschwächung der Amplitudenwerte der letzten Echos im Fall von Mehrfachreflexionen wurde bereits in der Publikation (Wagner et al., 2008) untersucht und anhand praktischer Beispiele demonstriert. Zusätzlich ist in dieser Publikation auch die Zuhilfenahme der so genannten „backscatter cross section“ (der Querschnitt jedes Echos, Information die mit einem sehr begrenzten Anteil zurückkommt) zur Klassifizierung von Vegetationsechos beschrieben.

7.2. Testgebiet

Das Scangebiet Leithagebirge, das mit dem Laserscanner beflogen wurde, umfasst das Untersuchungsgebiet Schlosspark Eisenstadt. Das sich in südwestlichen Teil des Scangebietes befindet (siehe Abb. 31, schwarzes Quadrat).

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

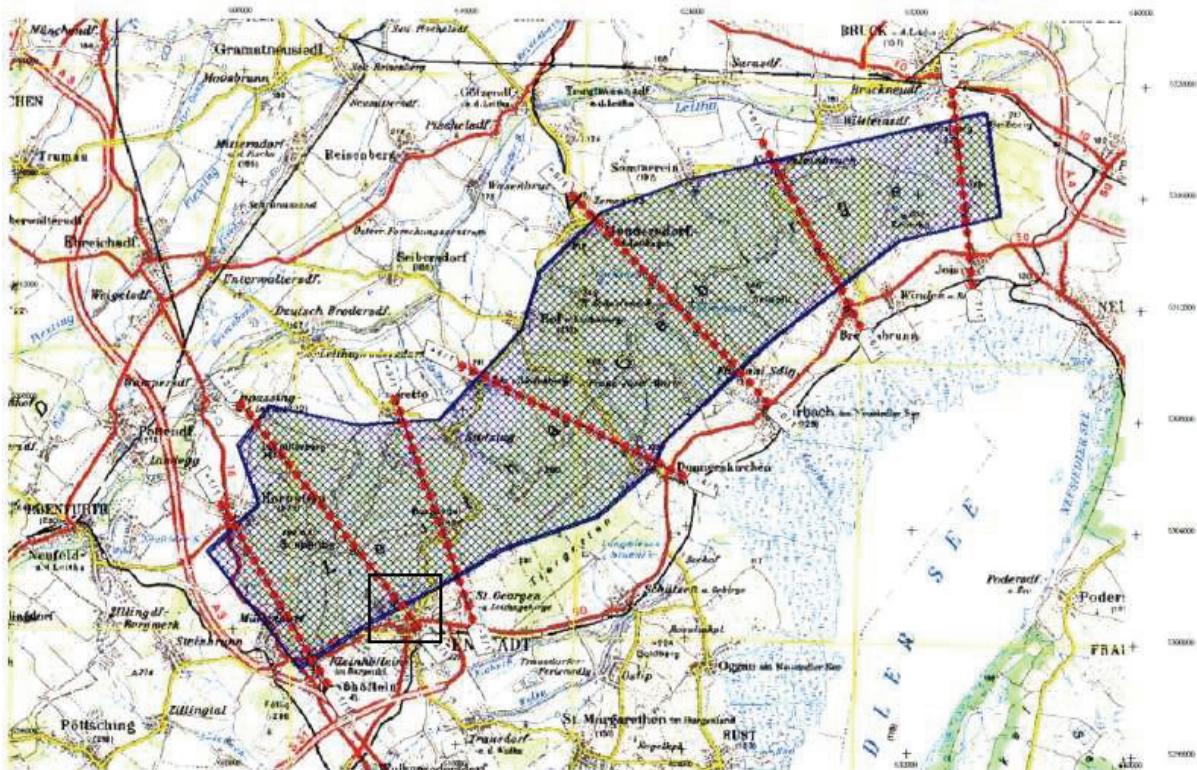


Abbildung 31: Das Scangebiet Leithagebirge (südöstlich von Wien). [Österreichische Karte 1:50000, BEV]

Der gesamte Bereich wurde mit einem FWF-ALS-Sensor von Typ RIEGL LMS-Q560 von der Firma Milan Geoservice GmbH erfasst. Die Datenerfassung fand 2007 in einer laubfreien Zeit statt. Die Flughöhe beträgt 600 m, mit dem Ergebnis eines durchschnittlichen Abtastfleckes von 30 cm auf dem Boden. Es wurde ein 45° großer Scan-Winkel und ein kurzer (200 m) Mittelabstand zwischen den Flugstreifen gewählt, die in einer 50 prozentigen Streifenüberlappung resultieren. So wird sichergestellt, dass die Geländeoberfläche mit ALS-Punkten vollständig erfasst wird. Bei der Befliegung wurde eine durchschnittliche Punktdichte (Letztechos) von 7,5 Punkten pro m² erreicht. Nach der Fein-Georeferenzierung (siehe Kapitel 3.4.) hat die Genauigkeit der zuvor durchgeföhrten Georeferenzierung 10 cm erreicht.

Das Untersuchungsgebiet Schlosspark in Eisenstadt befindet sich 50 Kilometer südöstlich von Wien im Bundesland Burgenland. Es ist ein Landschaftsgarten aus dem 19. Jahrhundert. Er bedeckt eine Fläche von fast 50 ha, die sich vom Nordrand der Stadt bis zum Leithagebirge erstreckt.

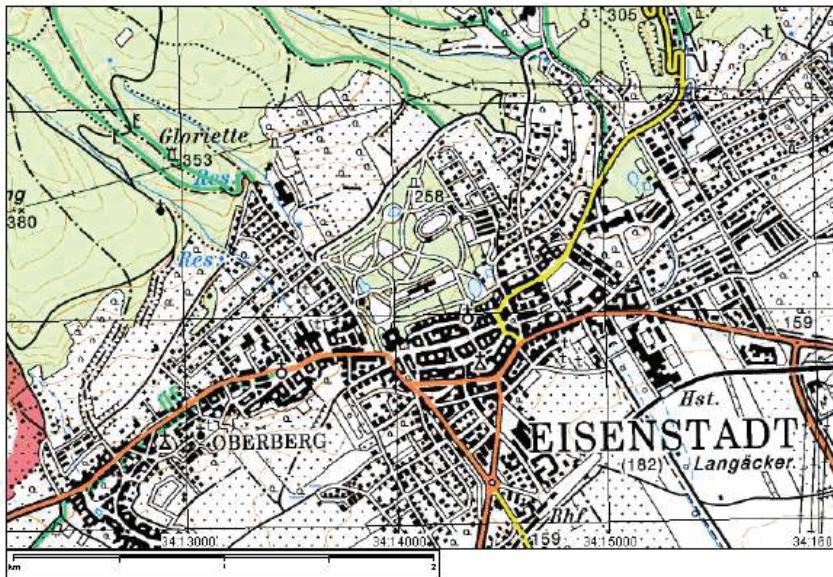


Abbildung 32: Österreichische Karte 1:50 000 – Eisenstadt. [BEV, 2008]

Die praktische Arbeit beschränkt sich hauptsächlich auf charakteristische Testorte. Innerhalb dieser wird die Fähigkeit der Echoweite zur Verbesserung der DGMe untersucht. Das Untersuchungsgebiet enthält baumfreie Flächen, wie z.B. mehrere Orte im südwestlichen und nordöstlichen Teil. Im Süden erstreckt es sich über das Scangebiet hinaus, d.h. es liegen für diesen Bereich keine Daten vor. Charakteristisch ist der Obelisk, der sich im nördlichen Teil und am höchsten Punkt des Schlossparks befindet. Im südlichen Bereich sind viele kleine Waldgebiete und freie Flächen vorhanden. Im Norden befindet sich ein kleiner Teich. Gebäude sind kaum vorhanden, kennzeichnend sind mehrere Waldbereiche, Büsche und dünn bewachsene Flächen (siehe Abb. 33).



Abbildung 33: Orthophoto vom Schlosspark Eisenstadt. [Burgenländische Landesregierung Abteilung Geoinformation, 2008]

Alle DGMe, die in diesem praktischen Teil vorkommen, sind auf der Basis der letzten zum Empfänger kommenden Echo-Signale abgeleitet. Die Rasterweite beträgt 0,25 m.

Die Berechnungen sind mit folgenden Programmen durchgeführt worden: SCOP++, GVE, TopDM (siehe Kapitel 5.4.).

7.3. Die Bodenvegetationsgrenze auf Basis der Echoweite - DTM-Erstellung

Eine große Echoweite (in Relation zur Weite des ausgesandten Pulses) lässt darauf schließen, dass mehrere Objektoberflächen in unterschiedlicher Entfernung zu dem Signal beigetragen haben (Echoüberlagerung). Eine kleine Echoweite gibt Hinweis auf ein glattes (in Bezug zur Strahleinfallsrichtung) Oberflächenelement (siehe Kapitel 6). Ein glattes DGM ohne Einfluss der Vegetation ist zu erwarten.

Um die Grenze zwischen niedriger Vegetation und Boden-Punkten zu finden ist es nötig die 3D-Punkte mit großer Echoweite näher zu betrachten. Abbildung 34 ist ein Orthophoto mit den gekennzeichneten Testgebieten. Die untersuchten Testorte A (Niedrige Vegetation) und B (Hohe Vegetation) sind typisch und kommen oft vor. Der Spielplatz (Testort C) kann Auskunft über den Echoweite-Verlauf auf horizontaler Ebene geben. Mit Hilfe der Testgebiete A, B, C wird die Grenze zwischen Boden- und Nicht-Bodenpunkten gesucht.



Abbildung 34: Orthophoto vom Schlosspark Eisenstadt mit gekennzeichneten Testgebieten, mit Hilfe dessen die Grenze zwischen Boden und Nicht-Bodenpunkten gesucht wird: (A) Niedrige Vegetation, (B) Hohe Vegetation, (C) Spielplatz.
[Burgenländische Landesregierung - Abteilung Geoinformation, 2008]

- Niedrige Vegetation (Bereich A)

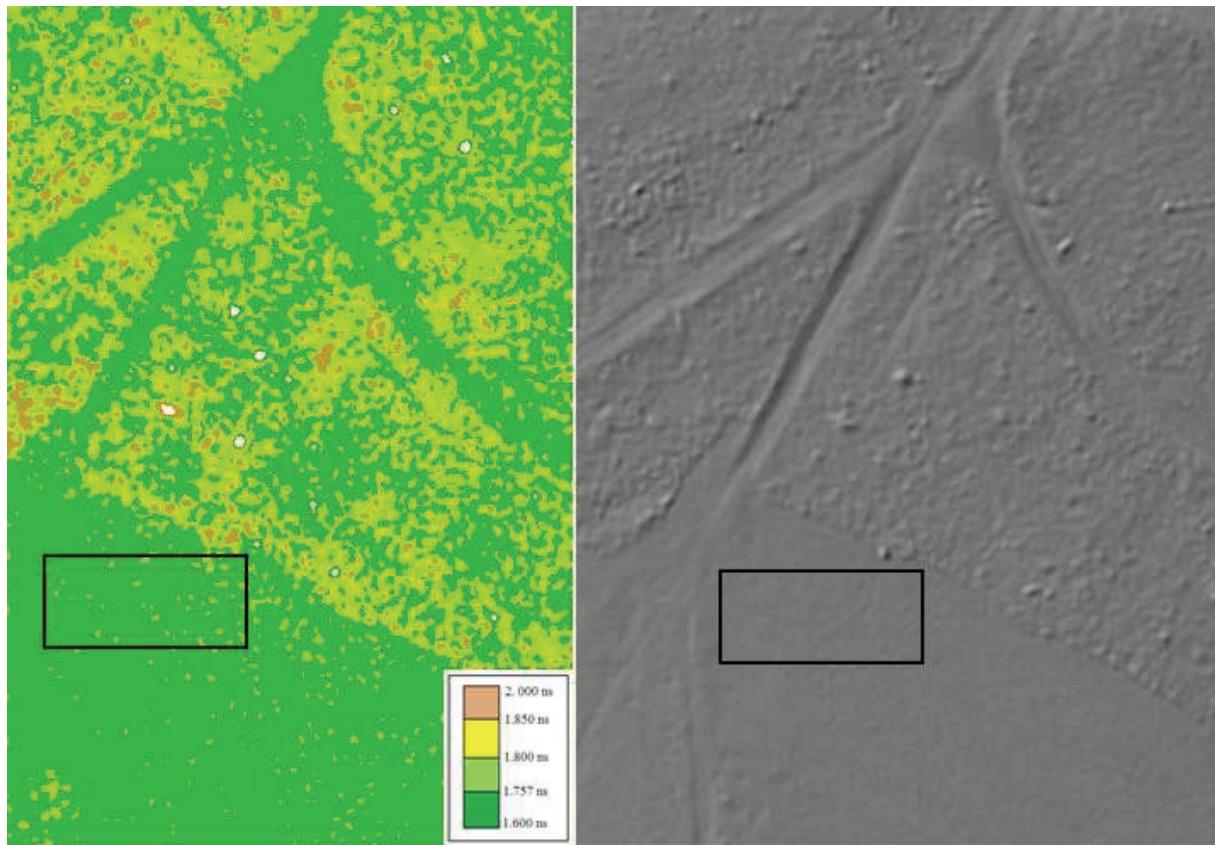
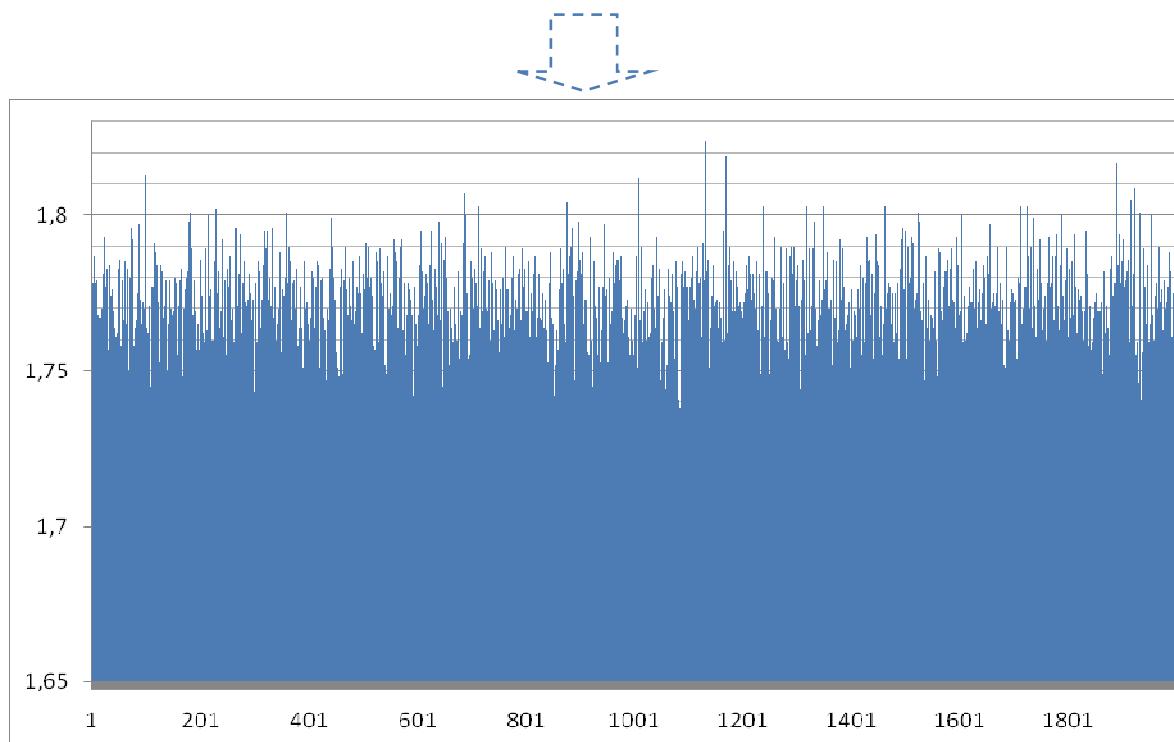


Abbildung 35: Modell der Echoweite – Einfärbung der Echoweite (links), DGM (Schummerung) (rechts).



Histogramm 1: Auf der X-Achse ist die Reihenfolge der Echoweiten, auf der Y-Achse sind die Echogrößen in [ns] abgebildet.

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

- Hohe Vegetation (Bereich B)

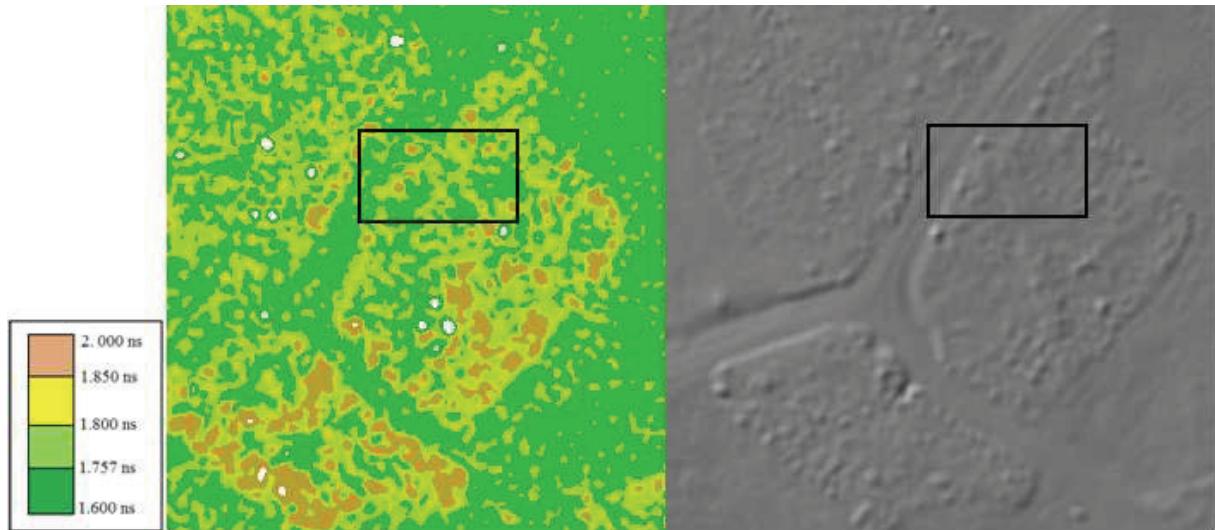
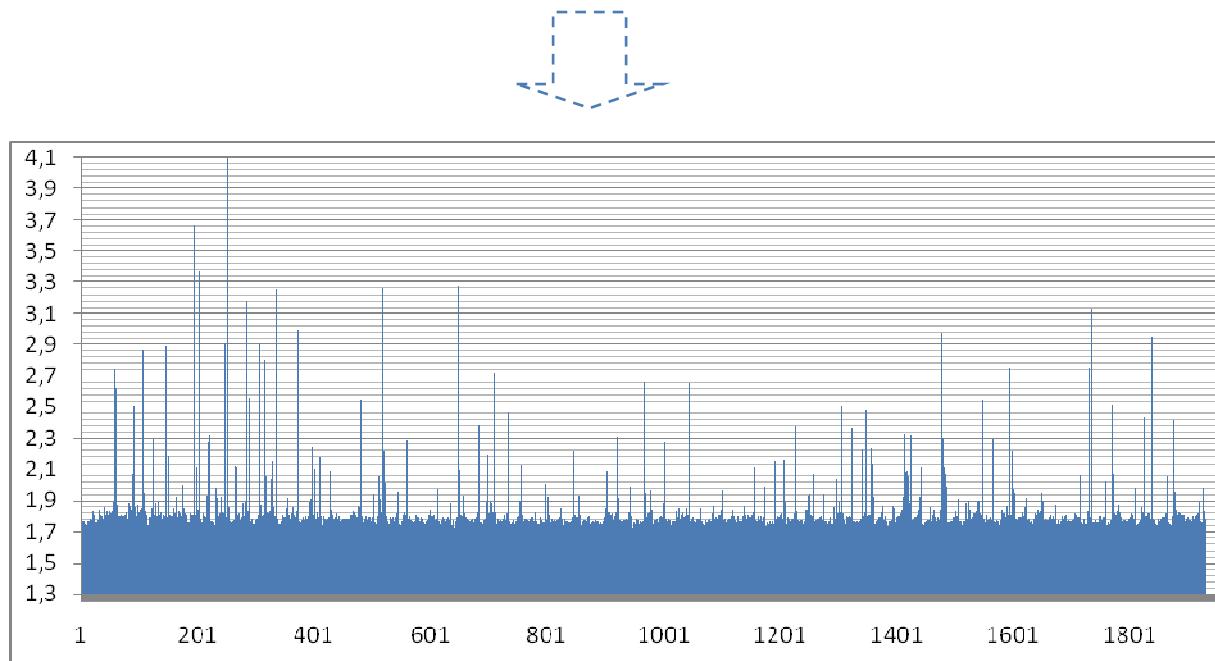


Abbildung 36: Modell der Echoweite – Einfärbung der Echoweite (links), DGM (Schummerung) (rechts).



Histogramm 2: Auf der X-Achse ist die Reihenfolge der Echoweiten, auf der Y-Achse sind die Echogrößen in [ns] abgebildet.

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

- Der Spielplatz (Bereich C)

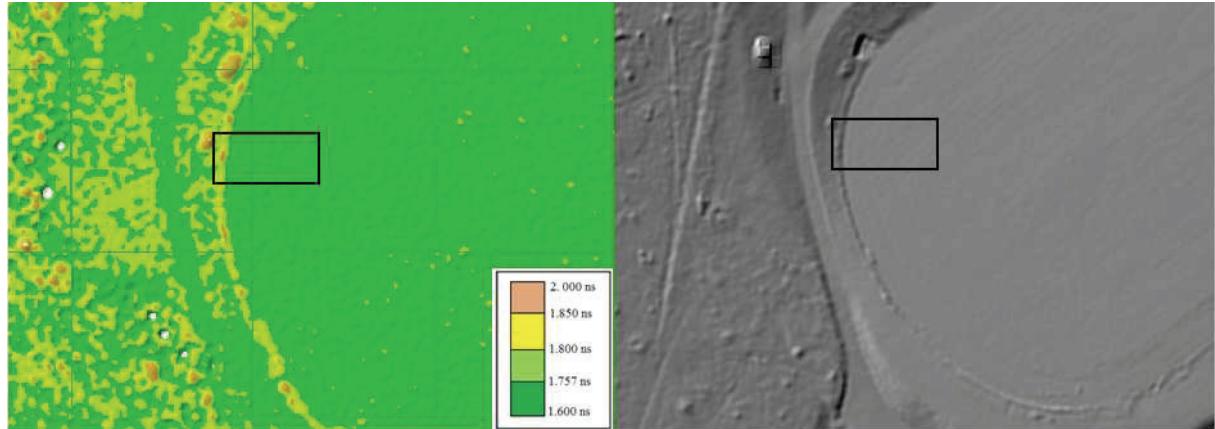
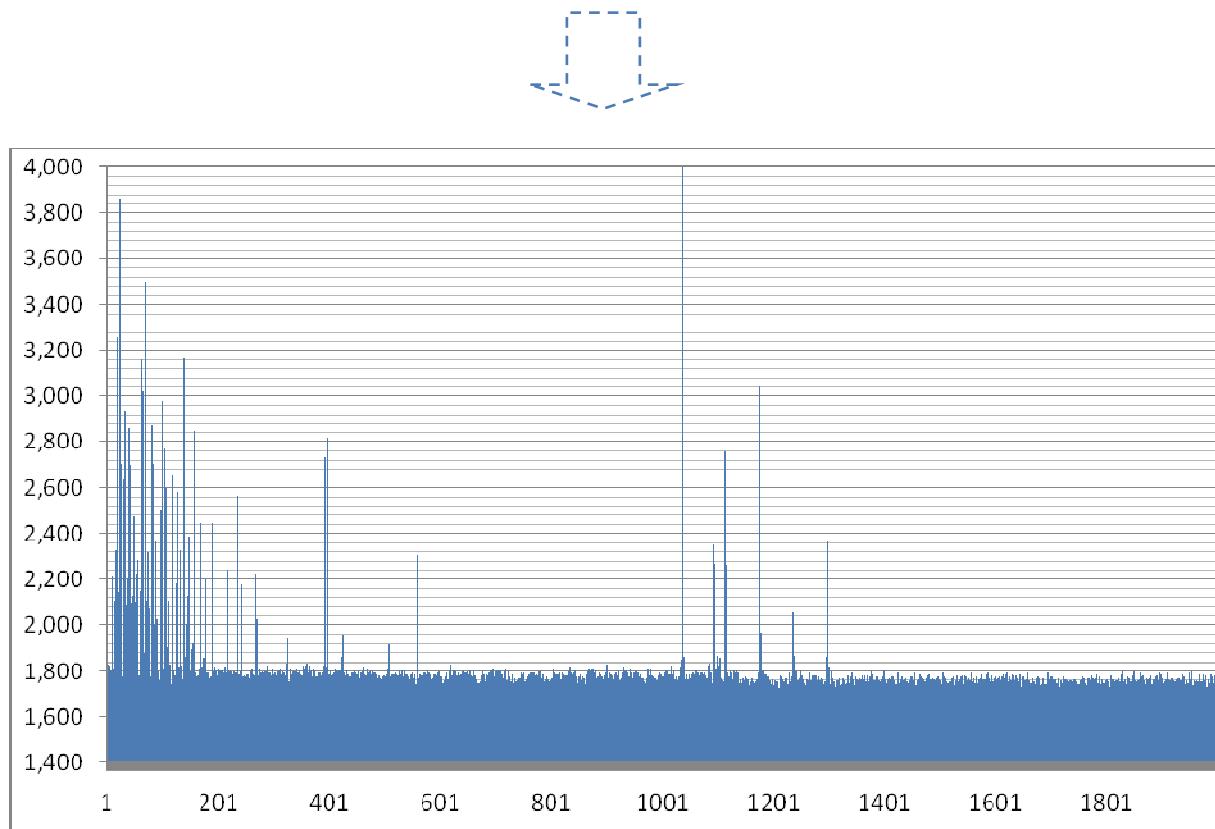


Abbildung 37: Modell der Echoweite – Einfärbung der Echoweite (links), DGM (Schummerung) (rechts).



Histogramm 3: Auf der X-Achse ist die Reihenfolge der Echoweiten, auf der Y-Achse sind die Echogrößen in [ns] abgebildet.

In den Histogrammen ist der Verlauf der Echoweite in niedriger Vegetation, hoher Vegetation und zum Vergleich auch auf dem Spielplatz dargestellt. Es sind kleine Testproben von 2000 Echowerten innerhalb der schwarzen Vierecke des Testgebiets A, B, C verwendet worden. Die Daten sind in anderen Teilen des Testgebiets sehr ähnlich und deswegen ist es nicht notwendig, eine größere Menge der Daten zu verwenden. Wie in den Histogrammen zu sehen ist, ist der Unterschied der einzelnen Echoweiten in Regionen mit niedriger Vegetation sehr klein.

Um die Grenze zwischen Niedrigvegetation und Boden zu finden und dadurch ein glattes DGM zu bekommen, kann man die Punkte mit großer Echoweite aus der DGM-Erstellung eliminieren. Es wird in der Verteilung der Echoweite ein Grenzwert gesucht, mit dessen Hilfe der Einfluss der Vegetation beseitigt werden kann. Durch Berechnung des Medianwerts, Mittelwerts und Modalwerts wurde versucht, eine Grenze festzulegen.

Median (oder Zentralwert) bezeichnet eine Grenze zwischen zwei Hälften. In der Statistik halbiert der Median eine Stichprobe. Gegenüber dem arithmetischen Mittel, auch Durchschnitt genannt, hat der Median den Vorteil, robuster gegenüber Ausreißern (extrem abweichenden Werten) zu sein und sich auch auf ordinal skalierte Variablen anwenden zu lassen. Durch seine Resistenz gegen Ausreißer eignet sich der Median besonders gut als Lageparameter für nicht normalverteilte Grundgesamtheiten [Wikipedia – Online Enzyklopädie, 2008]

Der **Mittelwert** ist ein so genannter Lageparameter, also der zusammengelegte Parameter einer Verteilung, einer Stichprobe oder Grundgesamtheit. Ziel solcher zusammengelegter Parameter ist es, die wesentliche Information in einer längeren Reihe von (z. B.) Messdaten in wenigen Daten zu konzentrieren. Das arithmetische Mittel (auch Durchschnitt) ist ein rechnerisch bestimmter Mittelwert. [Wikipedia – Online Enzyklopädie, 2008]

Der **Modus** oder **Modalwert** ist der häufigste Wert einer Häufigkeitsverteilung, also der Wert mit der größten Wahrscheinlichkeit. Da eine Verteilung mehrere Maxima besitzen kann, können einer Verteilung auch mehrere Modi (bimodal, multimodal) zugeordnet sein. Gibt es nur einen Modalwert, so nennt man die Verteilung unimodal. [Wikipedia – Online Enzyklopädie, 2008]

Durch den großen Umfang der Datenmengen des Untersuchungsgebietes ist es sinnvoll die Berechnung der statistischen Größen mit einer bestimmten Anzahl von Punkten mit der Echoweite zu begrenzen. Es wird eine Probe von 2000 Werten der Echoweite genommen.

In allen drei Testgebieten (A, B, C mit unterschiedlichen Vegetationshöhen), die in der Tabelle 4 dargestellt sind, sind die Ergebnisse sehr ähnlich.

	Median	Mittelwert	Modalwert
niedrige Vegetation	1,764 ns	1,764 ns	1,757 ns
hohe Vegetation	1,781 ns	1,817 ns	1,764 ns
Spielplatz	1,762 ns	1,784 ns	1,764 ns

Tabelle 3: Statistische Größen mit deren Hilfe der Grenzwert der Echoweite bestimmt wird.

Es ist schwer, sich für eine eindeutige Lösung zu entscheiden. Um das richtige Ergebnis zu finden, ist es sinnvoll für das Untersuchungsgebiet ein DGM mit verschiedenen Grenzwerten von Echoweben [ns] zu berechnen: 1,720; 1,730; 1,740; 1,750; 1,757; 1,764. Ein größerer Grenzwert ist sinnlos. Auf den Histogrammen kann man sehen, dass der Echoweitewert immer kleiner als 1,80 ns ist. Zur DGM Erstellung werden nur die 3D-Punkte, deren Echoweite kleiner als der Grenzwert ist, verwendet. Die DGM Berechnung erfolgt mit dem am I.P.F. entwickelten Programm SCOP++ (siehe Kapitel 5).

Die Untersuchung bei der DTM Erstellung durch Robuste Interpolation (siehe Kapitel 5.2.3.) ist eine oft benutzte Annäherung an die Klassifikation von ALS-Daten im Gelände und in bewaldeten Gebieten. Mit Hilfe von Filteralgorithmen, basierend auf den Höheninformationen benachbarter Punkte, werden die erfassten Punkte verschiedenen Punktgruppen zugeordnet (klassifiziert). Man unterscheidet die tiefsten Punkte, auch Bodenpunkte genannt, und die übrigen Punkte, auch als Hochpunkte oder Vegetationspunkte bezeichnet. In der Regel repräsentieren die tiefsten Punkte aus der „letzte Echo“-Aufzeichnung das Gelände.

Es wird versucht diese Annäherung zur Verbesserung der Punktwolke zu benützen. Die Verwendung der Gewichteschätzung bei der Robusten Interpolation könnte das Wissen über zusätzliche geometrische Eigenschaften der Echoparameter verbessern. Diese Gewichte können aufgrund der zusätzlichen Echoparameter, z.B. die Echoweite, festgestellt werden.

Die Beispieldaten stammen aus der Befliegung des Leithagebirges im Jahr 2007. Für diese Daten werden die Gewichte mit Hilfe des Echoweiteparameters ermittelt. Punkte, die einen kleinen Z-Wert haben, erhalten ein hohes Gewicht, während Punkten mit einem großen Z-

Wert ein niedriges Gewicht zugeschrieben wird, wie es in der Robusten Interpolation Methode ist. In diesen Bereichen, in denen die Einzelgewichte festgelegt sind, ist das letzte Echo eine Mischung von Reflexionen der kleinen Objekte auf den unterschiedlichen Strecken auf der DGM Oberfläche.

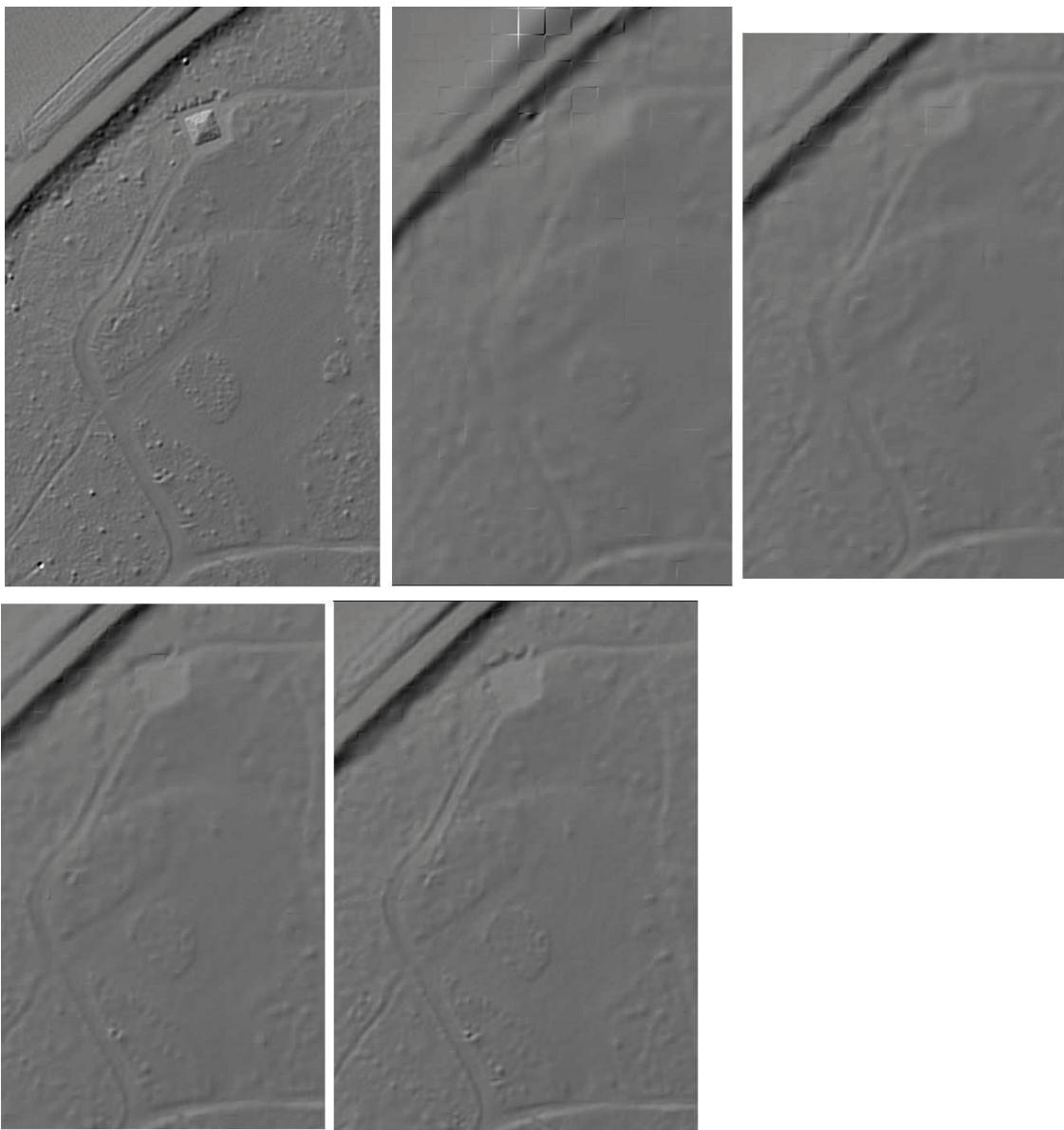


Abbildung 38: DGMe auf Basis der Grenzwerte der Echoweite. Links oben: DGM ohne Berücksichtigung der Echoweite-Parameter, oben in der Mitte DGM mit 1,720 ns ; rechts oben mit 1,730 ns ; links unten mit 1,740 ns ; rechts unten mit 1,750 ns als Grenzwert.

Die Abbildungen veranschaulichen die Ergebnisse bei festgelegten Grenzwerten von: 1,720 ns; 1,730 ns ; 1,740 ns und 1,750 ns.

Das erste Bild zeigt ein DGM ohne Berücksichtigung des zusätzlichen Parameters der Echoweite. Auf diesem DGM kann man die niedrige Vegetation und die wichtigsten Eigenschaften dieses Gebiets erkennen z.B. den Obelisk oder die Fußwege. Die anderen

Bilder zeigen, dass weder die mittlere Vegetation noch die Wanderwege zu sehen sind (an diesen Stellen ist die Oberflächenrauigkeit am geringsten). Die DGMe sind unscharf und die wichtigsten Oberflächeninformationen nicht mehr enthalten. Das beste Ergebnis liefert die letzte Abbildung, weil die Oberflächeninformationen z.B. Wanderwege zu sehen sind. Daraus folgt, dass der Grenzwert nicht niedriger als 1,750 ns festgelegt werden sollte. Die größte Wahrscheinlichkeit einen Grenzwert der Echoweite der Bodenpunkte zu finden, liegt in der statistischen Berechnung. Wie schon früher in Tabelle 4 erwähnt, stimmen die Modalwerte mit den Medianwerten und dem Mittelwert im Fall niedriger Vegetation überein. Die Lösung kann man nur anhand eines Beispiels finden. Daher ist es interessant, DGMe mit einer Echoweite kleiner oder gleich 1,764 ns und 1,757 ns gegenüberzustellen.

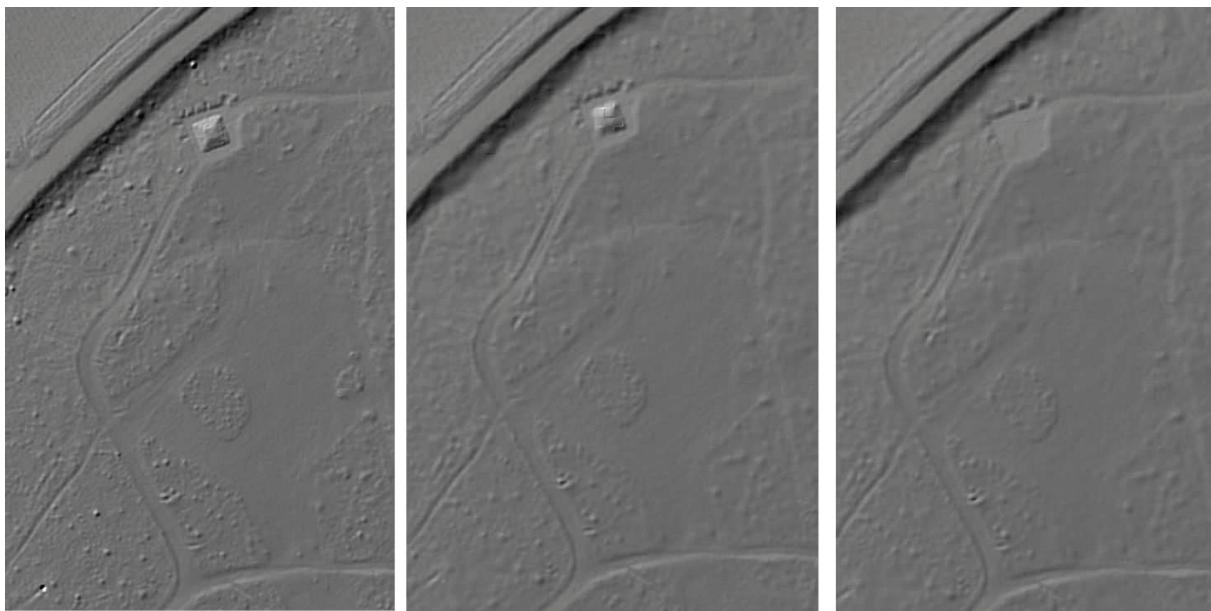


Abbildung 39: DGM-Schummerung ohne Berücksichtigung der Echoweite (links), DGM-Schummerung nach der Eliminierung der Echoweite über 1,764 ns (Mitte) und 1,757 ns (rechts).

Die beiden Ergebnisse unterscheiden sich am Standort des Obelisken sehr (siehe Abb. 39). Die Echoweite in Höhe von 1,764 ns ist in der Tabelle mehrmals vorgekommen, aber die Echoweite mit einem Wert von 1,757 ns liefert ein besseres Ergebnis. Man kann jetzt schon sagen, dass die letzte Abbildung akzeptabel ist. Die Echoweite in Höhe von 1,757 ns liefert ein gutes DGM.

Die Verwendung der Teststudie von Doneus und Briese (2006) zeigte, dass die Klassifikation der ALS-Punkte mit den Standardalgorithmen, welche die geometrische Relation zwischen benachbarten Punkten berücksichtigen, sich nicht für Bereiche mit niedriger Vegetation

eignet. Deswegen schlugen sie einen zusätzlichen Vorfilterschritt vor, der alle Echos mit einer erheblich höheren Echobreite eliminiert.

Um den statistisch berechneten Grenzwert in Höhe von 1,757 ns (siehe Tabelle 4 - Modalwert) als Endergebnis anerkennen zu können, werden anhand eines Beispiels mit zwei unterschiedlichen Testgebieten weiteren Untersuchungen durchgeführt. Auf der Abbildung 40 kann man die gekennzeichneten Testgebiete 1 und 2 sehen. Innerhalb dieser Testorte wird die Fähigkeit der Echoweite zur Verbesserung der DGMe untersucht.

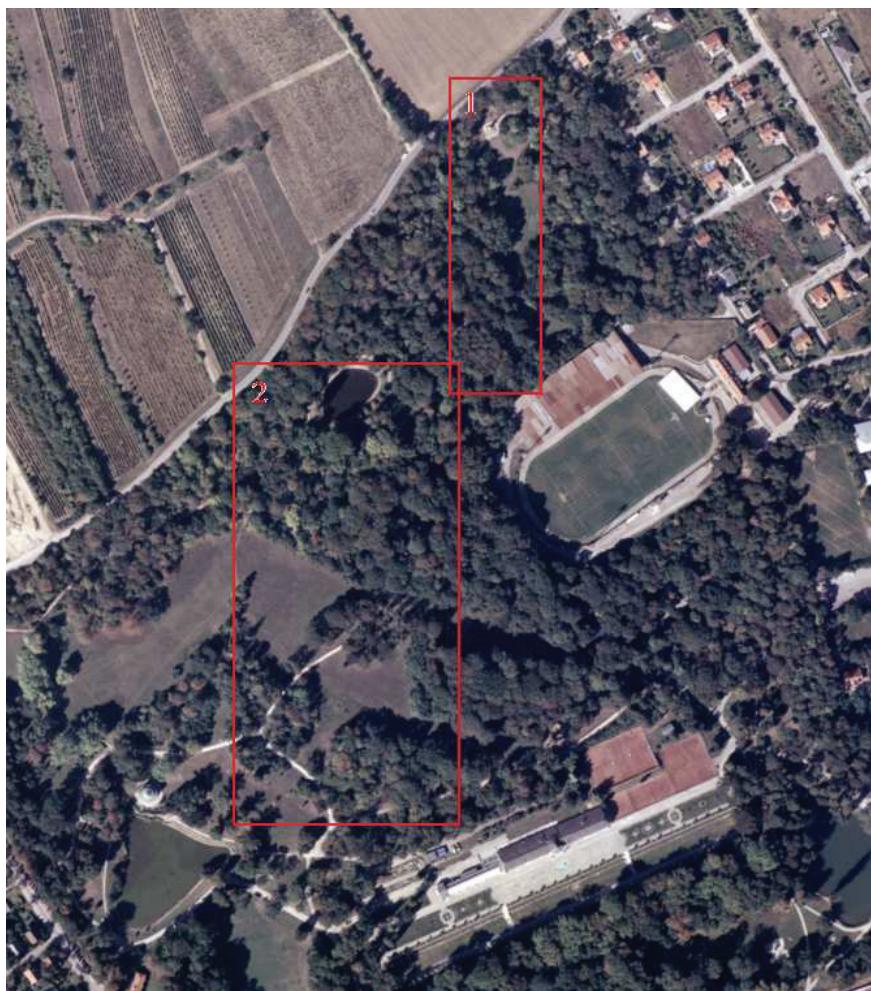


Abbildung 40: Orthophoto vom Schlosspark Eisenstadt. [Burgenländische Landesregierung - Abteilung Geoinformation, 2008]

Das nördliche Testgebiet hat eine Ausdehnung von 70 m von Osten nach Westen und von 230 m von Norden nach Süden, es umfasst also eine Fläche von ca. 16 100 m². Gekennzeichnet ist es hauptsächlich durch den Obelisken, der sich im nördlichen Teil und am höchsten Punkt des Schlosssparks befindet. Im südlichen Bereich sind kleine Waldgebiete und freie Flächen vorhanden (siehe Abb. 40).

Das westliche Testgebiet ist größer als das nördliche (siehe Abb. 40). Es hat eine Größe von 170 m in Ost-West- und 350 m in Nord-Süd-Richtung, es umschließt eine Fläche von 59.500 m². Im Norden befindet sich ein kleiner Teich. Gebäude sind kaum vorhanden. Kennzeichnend sind mehrere Waldbereiche, Büsche und dünn bewachsene Flächen.

Alle DGMe, die in diesem praktischen Teil vorkommen, sind auf der Basis der letzten zum Empfänger kommenden Echosignale abgeleitet. Die Rasterweite beträgt 0,25 m.

Auf den nächsten Seiten sind die zwei Untersuchungsgebiete dargestellt. Es werden verschiedene Art von Abbildungen in dieser Reihenfolge dargestellt:

- Orthophoto,
- Übersicht über Geländebeschaffenheit,
- Feldskizze,
- Modell der Echoweite ohne Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo – Einfärbung der Echoweite,
- DOM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo,
- DOM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo,
- Differenz Modell von DOM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe),
- DGM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo,
- DGM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo,
- Differenz Modell von DGM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe),

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 41: Orthophoto (Testfläche 1).

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 422: Übersicht über die Geländebeschaffenheit im südwestlichen Teil der Testfläche 1.

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 433: Feldskizze (Testfläche 1 – Wegkreuzung in südwestliche Teil).

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 44: Modell der Echoweite ohne Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo – Einfärbung der Echoweite (Testfläche 1),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 45: DOM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 1),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 46: DOM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 1),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 47: Differenz Modell von DOM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe - Testfläche 1),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 48: DGM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 1),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 49: DGM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 1),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 50: Differenz Modell von DGM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe - Testfläche 1),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 51: Orthophoto (Testfläche 2),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 522: Übersicht über die Geländebeschaffenheit im nördlichen Teil der Testfläche 2.

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 533: Feldskizze (Testfläche 2 – Obelisk in nördliche Teil),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 54: Modell der Echoweite ohne Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo – Einfärbung der Echoweite (Testfläche 2),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 55: DOM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 2),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 56: DOM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 2),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 57: Differenz Modell von DOM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe - Testfläche 2),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 58: DGM vor Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 2),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 59: DGM nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Testfläche 2),

Marta Walicht

Topographische Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning

Verbesserte Digitale Geländemodelle mittels full-waveform ALS-Daten

Abbildung 60: Differenz Modell von DGM ,vor und nach Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Höhe - Testfläche 2),

Marta Walicht

7.4. Beurteilung der Ergebnisse

Ziel war es zu überprüfen, ob die Erreichung einer verbesserten DGM-Erstellung vor allem in Bereichen niedriger Vegetation möglich ist.

Das DGM sollte besonders im Bereich bodennaher Vegetation untersucht werden. Mit Kenntnis der Topographie ist es möglich, vom Gelände abweichende Höhen als Geländerauigkeit zu erkennen. Mit Hilfe der beiden Feldskizzen können die Geländehöhen erkannt werden.

Auf der Abbildung 44 und 54, auf dem ein Modell der Echoweite ohne Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo (Einfärbung der Echoweite) zu sehen ist, können die Bereiche mit Vegetation ziemlich genau erkannt werden - hohe Vegetation , die große Werte der Echoweite aufweist, ist braun dargestellt.

In Vegetationsgebieten kann eine Aussage über die Geländegestalt nur hypothetisch gemacht werden. Der bestimmte Grenzwert der Echoweite sollte kritisch betrachtet werden. Es wäre sinnvoll, die gelöschten 3D-Punkte mit der Echoweite größer als 1,757 ns genau zu analysieren.

Es ist problematisch, das Gelände korrekt zu approximieren. Die Methode der Robusten Interpolation hat hier die tiefsten Punkte stark gewichtet, wovon typischerweise immer ausgegangen werden kann. Ob ein Punkt tatsächlich die Geländeoberfläche erreicht oder wenige Dezimeter über dem Boden auf der Vegetation liegt, kann auch hier nicht gesagt werden. Denn es müssen Stützpunkte in der näheren Umgebung vorhanden sein, die tatsächlich auf der Geländeoberfläche liegen. Ist auch hier eine flächendeckende Vegetation vorhanden, wird diese ebenfalls nicht eliminiert, so dass es auch hier zu systematischen Fehlern kommen kann.

Man kann vermuten, dass das Entfernen von Obeliskpunkten der realen Geländeoberfläche entspricht, welche ohne Obelisk vorhanden wäre.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Digitale Geländemodell großflächig der Realität entspricht. Doch weisen einzelne Bereiche Probleme auf. Ursache kann die angewandte Filtermethode sein. Diese wird zwar einheitlich durchgeführt, doch können durchaus falsch klassifizierte Höhenwerte im Geländemodell enthalten sein, da es nicht möglich ist, jeden Punkt des Oberflächenmodells zu kontrollieren. Hier muss ein Kompromiss zwischen Arbeitsaufwand und den erwünschten Ergebnissen gefunden werden. Die fehlerfreie Filterung und Interpolation der DGMe ist meiner Meinung nach kaum möglich.

Wie in dem Beispiel in Abschnitt 3 ersichtlich ist, ermöglicht die zusätzliche FWF-Information auf Basis der Echoweite eine zuverlässigere Klassifizierung von Echos, die aus der Interaktion mit niedriger Vegetation stammen. Für die Klassifizierung und DGM Erstellung wäre es allerdings interessant auch noch weitere Informationen zu bestimmen (Genauigkeit der Entfernungsmessung, Zuverlässigkeit der Echoweite, backscatter cross section, Analyse der Residuen der FWF-Daten in Bezug zu dem bestimmten Modell der Wellenform, etc.). Um das Potential von FWF-ALS-Systemen, die weitere Informationen zum jeweiligen bestimmten Echo zur Verfügung stellen können, abschätzen zu können, sind weitere Untersuchungen der gespeicherten FWF-Information und ein detailliertes Verständnis der Interaktion des Laserstrahles mit den natürlichen Oberflächen notwendig.

8. Zusammenfassung

ALS ist eine noch sehr junge Technik, welche erst seit ca. 10 Jahren als kommerziell einsetzbares Messverfahren verfügbar ist. Das Verfahren hat sich in erstaunlich kurzer Zeit als Standard für eine Reihe von Anwendungsgebieten etabliert. Hochauflösende genaue DGMe werden oft aus Flugzeuglaserscannerdaten generiert. Gleichzeitig hat sich das Verfahren in den letzten 10 Jahren rapide entwickelt. Dies wird vor allem bei der Betrachtung der Datenrate offensichtlich, welche von 2 kHz bei den ersten Systemen Mitte der 90er Jahre, auf nunmehr 200 kHz bei aktuellen Systemen gesteigert werden konnte. Parallel zu der Entwicklung in der Sensor-technologie wurde eine Reihe von Verfahren der automatischen Datenverarbeitung entwickelt. Die Kombination leistungsfähiger Messsysteme mit Verfahren der automatischen Extraktion von dreidimensionaler Information aus Punktwolken hat - über die Standardanwendungen im Bereich der Generierung der DGMe hinaus - für die Erschließung neuer Marktsegmente gesorgt. Aktuelle Beispiele hierfür sind die Überwachung von Hochspannungsleitungen und der Datenerwerb in Anwendungen der Forstwirtschaft. Ein sehr großes, wenngleich derzeit noch nicht vollständig erschlossenes Potential liegt in der automatischen Generierung von 3D-Gebäudemodellen.

In dieser Master-Thesis ist gezeigt worden, welche Eigenschaften die Echoweite auf die Datenverarbeitung und DGM Erzeugung hat. Während Diskrete-ALS-Systeme nur die Koordinaten des Punktes liefern, beruhen FWF-Systeme auf dem Konzept der zusätzlichen Speicherung eines Attributs zu jeder Punktwolke. Die Verbesserung der DGM-Erzeugung basiert auf der Eliminierung von 3D-Punkten mit der Echoweite größer als 1,757 [ns]. Das vorgeschlagene Konzept muss zukünftig geprüft werden (z.B. Kontrollmessungen). Es ist notwendig, die zusätzlich bereitgestellten Parameter ausführlich zu studieren. Die gezeigten Resultate stellen dar, dass die zu jedem Echo zusätzlichen Informationen zur DGM-Ermittlung und für andere modellierende Aufgaben nützlich sein können. Es werden bestimmte Algorithmen gefunden, die die zusätzlichen Informationen pro Echo kombinieren und zur DGM Verbesserung führen. Wie aus dem praktischen Beispiel des vorigen Kapitels ersichtlich ist, erkennt man die signifikante Verbesserung der Geländemodellierung durch Ausnutzung der aus den FWF-Daten abgeleiteten Echoweite. Allerdings sollte der Ansatz zur Vorelimination der Punkte nur einmal das Potential dieser Zusatzinformation ausloten und zu einer raschen Lösung für die DGM-Interpretation führen.

Die Verwendung von FWF-ALS besitzt folgende Eigenschaften:

- zuverlässigere und genauere Aufnahme der Oberfläche im Vergleich mit Diskrete-ALS-Systemen abhängig von Oberflächenbeschaffenheit,
- die Fähigkeit, eine große Anzahl von Zielen in jedem reflektierten Signal zu lokalisieren,
- noch bessere Messungen der Vegetationshöhe, Form, Dichte und des vertikalen Umfangs als mit Diskrete-ALS-Systemen,
- zuverlässigere Abfragung mehrfacher Punkte in niedriger Vegetation,
- die Zieltrennung mit FWF-ALS-System z.B. von Firma „Riegl“ ab 0,5 m ist möglich,
- die Erkennung der Oberflächenrauigkeit.

Zumindest ein paar der Parameter (Intensität, GPS-Zeitstempel pro reflektiertem Echo, Amplitude und Echoweite) werden im binären 1.2. LAS-Format gegeben, welches im ASPRS enthalten ist (siehe Kapitel 5.4.). Bis jetzt gibt es keinen Standard für den Austausch von FWF-ALS-Daten.

Welchen Einfluss hat der Querschnitt jedes Echos („cross section“ (m^2)- Information die mit einem sehr begrenzten Anteil zurückkommt) auf die Daten? Kann der Reflexivitätswert natürlicher Oberflächenwerte Annahmen über das Ziel geben? Die größte Herausforderung ist festzustellen, ob die FWF-Informationen eine bessere Interpretation von Laserdaten ermöglichen. Die gespeicherten Zusatzinformationen zu jedem Echo sind in der Praxis weiter zu prüfen und zu diskutieren.

Während die Kapazität der modernen Festplatten für die Speicherung von FWF-ALS Daten auch während Flüge einiger Stunden ausreichend ist, erfordert der Download und das Nachbearbeiten dieses Datenvolumens mehr Zeit als bei herkömmlichen Systemen. Die FWF-ALS-Daten Menge ist groß und kann sich durch z.B. eine Abtastrate 200 kHz steigern. Bis jetzt gibt es keine spezielle Datenbank für FWF-ALS-Daten. Es sind Datenbanken gefragt, die die hohen Anforderungen bei der Datenbearbeitung erfüllen.

Weitere Untersuchungen der funktionsfähigen Parameter wie Echoweite und Amplitude sind notwendig, um das Potential dieser Technologie zur Gänze auszunützen. Auch Entwicklungen sind im Umgang mit sehr großem Datenvolumen gefragt, die durch die Verwendung des FWF-ALS-Prozesses erzeugt werden können. Es werden leistungsfähige Mittel benötigt, um Informationen automatisch extrahieren und zur Verfügung stellen zu können.

Literaturverzeichnis

[Andersen et al., 2005]

Andersen, H.-E., McGaughey, R., Reutebuch, S.: Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 94 (6), 2005 S. 441—449.

[Axelsson, 2000]

Axelsson, P.: DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive Tin Models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, B4, S. 111–118

[BEV, 2008]

Burgenländische Landesregierung - Abteilung Geoinformation

[Burman, 2002]

Burman, 2002. Laser Strip Adjustment for Data Calibration and Verification. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34/3, Graz, Austria.

[Blair, Rabine und Hofton, 1999]

Blair, B., Rabine, D., Hofton M.: The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, (54) S. 115-122

[Blair und Hofton, 1999]

Blair, J., Hofton, M.,: Modeling Laser Altimeter Return Waveform Over Complex Vegetation Using High-Resolution Elevation Data. *Geophysical Research Letters* 26 (16), 2509—2512.

[Brandtberg et al., 2003]

Brandtberg, T., Warner, T.A., Landenberger, R.E. and McGraw, J.B., Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density LiDAR data from the eastern deciduous forest in North America. *Rem. Sens. Environ.*, 85 (3), S. 290-303.

[Braumann, 2006]

Braumann B.: Objektorientierte Gebäudedetektion in Laserscannerdaten und multispektralen Bildern (Diplomarbeit); Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Wien 2006.

[Brenner, 2006]

Brenner, C.: Aerial Laser Scanning – Systems, Processing, Applications (Tutorial), in: International Summer School Digital Recording and 3D Modelling, 24-29 April 2006, Greece.

[Bretar et al., 2008]

Bretara, F., Chauvea, A., Malleta, C., Jutzib B.: Managing full waveform LIDAR Data: a challenging task for the forthcoming years.

[Briese, Belada, Pfeifer, 2001]

Briese, Ch., Belada, P., Pfeifer, N.: Digitale Geländemodelle im Stadtgebiet aus Laser-Sanner-Daten. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, 89. Jahrgang, Heft 2, 2001, S. 83 - 91.

[Briese et al., 2001]

Briese, Ch., Kraus, K., Mandlburger, G., Pfeifer, N.: Einsatzmöglichkeiten der flugzeuggetragenen Laser-Scanner; Mitteilungen des Institutes für Geodäsie der Uni Innsbruck, Heft 19: S. 17-26.

[Briese, Pfeifer und Dorninger, 2002]

Briese, Ch., Pfeifer, N., Dorninger, P.: Applications of the Robust Interpolation for DTM determination; Symposium der ISPRS-Comm. III, Volume XXXIV/3A, ISSN: 1682-1750; 55 – 61, Graz 2002

[Briese, Mandlburger, Pfeifer, 2007]

Briese, Ch., Mandlburger, G. Pfeifer, N.: Airborne Laser Scanning - High Quality Digital Terrain Modelling; Talk: Geo-Sibir, Nowosibirsk (invited); 04.25.2007 – 04.27.2007; in: "III International Scientific Congress", ISBN: 978-5-87693-229-7; 79 - 92.

[Briese et al., 2008]

Briese, Ch., Doneus, M., Pfeifer, N., Melzer, F.,: Verbesserte DGM Erstellung mittels Full-Waveform Airborne Laserscanning, DGPF Tagungsband

[Briese, 2008]

Briese, Ch., Vorlesungspräsentation Topographische Modelle, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Österreich

[Ceramer, 2000]

Ceramer, M.: Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, 2000

[Chauve et al., 2007]

Chauve, A., Mallet, C., Bretar, F., Durrieu, S., Pierrot-Deseilligny, M. and Puech, W.,: Processing full waveform lidar data: modelling raw signals. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 39 (Part 3/W52), Espoo, Finland, S. 102–107.

[Diamond, 2008]

Firma Diamond Airborne Sensing GmbH, <http://www.diamond-sensing.com/>, Austria
[Stand: 25.08.2008]

[Dorninger, 2008]

Dorninger, P.: Vorlesung Präsentation Topographische Modelle, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Österreich

[Dubayah und Blair, 2000]

Dubayah, R., Blair, J.: LIDAR Remote Sensing for Forestry Applications, Journal of Forestry 98 (6), S. 44–46.

[Ducic et al., 2006]

Ducic, V., Hollaus, M., Ullrich, A., Wagner, W., Melzer, T.: 3D Vegetation mapping and classification using fullwaveform laser scanning. In: EARSeL and ISPRS Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry- Vienna, S. 211–217.

[Duong, Pfeifer, Lindenbergh, 2006]

Duong, H., Pfeifer, N., Lindenbergh, R.: Full waveform analysis: ICESAT laser data for land cover classification. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 36 (Part 7). Enschede, Netherlands.

[Filin, 2002]

Filin, S.: Recovery of systematic biases in laser altimetry data using natural surfaces. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69.

[GeoCue, 2008]

Firma GeoCue Corporation, <http://www.geocue.com/>, USA [Stand: 25.08.2008]

[GeoLAS Consulting, 2008]

Firma GeoLAS Consulting, <http://www.geolas.com/>, Deutschland [Stand: 25.08.2008]

[Gross, Jutzi, Thoenessen, 2007]

Gross, H., Jutzi, B., Thoenessen, U.: Segmentation of Tree Regions using Data of a Full-Waveform Laser. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 36 (Part 3/W49A). Munich, Germany, S. 57–62.

[Holmgren und Persson, 2004]

Holmgren, J., Persson, A.: Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. Remote Sensing of Environment 90 (4), S. 415—423.

[Huisng, Gomes Pereira, 1998]

Huisng, J., Gomes Pereira, L.: Errors and accuracy estimates of laser data acquired by

various laser scanning systems for topographic applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 53, No. 5, pp. 245-261
[Hug, Ullrich und Grimm, 2004]

Hug, C., Ullrich, A. and Grimm, A.: LiteMapper 5600 – A Waveform-Digitizing LIDAR Terrain and Vegetation Mapping System, IAPRS Vol. XXXVI Part 8/W2, S. 24 – 29

[Hug, Ullrich und Grimm, 2004]

Hug, C., Ullrich, A., Grimm, A., 2004. Litemapper-5600 –A Waveform-Digitizing LIDAR Terrain and Vegetation Mapping System. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 36 (Part 8/W2). Freiburg, Germany, S. 24—29.

[Hug, 1996]

Hug, Ch., 1996: Entwicklung und Erprobung eines abbildenden Laseraltimeters für den Flugeinsatz unter Verwendung des Mehrfrequenz-Phasenvergleichsverfahrens. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 457, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. ISBN 3-7696-9500-3.

[Hyyppä, Litkey, Yu, 2004]

Hyyppä, J., Hyyppä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönnholm, P., Pyysalo, U., Juho Pitkänen, J. and Maltamo, M.: Algorithms and Methods of Airborne Laser-Scanning for Forest Measurements. In International conference "Laserscannersfor Forest and Landscape Assessment". Vol. 36 (Part 8/W2), S. 82-89.

[Hyyppä et al., 2001]

Hyyppä, J., Kelle, O., Lehikoinen, M., Inkkinen, M., 2001: A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, S. 969-975

[Ingeniurgesellschaft für interfaces GmbH, 2008]

Ingeniurgesellschaft für interfaces GmbH, <http://www.igi-systems.com>, [Stand: 25.08.2008]

[INPHO GmbH, 2008]

INPHO GmbH, www.inpho.de, [Stand: 25.08.2008]

[Kager, 2003]

Kager, H.: Simultaneous Georeferencing of Aerial Laser Scanner Strips, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 91. Jahrgang, Heft 4/2003, S. 235 – 242. VGI, Wien.

[Kager, 2004]

Kager, H.: Discrepancies Between Overlapping Laser Scanner Strips - Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. Proceedings XXth ISPRS Congress, Istanbul, Vol. XXXV, Part B/1, S. 555-560.

[Koch, 1999]

Koch, A.: Analyse und Aufbereitung von Laser-Scanner-Aufnahmen (Diplomarbeit), Universität Hannover.

[Kager und Kraus, 2001]

Kager, H., Kraus, K.: Height Discrepancies between Overlapping Laser Scanner Strips - Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. Proceedings of the 5th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Wien

[Kraus, 2000]

Kraus, K.: Hochgenaue Geländemodelle für hydrologische Problemstellungen. Veröffentlichung der Bundesanstalt für Gewässerkunde anlässlich des Kolloquiums "Modellierung von Höhendaten für hydrologische Fragestellungen" in Koblenz, 2000

[Kraus, 2004]

Kraus, K.: Photogrammetrie. Band 1 (Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen). – 7. Aufl., Walter de Gruyter GmbH & Co. Verlag, Berlin 2004.

[Kraus, 2004]

Kraus, K.: Derivation of Digital Terrain Models from Airborne Laserscanner Data; Talk: Vortragsreihe an der TU Budapest, Budapest (invited); 06-10-2004.

[Kraus und Pfeifer, 1997]

Kraus, K., Pfeifer, N.: A New Method for Surface Reconstruction from Laser Scanner Data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 32, Part 3-2W3, pp. 80 - 86, Haifa, 1997.

[Kraus und Pfeifer, 1998]

Kraus, K., Pfeifer, N: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal, Volume 53, 1998, S. 193 – 203

[Kremer, 2001]

Kremer, J.: CCNS and AEROcontrol: Products for Efficient Photogrammetric Data Collection, Photogrammetric Week'01, Fritsch/Spiller (Eds.), Wichmann Verlag, Heidelberg: 2003 S. 85-92

[Kremer, 2005]

Kremer, J.: Laser pulse analysis for reconstruction and classification of urban objects. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 34 (Part 3/W8), S. 151–156.

[Lefsky et al., 1999]

Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Acker, S.A., Parker, G.G., Spies, T.A. and Harding, D.: LiDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70(3): S. 339-361.

[Leica, 2008]

Leica Camera AG, <http://www.leica-camera.com/> [Stand: 25.08. 2008]

[Landtwing, 2005]

Landtwing, S.: Airborne Laser Scanning, (Diplomarbeit), Technische Hochschule Zürich

[LibLas.org]

LAS Format: <http://www.liblas.org/> [Stand: 25.08.2008]

[Maas, 2005]

Maas, H.-G.: Aquisition von 3D Daten durch Flugzeuglaserscanning Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Kartographische Nachrichten, Vol. 55, Heft 1, S. 3 – 11

[Mallet, Soergel, Bretar, 2008.]

Mallet, C., Soergel, U., Bretar, F., 2008. Analysis of fullwaveform LiDAR data for an accurate classification of urban areas. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 37 (Part 3A) Beijing, China.

[Means, Acker, Harding, Blair, Lefsky, 1999]

Means, J., Acker, S., Harding, D., Blair, J., Lefsky, M., Cohen, W., Harmon, M., McKee, W., 1999. Use of large-footprint scanning airborne LiDAR to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 67(3), pp. 298—308.

[Medvedev, 2004]

Medvedev, E.: Towards the full Automation of laser Scanning and Aerial Photogrammetry Data Processing“, Proceedings of the XXth, ISPRS Congress, Instanbul, Juli 2004

[Murtagh, Foote, 1999]

Murtagh, J., Foote, M., 1999: A practical application of laserscanning in the insurance industry. Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference, Ottawa, 21.- 24.6.99, Vol. I, S. 582-588

[NASA, 2008]

National Aeronautics and Space Administration, <http://www.nasa.gov/>, [Stand: 25.08. 2008]

[Naesset und Bjerknes, 2001]

Naesset, E. and Bjerknes, K.-O.: Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 78(3): S. 328-340.

[Persson und Soderman, 2002]

Persson, A., Holmgren, J. and Soderman, U.: Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(9): 925-932.

[Persson et al., 2005]

Persson, A., Söderman, U., Töpel, J., Alhberg, S.: Visualization and Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanner Data. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 36 (Part 3/W19).

[Pfeifer, 2003]

Pfeifer, N.: Oberflächenmodelle aus Laserdaten; *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, 91. Jahrgang (2003), 4; S. 243 - 252.

[Ress, 2001]

Rees, W. G.: *Physical principles of remote sensing*. Cambridge University Press, Cambridge .

[Reitberger, Krzystek, Stilla, 2006]

Reitberger, J., Krzystek, P., Stilla, U.: Analysis of fullwaveform LiDAR data for tree species classification. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 36(Part 3). Bonn, Germany, S. 228—233.

[Riegl, 2008]

Riegl Laser Measurement Systems GmbH, <http://www.riegl.com> [Stand: 25.05.2008]

[Ries, 2004]

Ries, Ch.: Ein Algemeiner Ansatz zur Georeferenzierung von multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen (Diplomarbeit), Technische Universität Wien

[Schardt et al., 2002]

Schardt, M., Ziegler, M., Wimmer, A., Wack, R., Hyppä, J.: Assessment of Forest Parameters by Means of Laser Scanning. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 34-3A, S. 302

[Schiele, 2005]

Schiele, O.- J.: Ein operationelles Kalibrierverfahren für das flugzeuggetragene Laserscannersystem ScaLARSInstitut für Navigation (Diplomarbeit) ,Universität Stuttgart

[SCOP++ Handbuch, 2003]:

Das Geländemodellprogramm SCOP; Benutzerhandbuch des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien (<http://www.inpho.de/>).

[Sithole undVosselman, 2003]

Sithole, G., Vosselman, G.: Comparison of filtering algorithms. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden 2003.

[Terrasolid, 2008]

Firma Terrasolid, <http://www.terrasolid.fi/>, Finland [Stand: 25.05.2008]

[Toposys, 2008]

Firma Toposys GmbH, www.toposys.de, Deutschland [Stand: 25.05.2008]

[Vosselmann und Maas, 2001]

Vosselmann, G., Maas, H.: Adjustment and Filtering of Raw Laser Altimetry Data. Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden.

[Vosselman und Maas, 2001]

Vosselman, G., Maas, H.-G.: Adjustment and Filtering of Raw Laser Altimetry Data. Proceedings OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, OEEPE Publication Nr. 40

[Wagner, 2006]

Wagner, W.: Laser and Radar Remote Sensing; Talk: Institute of Remote Sensing Applications, Beijing; 06-16-2006

[Wagner, 2006]

W. Wagner: Soil moisture: Synergistic approach for the merge of thermal and ASCAT; Talk: LandSAF Workshop, Instituto de Meteorologia, Lisbon, Portugal (invited); 03-09-2006.

[Wagner, Ullrich, Briese, 2003]

Wagner. M., Ullrich, A., Briese, Ch.: Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche; Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 4; S 223 - 235.

[Wagner et al., 2006]

Wagner W, A Ulrich, V. Ducic, T. Melzer, N Studnicka: Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner; ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60 (2006), 2; 100 - 112.

[Wagner et al., 2008]

Wagner, M Hollaus, C. Briese, V. Ducic: 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners; International Journal of Remote Sensing, 29 (2008), 5; 1433 - 1452.

[Wehr und Lohr, 1999]

Wehr, A., U. Lohr: Airborne laser scanning – an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 54:68-82.

[Wikipedia, 2008]

Wikipedia - online Enzyklopädie, <http://de.wikipedia.org/> [Stand: 25.08.2008]

[Würländer und Wenger-Oehn, 2007]

Würländer, R. und Wenger-Oehn, K.: Die verfeinerte Georeferenzierung von ALS-Daten – Methodik und praktische Erfahrungen

[Yu et al., 2004]

Yu, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Maltamo, M.: Automatic Detection of Harvested Trees and Determination of Forest Growth Using Airborne Laser Scanning. Remote Sensing of Environment 90 (4), S. 451--462.

Anhang

I. Begriffsdefinitionen

II. Produktbereiche