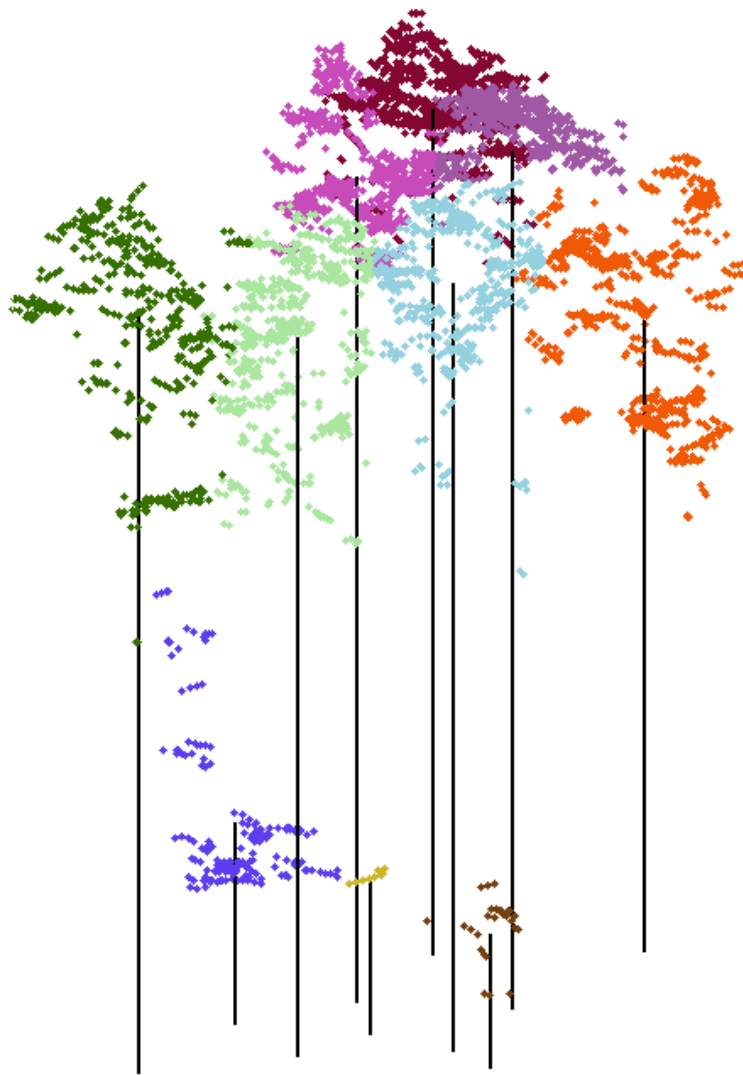


# Extrahierung der 3D-Struktur von Einzelbäumen aus LiDAR-Daten

Durchgeführt auf einer Testfläche eines Mischwaldgebietes im Sihlwald



**Masterarbeit von Frank Fischer**

**Masterarbeit**  
**Remote Sensing Laboratories RSL**  
**Geographisches Institut der Universität Zürich**

# **Extrahierung der 3D-Struktur von Einzelbäumen aus LiDAR-Daten**

---

Durchgeführt auf einer Testfläche eines Mischwaldgebietes im Sihlwald

Frank Fischer  
Untere Rheingasse 7  
CH-8245 Feuerthalen  
Tel.: +41 79 286 23 60  
frankfischer@gmx.ch  
s98615420

Fakultätsmitglied:  
Prof. Dr. Michael E. Schaepman

Betreut durch:  
Dr. Felix Morsdorf & Mag. Geogr. Ronald Schmidt

31. Januar 2011

GEO 511



## Vorwort

Die Redewendung „**Den Wald vor lauter Bäumen nicht mehr sehen...**“ hat für mich in den letzten Monaten, in welchen ich an dieser Masterarbeit geschrieben habe, eine besondere Bedeutung erhalten. Unzählige Teilprobleme, welche der Sicht auf das grosse Ganze im Wege standen, mussten gelöst, Alternativen gesucht und Kompromisse eingegangen werden. Im Rahmen dieser Arbeit möchte ich an dieser Stelle einen speziellen Dank an meinen Betreuer Felix Morsdorf aussprechen für die kompetente, unkomplizierte und immerwährende Unterstützung während der letzten Monate. Felix, allerherzlichsten Dank. Auch möchte ich mich bei Andreas Zingg von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und dem Wildnispark Zürich Sihlwald für das Bereitstellen der Daten bedanken. Weiter möchte ich mich bei Ronald Schmidt und natürlich bei Professor Michael Schaepman bedanken, welcher mir diese Arbeit am RSL ermöglicht hat. Für das kritische Lektorat und das Korrekturlesen möchte ich mich bei Denise Witzig, für den IT-Support bei Patrick Fischer und für die Einführungsstunden in Matlab bei Thomas Ott und Christian Gschwend herzlich bedanken.

In Bezug auf mein Bachelor- und Masterstudium an der Universität Zürich, in welchem die vorliegende Masterarbeit den Abschluss bildet, möchte ich den folgenden Personen meinen Dank aussprechen, ohne die mein Studium in dieser Form nicht machbar gewesen wäre. Meiner Mutter Ines Fischer möchte ich hier für die grossartige Unterstützung in allen Bereichen über die letzten Jahre danken. In finanziellen Dingen gilt mein spezieller Dank Rosario Clemente, welcher mir eine grosse Last abgenommen hat. Desweiteren möchte ich mich bei Peter Leu und Renato Chiozza von der Cilag AG bedanken, welche sich immer und immer wieder erfolgreich für meine auslaufenden Personalanträge stark gemacht haben, was mir wiederum ermöglichte einen grossen Teil meines Studiums und meines Lebensunterhaltes selbst zu finanzieren. Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Studienkollegen und Freunden bedanken, welche mich über die letzten Jahre begleitet haben und immer für ein abwechslungsreiches und interessantes Ausgleichsprogramm sowohl zum universitären Betrieb, als auch zum Arbeitsalltag, gesorgt haben. Die vergangenen Jahre waren eine sehr schöne, lehrreiche aber auch eine sehr intensive Zeit, welche mir noch lange in guter Erinnerung bleiben wird.

Feuerthalen, im Januar 2011

## Zusammenfassung

Der Wald bildet ein für Mensch, Tier und Pflanzen wichtigen Lebensraum. Er hat auf nationaler und internationaler Ebene eine grosse Bedeutung als Holzlieferant, Schutzwaldfunktion und Freizeitraum. Eine nachhaltige Nutzung und der Schutz des Waldes erfordern objektive Informationen. Die Erhebung von Kennwerten und den daraus abgeleiteten Informationen sind von zentraler Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung.

Für die Gewinnung solcher Informationen werden neben den klassischen Forstinventuren immer öfters auch aktive und passive Fernerkundungsverfahren eingesetzt. Diese Verfahren können auf Bestandes- und auch auf Einzelbaumebene eingesetzt werden. In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten der Extraktion der 3D-Struktur von Einzelbäumen aus diskreten LiDAR-Daten in einem 11 Hektaren grossen Testgebiet eines durch Buchen (*fagus sylvatica*) dominierten Mischwaldgebietes im Wildnispark Zürich Sihlwald analysiert. Hierfür standen LiDAR-Daten eines belaubten und auch nichtbelaubten Zeitpunkt zur Verfügung. Für die Validierung der Ergebnisse standen die Daten aller sich auf dem Testgebiet befindlichen Bäume zu Verfügung, welche von der Eidgenössischen Anstalt für Wald, Schnee und Landschaft im Jahr 2005 erhoben und freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden.

Aus den LiDAR-Daten wurden zuerst die normalisierten Vegetationsmodelle in verschiedenen Rasterweiten berechnet, welche anschliessend in mehreren Durchläufen geglättet wurden. Die daraus berechneten lokalen Maxima werden in der darauf folgenden Segmentierung als sogenannte Saatpunkte verwendet. Bei der Durchführung der Segmentierung führte nur die K-Means Clusterung zu einem brauchbaren Ergebnis, nicht aber die Wasserscheidentransformation. Die erzielten Ergebnisse decken sich mit der aktuellen Forschung. Es konnten zwischen 42.43% und 49.12% der Bäume des Untersuchungsgebietes detektiert werden. Um die Daten auszuwerten, mussten diese den Referenzdaten zugewiesen werden. Dieser Prozess ist noch stark fehlerbehaftet, was zusätzlich berücksichtigt werden muss. Weitere Probleme stellt die Detektion der Bäume, welche sich nicht in der obersten Baumschicht befinden und auch Bäume, welche eng beieinander stehen, dar. Die Befliegung im belaubten Zustande liefert einen Mehrwert bezüglich der Positionsgenauigkeit der Bäume, einen kleineren Fehler 1. Art und einer bessere Anzahl Cluster. Die Kombination der beiden Datensätze führt zu einer genaueren Bestimmung der Baumhöhe. Es konnte gezeigt werden, dass die K-Means Clusterung auch in einem Mischwaldgebiet brauchbare Ergebnisse liefert. Diese sind jedoch stark von der Struktur und Charakteristik des Untersuchungsgebietes und der gewählten Parameter abhängig. Es gibt somit speziell auf dem Gebiet der Extrahierung der 3D-Struktur von Einzelbäumen in Mischwaldgebieten noch weiteren Forschungsbedarf.

## Abstract

The forest is an important habitat for plants, animals and human beings. It plays a key role on national and international level as a supplier of timber, as protective forest and leisure space.

The sustainable use and protection of the forest require objective information. The collection and retrieval of information is of crucial importance for the sustainable development of the forest.

In addition to traditional forest inventories, more and more active and passive remote sensing methods are used nowadays. These methods can be used to retrieve information on stand- and single tree level and show a great potential. This work deals with discrete airborne laserscanning data and retrieval of information on single tree level. The data has been captured from an 11 hectare test site located in the Wildnispark Zürich Sihlwald. The test site is situated in a mixed forest dominated by beech (*fagus sylvatica*). Two LiDAR datasets were available, one flown during leaf-on and the other during leaf-off condition of the vegetation. For the validation of the results a dataset with all tree parameters was available and gently provided by the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, which collected the data in 2005.

From the available LiDAR data, the different normalized canopy height models have been generated in various cell sizes and smoothed in several steps. Then the local maxima approach has been applied to identify local maxima, which were used as seedpoints in the following segmentation step. In contrast to the watershed transformation the K-Means Clustering have generated usable results during the segmentation. The received results align with the current research. Between 42.43% and 49.12% of the trees could be identified. In order to analyze the data the reference data and the LiDAR data need to be matched. One must consider, however, that this is a process still generating a lot of mismatches. Furthermore, it is problematic to fully detect small trees and to separate trees standing very close to each other. Data collected during leaf-on condition leads to a higher precision concerning the accuracy of the position of the trees, to a smaller omission error and generates more accurate clusters. The combination of the two data sets leads to a more accurate estimation of the tree heights. It could be shown that the K-Means Clustering leads to usable results in a mixed forest area. However, outcomes highly depend on the structure and characteristics of the study area and on the selected parameterization. There is unquestionably a need for more detailed research in the field of extraction of single tree information in mixed forest areas.

## Inhalt

1	Einleitung .....	1
1.1	Zielsetzung und Forschungsfragen der Arbeit .....	3
1.2	Vorgehensweise und Inhalt der Arbeit .....	4
2	Untersuchungsgebiet, Datengrundlage, Technik und aktuelle Forschung .....	5
2.1	Das Untersuchungsgebiet .....	5
2.2	Datengrundlage .....	10
2.3	System LiDAR .....	15
2.3.1	Auflösungs- und Trennungsvermögen .....	16
2.3.2	Radargleichung.....	17
2.3.3	Interaktion des Laserstrahls mit dem Streukörper.....	19
2.3.4	Genauigkeiten von LiDAR.....	24
2.3.5	Haupteinsatzbereiche LiDAR.....	25
2.3.6	LiDAR in der Forstwirtschaft .....	26
2.3.7	Vor- und Nachteile von LiDAR im Allgemeinen und speziell bei Forstanwendungen .....	28
2.3.8	Weitere Fernerkundungstechniken bei Forstanwendungen.....	30
2.4	Forschungskontext.....	34
3	Methoden.....	39
3.1	Datenvorverarbeitung.....	40
3.2	Höhenmodelle .....	41
3.2.1	DTM.....	41
3.2.2	DSM .....	42
3.2.3	CHM.....	42
3.3	Glättung .....	42
3.4	Lokale Maximum Bestimmung .....	43
3.5	Bestimmung der optimalen Kombination der Rasterweite und Anzahl der Glättungsdurchläufe für die beiden Datensätze 2004 und 2006.....	43
3.6	Segmentierung.....	44
3.6.1	Wasserscheidentransformation.....	44
3.6.2	K-Means Clustering .....	45
3.7	Ableitung des Baumparameters Höhe .....	46
4	Resultate .....	47
4.1	Bestimmung der optimalen Kombination der Rasterweite und Anzahl der Glättungsdurchläufe für die beiden Datensätze.....	47
4.2	Wasserscheidentransformation.....	52
4.3	K-Means Clustering .....	52
4.4	Ableitung des Baumparameters Höhe .....	55

5	Diskussion der Resultate .....	60
5.1	Bestimmung der optimalen Kombination der Rasterweite und Anzahl der Glättungsdurchläufe für die beiden Datensätze.....	60
5.1.1	Vergleich mit anderen Arbeiten .....	61
5.1.2	Schwierigkeiten.....	64
5.2	Segmentierung.....	64
5.2.1	Vergleich mit anderen Arbeiten .....	65
5.2.2	Schwierigkeiten.....	65
5.3	Ableitung des Baumparameters Baumhöhe .....	66
5.3.1	Vergleich mit anderen Arbeiten .....	66
5.3.2	Schwierigkeiten.....	67
6	Fazit.....	68
6.1	Beantwortung der Forschungsfragen.....	69
6.2	Ausblick .....	71
7	Literatur.....	72
A	Glossar.....	80
B	Technische Spezifikationen des Falcon II Sensors und Befliegungsparameter der Datenaufnahme.....	81
C	Clusteranalyse .....	82
D	Baumhöhenvergleich.....	83
	Redlichkeitserklärung.....	84

## Abbildungen

Abbildung 1	Waldefinition nach Schweizerischem Landesforstinventar .....	1
Abbildung 2	Übersichtskarte Wildnispark Zürich Sihlwald im Massstab 1:100'000. ....	6
Abbildung 3	Übersicht Testgebiet im Massstab 1:25'000.....	7
Abbildung 4	Räumliche Verteilung von Laub- und Nadelbäumen im Testgebiet .....	8
Abbildung 5	Baumartenzusammensetzung und Baumhöhenverteilung im Testgebiet.....	9
Abbildung 6	Detaillierte Baumartenzusammensetzung im Testgebiet Birriboden im Jahr 2005.....	10
Abbildungen 7.1-7.3	Einblicke ins Untersuchungsgebiet Birriboden.....	12
Abbildungen 8.1-8.3	Einblicke ins Untersuchungsgebiet Birriboden.....	13
Abbildung 9	Vektorielle Grundgleichung des luftgestützten Laserscannings. ....	15
Abbildung 10	Blockdiagramm eines Laserscanners .....	16
Abbildung 11	Geometrie und Messgrössen in der Radargleichung .....	18
Abbildung 12	Streuquerschnitt eines Körpers mit glatter und rauher .....	20
Abbildung 13	Interaktion des Laserstrahls mit den auf verschiedenen Höhen vorhandenen reflektierenden Oberflächen .....	22
Abbildung 14	Zeitlicher Unterschied zwischen 2 Laserechos .....	23
Abbildung 15	Laserscanningmethoden über bewaldeten Gebieten .....	27
Abbildung 16	Prinzip eines Faserscanners.....	28
Abbildung 17	Fernerkundungstechniken bei Forstanwendungen und deren Anwendung auf Bestandes- und Einzelbaumebene .....	31
Abbildung 18	Ablaufdiagramm der einzelnen Arbeitsschritte.....	40
Abbildung 19	Gauss 3x3 Tiefpassfilter.....	42
Abbildung 20	Funktionsweise einer Wasserscheidentransformation.....	45
Abbildung 21	Kombination von Rasterweite und Anzahl Glättungsdurchläufen 2006.....	47
Abbildung 22	Kombination von Rasterweite und Anzahl Glättungsdurchläufen 2004.....	48
Abbildung 23	Fehler 1.Art und Fehler 2.Art für die jeweiligen Rasterweiten der beiden Datensätze .....	51
Abbildung 24	Ausschnitt eines Clusteranalyseresultats des kombinierten Datensatzes 2004 & 2006 .....	53
Abbildung 25	Ergebnis der Clusteranalyse für den Datensatz 2004 für das gesamte Untersuchungsgebiet des Birribodens.....	54
Abbildung 26	Zwei Baumsegmente des Datensatzes 2006 mit First- und Lastechodaten... 55	
Abbildung 27	Zuweisungsergebnis der aus Laserdaten abgeleiteten Clusterhöhen und den Referenzdaten für den Datensatz 2004.....	56



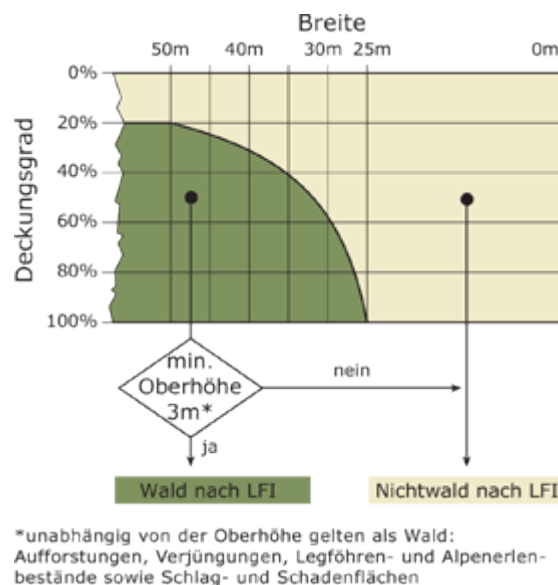
Abbildung 28	Zuweisungsergebnis der aus Laserdaten abgeleiteten Clusterhöhen und den Referenzdaten für den Datensatz 2004.....	57
Abbildung 29	Zuweisungsergebnis der aus Laserdaten abgeleiteten Clusterhöhen und den Referenzdaten für den Datensatz 2006.....	58
Abbildung 30	Zuweisungsergebnis der aus Laserdaten abgeleiteten Clusterhöhen und den Referenzdaten für den kombinierten Datensatz 2004 & 2006.....	58
Abbildung 31	Ausschnitt eines Zuweisungsergebnisses .....	62

## Tabellen

Tabelle 1	Technische Spezifikationen des Laserscanner Falcon II.....	11
Tabelle 2	Technische Spezifikationen des Zeilenscanner Falcon II .....	11
Tabelle 3	Reflexionsgrade unterschiedlichster Materialien .....	21
Tabelle 4	Waldmerkmale und deren Herleitung .....	30
Tabelle 5	Die 4 besten Kombinationsmöglichkeiten 2006 .....	49
Tabelle 6	Die 4 besten Kombinationsmöglichkeiten 2004 .....	49
Tabelle 7	Anzahl Laserechos und Punktdichten innerhalb des Testgebietes .....	52
Tabelle 8	Ergebnisse des K-Means Clustering.....	53
Tabelle 9	Anteil der den Referenzbäumen zugewiesenen Clusterdaten .....	57
Tabelle 10	Positionsabweichungen der den Referenzbäumen zugewiesenen Clusterdaten.....	59
Tabelle 11	Baumhöhendifferenz und Korrelationskoeffizient der den Referenzdaten zugewiesenen Clusterdaten .....	59
Tabelle 12	Mittlere Zuweisungsquote zwischen Baumspitzenkandidaten aus lokalen Maxima und Referenzbäumen auf entsprechenden Testflächen .....	62
Tabelle 13	Fehler 1. und 2. Art für unterschiedliche Rasterweiten und Glättungsdurchläufe für den Datensatz 2004 .....	63
Tabelle 14	Fehler 1. und 2. Art für unterschiedliche Rasterweiten und Glättungsdurchläufe für den Datensatz 2006 .....	63

## 1 Einleitung

Gemäss den neusten Angaben des dritten schweizerischen Landesforstinventars (LFI), das zwischen 2004 bis 2006 durchgeführt und im Frühjahr 2010 veröffentlicht wurde, sind 31% der Fläche der Schweiz bewaldet. Die Definition von Wald im Sinne des LFI stützt sich auf Deckungsgrad, Waldbreite und Oberhöhe der Bestockung. Die nachfolgende Abbildung zeigt, welche Mindestanforderungen für die genannten Kriterien erfüllt sein müssen, damit eine Fläche als Wald gilt. Die Grenzkurve stellt den Zusammenhang zwischen Deckungsgrad und Waldbreite dar. Eine bestockte Fläche mit einem Deckungsgrad von mindestens 20% und einer minimalen Breite von 50m gilt im LFI als Wald. Mit Ausnahme von Jungwaldflächen, Aufforstungen, Schlag-, Sturm- und Schadenflächen sowie mit Legföhren und Alpenerlen bestockten Flächen muss die Bestockung eine Oberhöhe von mindestens 3m aufweisen, um als Wald zu gelten. Es gilt zu beachten, dass die Walddefinition des LFI nicht mit jener des Waldgesetzes übereinstimmt. Dieses bezeichnet Wald, gemäss Artikel 2, als Fläche, die mit Waldbäumen oder Waldsträuchern bestockt ist und Waldfunktionen übernehmen kann.



**Abbildung 1** Walddefinition nach Schweizerischem Landesforstinventar

Diese Waldfläche hat im Vergleich zum zweiten LFI, welches in den Jahren 1993 bis 1995 aufgenommen wurde, um rund 5% oder fast 60'000 Hektaren zugenommen. Diese Zunahme entfällt zu fast 90% auf die Alpenregion und die Alpensüdseite. Schweizweit ist dieser Wald ein wichtiger Lebensraum für Tiere und Pflanzen. Er liefert den Rohstoff für die Holzindustrie, bietet Schutz vor Naturgefahren, wie beispielsweise als Schutzwald gegen Steinschlag, Lawinen und Wind und dient dem Menschen als Freizeitraum. Die Funktion des

Waldes als Holzlieferant und als Schutzwald sind die beiden häufigsten Waldfunktionen und haben auf 74% der gesamten Waldfläche Vorrang. Eine nachhaltige Nutzung und der Schutz des Waldes erfordern objektive Informationen für Politiker, Forscher, Ökologen, Forstpraktiker, die Holzwirtschaft sowie für nationale und internationale Organisationen. Das Schweizerische Landesforstinventar liefert hierfür einen bedeutenden Beitrag und ist eine wichtige Datenbasis für politische und forstwirtschaftliche Entscheide. So bilden die neuen Erkenntnisse die Grundlage zur Überprüfung der im Waldprogramm 2004 bis 2015 festgelegten Ziele des Bundes. Die Resultate fliessen aber auch bei der Erarbeitung einer Biodiversitätsstrategie und bei Anpassungen in der Gesetzgebung zur Raumplanung mit ein. Darüber hinaus liefert das LFI wertvolle Daten für die Waldforschung und Umweltbildung (Brändli, 2010).

Neben der grossen nationalen Bedeutung des Waldes zeigt sich beispielsweise die Wichtigkeit auf internationaler Ebene dadurch, dass die Überwachung und der Bericht über den Zustand des Waldes eine Schlüsselkomponente der Umwelt und nachhaltigen Entwicklungspolitik der Europäischen Union sind (Blaschke et al., 2004). Die Studie European Forest Outlook Study 1960-2000-2020 der vereinigten Nationen aus dem Jahr 2005 kommt zum Schluss, dass Europa in Zukunft mehr Holz benötigt und somit sowohl der Bedarf als auch die Konkurrenz um diesen nachwachsenden Rohstoff in Zukunft zunehmen wird. Somit bilden die aktuellen Inventurergebnisse die Basis für das Management und die Planung der Waldbewirtschaftung sowie für die Beurteilung von ökologischen Aspekten (Desclée et al., 2008).

Im Zuge der aktuellen Diskussion um den Klimawandel und der steigenden Kohlendioxid-Konzentration und der damit verbundenen Änderung des terrestrischen Kohlenstoffkreislaufes und der ebenfalls daraus resultierenden Änderung der in den Wäldern gespeicherten Kohlenstoffvorräte, sind die Wälder auch auf globaler Ebene im Forschungsfokus (Levy et al., 2004; Patenaude et al., 2004; Law, 2005). Für die Erhebung solcher Daten werden verschiedene Fernerkundungsverfahren eingesetzt. Der Einsatz von aktiven und passiven Fernerkundungsverfahren hat sich in den vergangenen Jahrzehnten als wertvolle Informationsquelle für die Kartierung und Überwachung von Wäldern erwiesen (Wang et al., 2008). Im Unterschied zu den passiven Fernerkundungsverfahren, bei welchen die emittierte oder reflektierte Strahlung gemessen wird, wird bei den aktiven Verfahren die verwendete elektromagnetische Strahlung vom Aufnahmesystem selbst erzeugt (Albertz, 2001).

Aufgrund der Multifunktionalität des Waldes ist die Erhebung von Kennwerten und der daraus abgeleiteten Informationen und Erkenntnisse, sowohl auf Einzelbaum- als auch auf

Bestandesebene von zentraler und wichtiger Bedeutung für die nachhaltige Entwicklung dieses für uns alle wichtigen Lebensraumes (Brändli, 2010).

## 1.1 Zielsetzung und Forschungsfragen der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Extrahierung der Struktur von Einzelbäumen und deren Parametern aus den zur Verfügung stehenden LiDAR-Daten eines Mischwaldgebietes. In der Vergangenheit wurden viele Methoden zur Einzelbaumextraktion von verschiedenen Forschergruppen entwickelt. Die meisten Studien wurden dabei auf begrenzten Untersuchungsflächen durchgeführt, deren Baumartenzusammensetzung auf wenige Spezien begrenzt ist (Vauhkonen et al., 2010). Der Anteil der detektierten Bäume variiert dabei stark von 25 bis 90% in Abhängigkeit der angewendeten Methode (Kaartinen und Hyypä, 2008).

Da gemäss Popescu und Wynne (2004) für Laub- respektive Mischwälder erst wenige Untersuchungen zur Einzelbaumerkennung mittels LiDAR-Daten und entsprechend erhobenen Felddaten im Vergleich zu Untersuchungen, welche sich mit Nadelwäldern beschäftigen, zur Verfügung stehen, soll diese Arbeit einen weiteren Beitrag im Bereich der Mischwaldgebiete leisten.

Bisherige Studien in Laub- respektive Mischwaldgebieten, finden sich unter anderem an den folgenden Orten:

- Bayrischer Nationalpark, Deutschland (Heurich, 2008)
- Südkorea (Kwak et al., 2007)
- In der Nähe von Freiburg im Breisgau, Deutschland (Koch et al., 2006)
- Monks Wood National Park, England (Patenaude et al., 2004)

Das Untersuchungsgebiet von dem die Daten für diese Arbeit vorhanden sind, befindet sich im Sihlwald. Ziel dieser Arbeit ist es nun die Einzelbäume der Testfläche möglichst exakt zu extrahieren, lokalisieren und zu segmentieren. Weiter sollen zusätzliche Parameter und Merkmale gewonnen respektive abgeleitet werden, welche es erlauben die extrahierten Bäume mit den Referenzdaten zu vergleichen.

Dabei sollen die folgenden Forschungsfragen im Zentrum der Betrachtung stehen:

- ❖ Kann die 3D-Struktur von Einzelbäumen eines Laubmischwaldgebietes aus Daten, welche mit flugzeuggestütztem Laserscanning mit diskreter Echoaufzeichnung aufgenommen wurden, automatisch extrahiert werden?
- ❖ Stimmen die erzielten Ergebnisse mit derjenigen der aktuellen Forschung auf dem Gebiet der Einzelbaumextraktion in Laubmischwaldgebieten überein? Wo liegen die Grenzen? Wo gibt es Verbesserungspotential?
- ❖ Welche Vorteile ergeben sich durch die Kombination der Datensätze im belaubten und unbelaubten Vegetationszustand im Vergleich zu den solitären Datensätzen?
- ❖ Welche Probleme ergeben sich speziell bei Mischwaldgebieten?

## **1.2 Vorgehensweise und Inhalt der Arbeit**

Zu Beginn dieser Arbeit wird zuerst das Untersuchungsgebiet mit seiner speziellen Charakteristik und die zur Verfügung stehenden Daten, sowie deren Aufnahmeparameter vorgestellt. Daran anschliessend folgt eine ausführliche Darstellung des System LiDAR mit speziellem Fokus auf forstwissenschaftliche Anwendungen. Danach werden die Ergebnisse der aktuellen Forschungsergebnisse und die aktuellsten Entwicklungen auf diesem Gebiet präsentiert. Es folgen die verwendeten Methoden, die erzielten Resultate sowie deren Diskussion. Die Ergebnisse werden in der Reihenfolge der Durchführung vorgestellt. Bei der Diskussion der Resultate, werden diese mit anderen Forschungsarbeiten verglichen sowie die dabei auftretenden Schwierigkeiten aufgezeigt. Zum Abschluss folgt die Zusammenfassung der Ergebnisse sowie der Erkenntnisfortschritt, welcher beim Durchführen der Arbeit gewonnen wurde. Weiter soll im abschliessenden Kapitel auch die angewendete Methodik kritisch hinterfragt, Forschungslücken aufgezeigt sowie ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben werden.

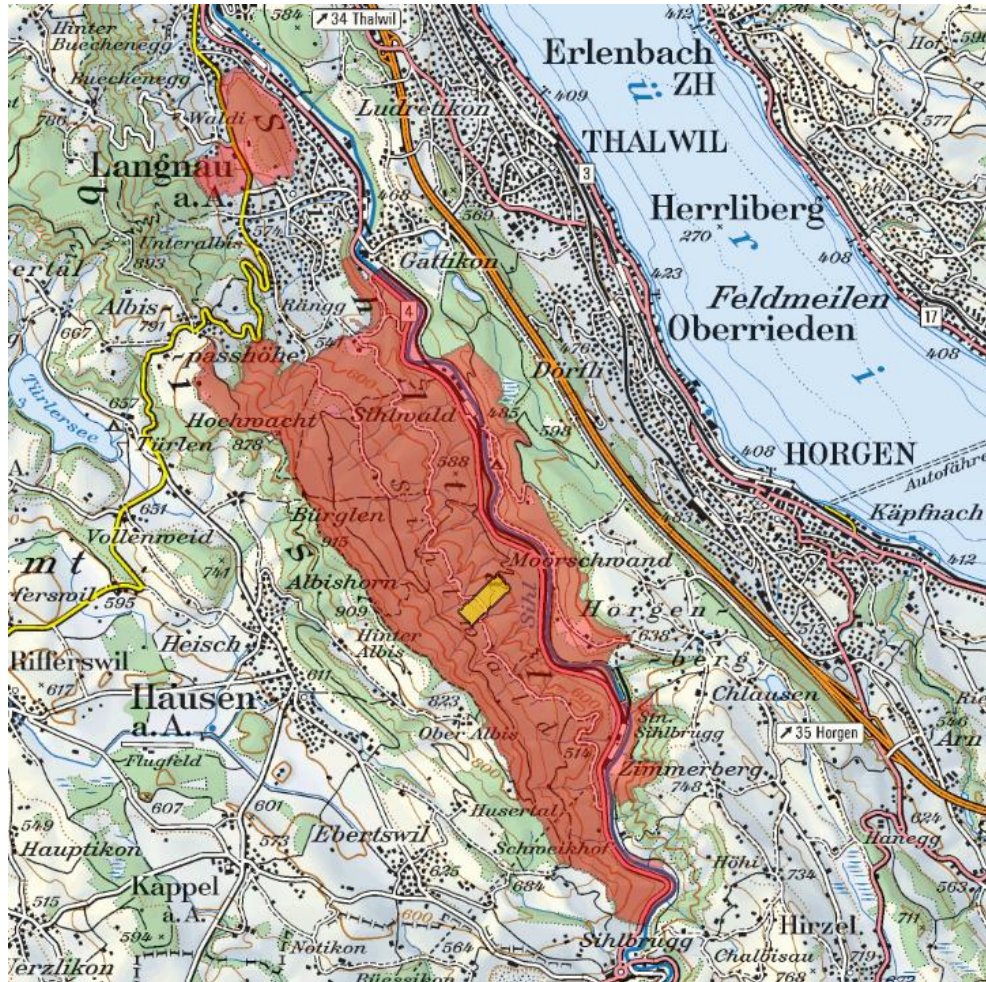
## **2 Untersuchungsgebiet, Datengrundlage, Technik und aktuelle Forschung**

### **2.1 Das Untersuchungsgebiet**

Das Untersuchungsgebiet liegt im Sihlwald, welcher sich rund 10 bis 15 km südlich des Stadtzentrums von Zürich im mittleren Sihltal befindet (Broggi, 1986). Das Sihltal zwischen Sihlbrugg und Langnau am Albis ist eine der wenigen mehr oder weniger urtümlich gebliebenen Landschaftskammern im Schweizer Mittelland. Nur am Talgrund stehen einige Häuser. Der Talgrund wird zusätzlich durch die stark befahrene Sihlstrasse durchschnitten.

Zwischen dem Albis im Südwesten und dem Zimmerberg im Nordosten erstreckt sich eine geschlossene Waldfläche, deren Kernstück der rund 11 Quadratkilometer umfassende Sihlwald ist. Der Sihlwald, welcher zusammen mit dem Langenberg den Wildnispark Zürich Sihlwald bildet, weist einen hohen Naturwert und einen einmaligen landschaftlichen Wert auf und gilt als grösster zusammenhängender Laubmischwald im Schweizer Mittelland. Er ist Teil des Bundesinventars der Landschaften von nationaler Bedeutung. Die Vielfalt des Gebietes ist bedingt durch eine abwechslungsreiche Topographie. Es ist geprägt durch die nacheiszeitliche Erosionstätigkeit der Sihl und der Reppisch, welche von Südost nach Nordwest fliessen und dabei die dazwischen liegende Molassekette überhöhten (Charta Wildnispark, 2010). Daneben durchfurchen zahlreiche Seitenbäche der Sihl mit teilweise wilden Bachtobeln die Hänge. Die Waldlandschaft ist in Rutsch- und Steilhänge, staunasse Standorte und in ausgedehnte, flachgeneigte und fruchtbare Böden gegliedert. Im Sihlwald sind 54 der 67 Waldgesellschaften des Kantons Zürich vertreten. Der grösste Höhenunterschied besteht zwischen der tiefsten Stelle an der Sihl mit 470 m.ü.M und dem höchsten Punkt auf der Albiskette, welcher sich auf 915 m.ü.M befindet (Egger, 2008). Der Wildnispark Zürich Sihlwald weist gemäss dem Geschäftsbericht 2009 insgesamt eine Gesamtfläche von 1175.79 ha auf und liegt zum grössten Teil auf dem Gebiet der Gemeinde Horgen.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Ausdehnung des Wildnisparkes Zürich Sihlwald. Das eigentliche Untersuchungsgebiet ist gelb markiert.



**Abbildung 2**    Übersichtskarte Wildnispark Zürich Sihlwald im Massstab 1:100'000.  
Quelle: Swisstopo.

Seit 1994 schützt die Stiftung Naturlandschaft Sihlwald, welche 2008 in die Stiftung Wildnispark Zürich überführt wurden, den Sihlwald in ihrem Zweckartikel:

„Die Stiftung Naturlandschaft Sihlwald hat den Zweck, die Entwicklung der charakteristischen Landschaft, die vom Albisgrat, dem Sihlwald und dem Flusslauf der Sihl gekennzeichnet ist, in dem Sinne zu fördern, dass die natürlichen und naturnahen Ökosysteme samt ihrer charakteristischen Tier- und Pflanzenwelt erhalten werden. Das Wirken der natürlichen Umweltkräfte



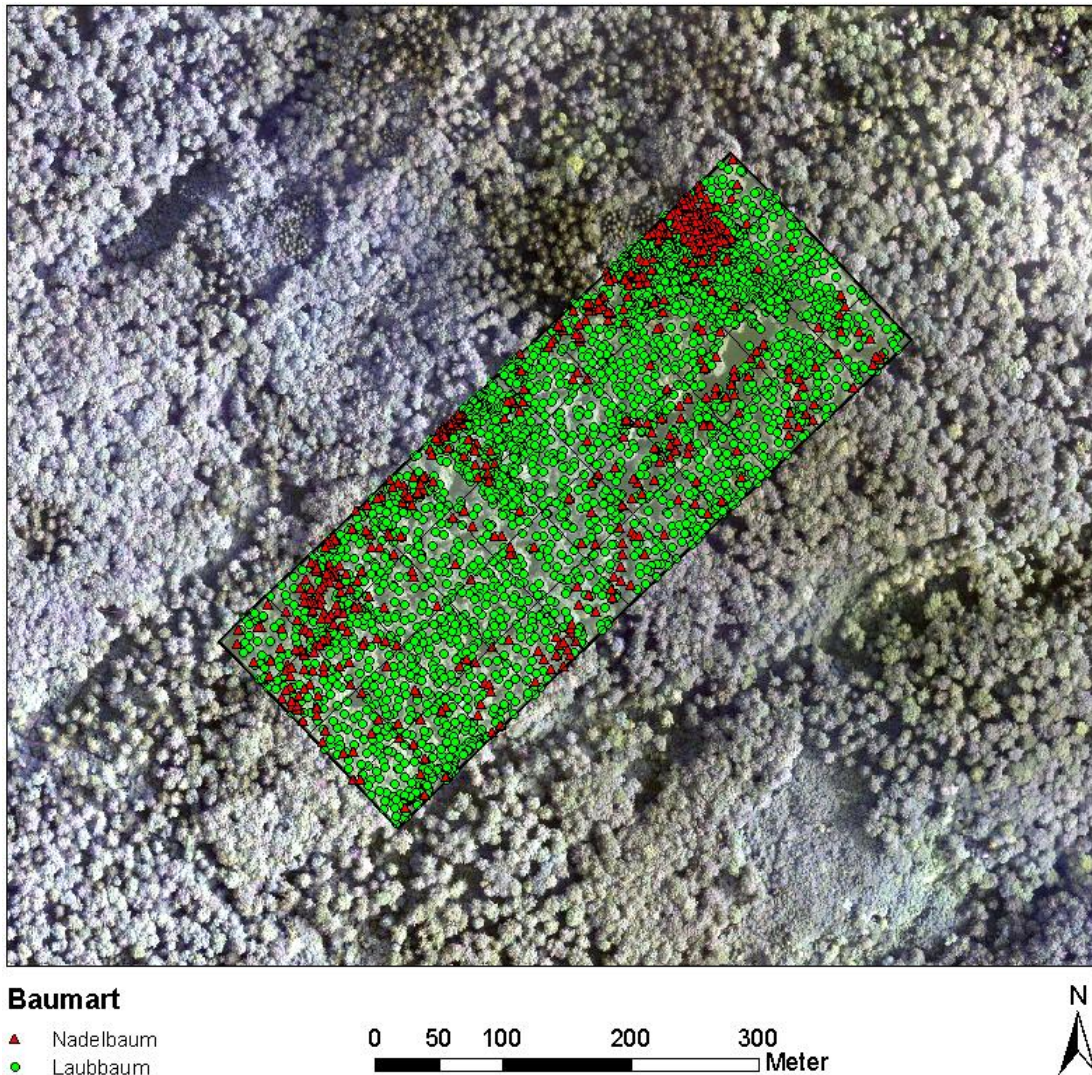
und die ungestörte Dynamik der Lebensgemeinschaften sind langfristig zu gewährleisten.“

Auf kantonaler Ebene fand dieses Ziel Eingang in zahlreiche verschiedene Planungsinstrumente wie das Naturschutzgesamtkonzept, den Richtplan oder die Waldentwicklungsplanung Sihltal-Zimmerberg. Seit dem Jahr 2000 bleibt die Natur im Sihlwald sich selbst überlassen. Die Unterzeichnung des Waldreservatsvertrages erfolgte 2007 und im Oktober 2008 wurde die kantonale Schutzverordnung Sihlwald in Kraft gesetzt, welche Schutz- und Unterhaltmassnahmen sowie Naturerlebnis- und Erholungsnutzung festlegt. Im Sihlwald wird seit über 10 Jahren wissenschaftliche Forschung betrieben und es ist ein bedeutendes und gut untersuchtes Forschungsobjekt für die Hochschulen und Institute in Zürich und Umgebung. Im Jahr 2000 wurde von der WSL auf dem Birriboden im Sihlwald eine 11 Hektaren grosse Versuchsfläche, welche in Teilflächen von je 50 mal 50m unterteilt ist, angelegt. Die Testfläche ist in der folgenden Abbildung gelb eingefärbt.



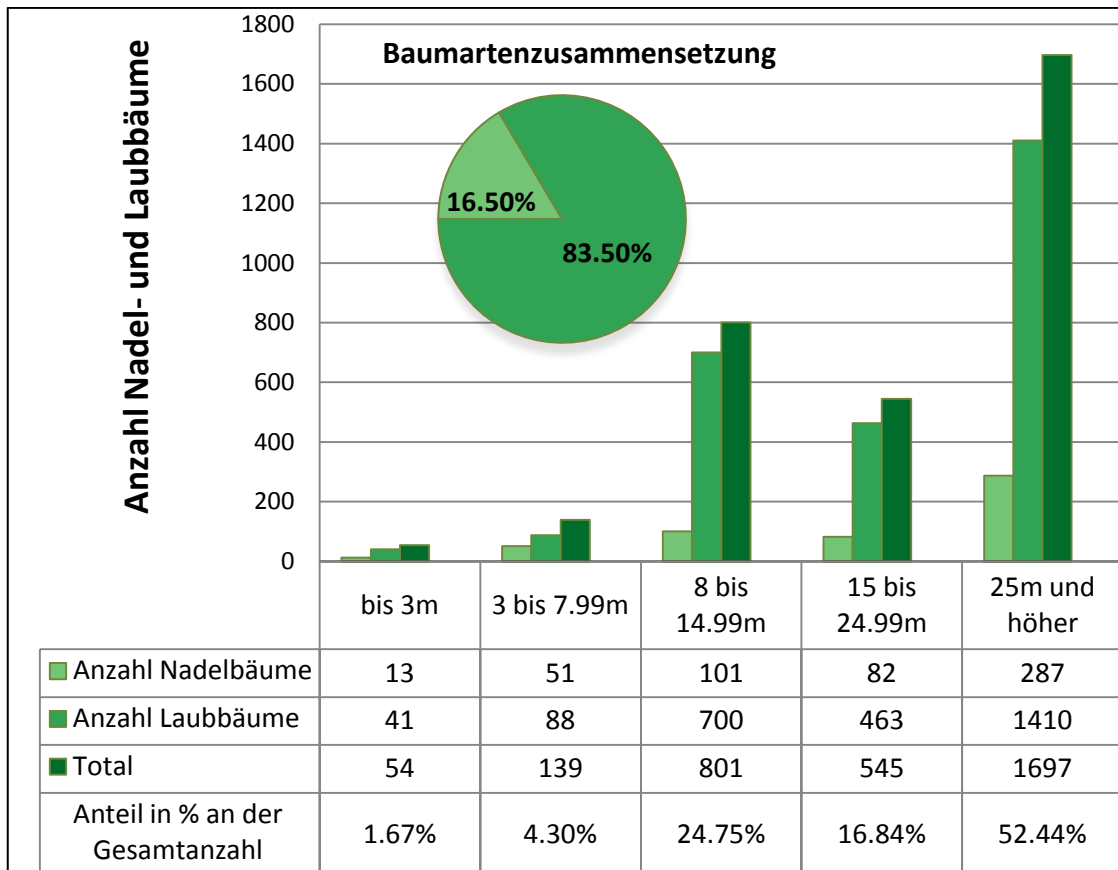
**Abbildung 3** Übersicht Testgebiet im Massstab 1:25'000. Quelle Swisstopo.

Auf dieser Fläche wurden die genauen Stammfusskoordinaten, Höhe, Brustdurchmesser und weitere Parameter zur Stammqualität aller 3236 lebender und toter Bäume aufgenommen. Das Ziel ist es Aussagen zur Bestandesstruktur, das heisst zur räumlichen Verteilung der unterschiedlich hohen und dicken Bäume, der Bestandeslücken und Verjüngungsgruppen sowie des Totholzes zu ermöglichen. Die Versuchsfläche ist langfristig angelegt und wird laufend aktualisiert (WSL, 2001). Die Angaben, welche in dieser Arbeit verwendet werden, stammen aus dem Jahr 2005 und liegen somit zwischen den Befliegungszeitpunkten.



**Abbildung 4** Räumliche Verteilung von Laub- und Nadelbäumen im Testgebiet

Obenstehende Abbildung gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung von Laub- und Nadelbäumen. Der Anteil der Laubbäume überwiegt und beträgt für die gesamte Testfläche 83.5%. Betrachtet man Abbildung 5 so fällt auf, dass das Gebiet durch hochgewachsene Bäume mit einer Höhe von mehr als 25m dominiert wird, was einem Anteil von 52.44% entspricht. Betrachtet man die weiteren Höhenklassen, welche denjenigen des schweizerischen Landesforstinventar entsprechen, so betragen die Anteile der Bäume zwischen 8 und 14.99m 24.75% und derjenige der Bäume zwischen 15 und 24.99m 16.84%. Die Nadelbäume sind in allen Grössenklassen klar untervertreten.

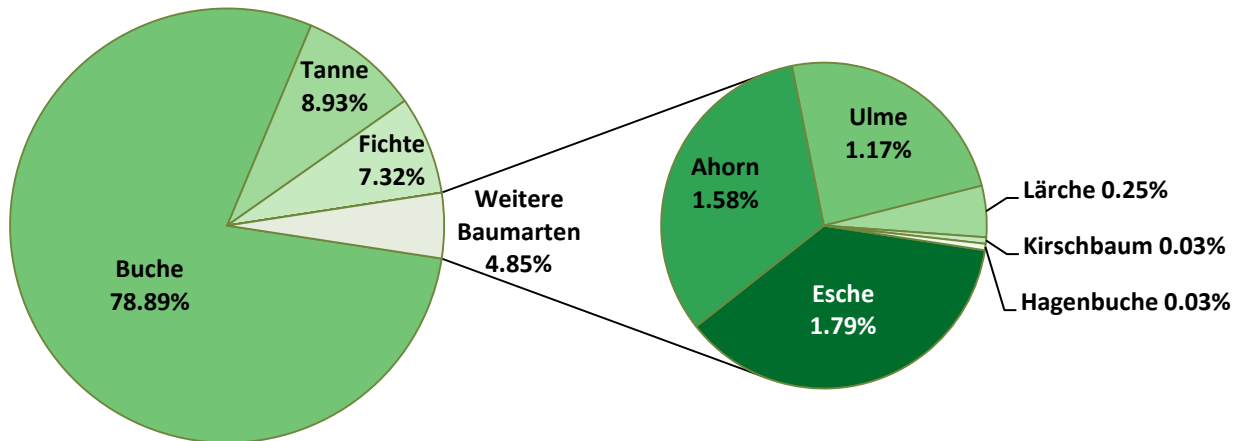


**Abbildung 5** Baumartenzusammensetzung und Baumhöhenverteilung im Testgebiet

Betrachtet man die Baumartenzusammensetzung auf der folgenden Seite im Detail, so besteht diese zu 78.89% aus Buchen (*fagus sylvatica*), zu weiteren 8.93% aus Tannen (*abies alba*) und zu 7.32% aus Fichten (*picea abies*), diese 3 Baumarten bilden den Hauptbaumbestand im Testgebiet des Birriboden. Die restlichen 4.85% teilen sich Bergahorn (*acer pseudoplatanus*), Ulme (*ulmus glabra*), Esche (*fraxinus excelsior*) und vereinzelte Exemplare von Lärchen (*larix desidua*), Kirschbaum (*prunus avium*) und Hagenbuche (*carpinus betulus*).



Die untenstehende Abbildung zeigt die Baumartenhäufigkeit im Testgebiet.



**Abbildung 6** Detaillierte Baumartenzusammensetzung im Testgebiet Birriboden im Jahr 2005

## 2.2 Datengrundlage

Die in dieser Arbeit zur Verfügung stehenden LiDAR-Daten stammen von der Firma TopoSys GmbH, welche das Untersuchungsgebiet im Auftrag des GIS Sihlwaldes zum Zweck der Generierung eines digitalen Geländemodells im Frühjahr Jahr 2004 beflog. Im Sommer 2006 erfolgte eine zweite Befliegung. Dabei wurde bei beiden Aufnahmezeitpunkten, der von der TopoSys entwickelte Faser-Scanner Falcon II verwendet, welcher gegenüber seinem Vorgänger zusätzlich über einen Zeilenscanner für die spektralen Kanäle Rot, Grün, Blau und Nahinfrarot verfügt, welcher die Aufnahmen hochauflöser, digitaler True-Orthobilder erlaubt. Die zeitgleiche Aufzeichnung von digitalem Höhenmodell und der dazugehörigen Farbinformation ermöglicht es alle erfassten Objekte lagerichtig und ohne verkippte Kanten zu berechnen (www.toposys.de, Zugriff: 30.08.2010).

Nachfolgende Tabellen geben einen Überblick über die technischen Angaben des Falcon II Sensors:

**Tabelle 1** Technische Spezifikationen des Laserscanner Falcon II

<b>Laserscanner Falcon II</b>	
Abtastrate	653 Hz
Öffnungswinkel	14.3°
Laserimpulsfrequenz	83000 Hz
Reichweite	1600 m
Datenaufzeichnung	First-, Last-Echo & Intensitätsdaten
Absolute Höhengenaugigkeit	< ± 0.15m
Absolute Lagegenauigkeit	< ± 0.50m
Rasterweite	1m
Augensicherheitsabstand	0.5 m

**Tabelle 2** Technische Spezifikationen des Zeilenscanner Falcon II

<b>Zeilenscanner Falcon II</b>		
Spektralkanäle	Blau (B)	450 - 490 nm
	Grün (G)	500 - 580 nm
	Rot (Rot)	580 - 660 nm
	Nahinfrarot (NIR)	770 - 890 nm
Öffnungswinkel	21.6° (± 10.8°)	
Auflösung quer zur Flugrichtung	0.5 mrad	
Pixel pro Kanal	682	
Rasterweite	0.5 m	
Blende	1:1.4	

Das Hauptgewicht der Befliegung im Frühjahr 2004 lag auf der Erzeugung eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells. Da es sich um ein stark bewaldetes Gebiet handelt, wurde ein Flugzeitpunkt in der laubfreien Jahresperiode (Leaf-Off) gewählt. Dieses Geländemodell wird seither zur Erzeugung verschiedener Modelle rund um das GIS Sihlwald verwendet (Sailer, 2007). Bei der Überfliegung des Gebietes im Jahr 2006 war das Gebiet vollständig belaubt (Leaf-On). Um das Gebiet vollständig abzudecken waren zwei Flüge notwendig, da die Wetterbedingungen beim ersten Überflug nicht stabil blieben (Egger, 2008). Eine Auflistung der detaillierten Befliegungsparameter und technischen Spezifikationen befindet sich im Anhang.

Um einen besseren Eindruck des Untersuchungsgebietes wie es sich zu den jeweiligen Befliegungszeitpunkten präsentierte zu vermitteln, werden im Folgenden ein paar Fotoaufnahmen präsentiert.



**Abbildungen 7.1-7.3** Einblicke ins Untersuchungsgebiet Birriboden.  
Aufnahmedatum: 25.03.2010



Die Aufnahmezeitpunkte im 2010 wurden in Analogie zu den stattgefundenen Befliegungszeitpunkten von 2004 und 2006 gewählt, um so einen möglichst guten Eindruck vom Stand der Vegetation zu erhalten.



**Abbildungen 8.1-8.3** Einblicke ins Untersuchungsgebiet Birriboden.  
Aufnahmedatum: 28.08.2010

Neben den Laserscan Rohdaten, welche getrennt nach First und Lastecho-Daten vorliegen, gehören folgende von TopoSys interpolierte Gelände und Oberflächenmodelle zum Lieferumfang dazu, welche beide zusammen die eigentliche Datengrundlage dieser Arbeit bilden:

- Digitales Geländemodell 2004 (DTM 2004) aus Last-Echo Daten mit einer Bodenauflösung von 1m
- Hillshade Darstellung des DTM 2004
- Digitales Oberflächenmodell 2006 (DOM 2006) aus First-Echo Daten mit einer Bodenauflösung von 1m
- Hillshade Darstellung des DOM 2006
- Vegetationshöhenmodell mit einer Höhen- und Bodenauflösung von 1m
- Digitale Zeilenscanneraufnahme RGB und CIR von 2004 und 2006 mit einer Bodenauflösung von 50cm
- Orthophoto CIR von 2004 mit einer Bodenauflösung von 5cm

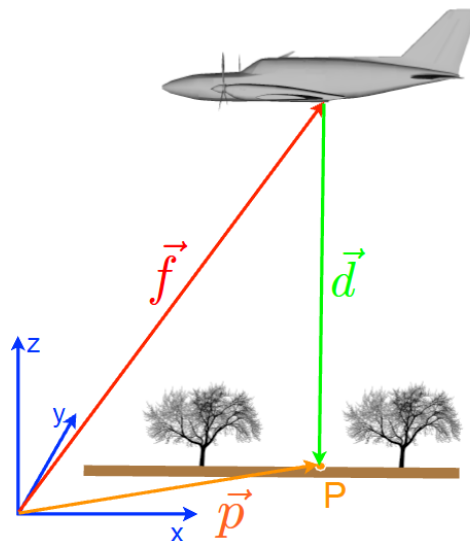
Vom GIS des Wildnisparcs Sihlwald wurden Vektordaten, wie Fliessgewässer, Konturlinien sowie der Rahmen des Untersuchungsgebietes und die Polygone der einzelnen Plots zur Verfügung gestellt. Der Datenherr dieser Vektordaten ist und bleibt das GIS des Wildnisparcs Zürich. Auch stand ein Rasterdatensatz mit Auflösung 1m aus der Diplomarbeit von Füllemann (2006) zur Verfügung, die Grundlage dieses Datensatzes beruht ebenfalls auf den von TopoSys im Jahr 2004 aufgenommenen Daten. Desweiteren wurde der Übersichtsplan des Kanton Zürichs im Massstab 1:2500 zur Verfügung gestellt.

Um die berechneten Ergebnisse überprüfen zu können, wurden die von der WSL erhobenen attributierten Baumstandorte in Form eines Shapefiles zur Verfügung gestellt. Die Attributierung, der im Jahr 2000 angelegten Testfläche, stammt dabei aus dem Jahr 2005. Der Datenherr hier ist und bleibt die WSL. Für die Bereitstellung der Daten sei an dieser Stelle den verschiedenen Datenlieferanten speziell gedankt.



## 2.3 System LiDAR

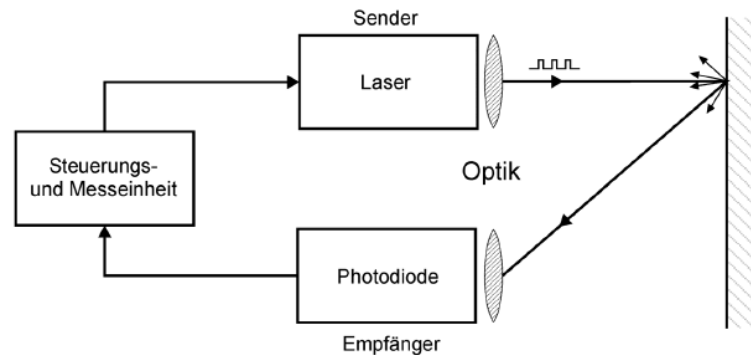
Im Folgenden soll ein Überblick über das aktive Fernerkundungsverfahren LiDAR gegeben werden. Dabei soll ein spezieller Fokus auf Forstanwendungen und der in dieser Arbeit für die Datenaufnahme verwendeten Aufnahmesystem gelegt werden. Der Ursprung der Entwicklung in diesem Gebiet gehen auf frühe NASA Systeme zurück, welche in den 1970er Jahren entwickelt wurden. Schon diese frühen Systeme demonstrierten den Wert dieser Technologie (Renslow, 2000). Die Entwicklungen auf diesem Gebiet sind stark technologiegetrieben, dazu gehören speziell die Entwicklungen im Bereich der Positions- und Orientierungssysteme und auch die steigende Leistungsfähigkeit der Computertechnologie (Ackermann, 1999). Das Ziel ist die Bestimmung einer 3D-Koordinate in einem bekannten Referenzsystem. Dabei setzt sich der Punktvektor  $P$  aus dem Messvektor  $d$  und dem Positionsvektor  $f$  zusammen. Der Positionsvektor  $p$  ergibt sich aus dem Globalen Positionierungssystem und dem inertialen Navigationssystem und der Messvektor aus der Laufzeitmessung und der Kalibration des Sensors.



**Abbildung 9** Vektorielle Grundgleichung des luftgestützten Laserscannings. Quelle Vorlesungsunterlagen LiDAR - Signal, Rückstreuung und Detektion, HS 2008

Ein typisches Laserscanning-System besteht gemäss Baltsavias (1999), Wehr und Lohr (1999) und Wagner (2003) aus den folgenden Hauptkomponenten: Laser, Scanner, Globales Positionierungssystem (GPS), Inertiales Navigationssystem (INS) und der Kontroll-, Überwachungs und Aufzeichnungseinheit.

Nachfolgend ist ein Schema der Hauptkomponenten eines typischen Laserscanning-Systems abgebildet.



**Abbildung 10** Blockdiagramm eines Laserscanners. Quelle: Wagner et al., 2003

Distanzmessung mit der Hilfe eines Laserstrahles ist ein aktives Fernerkundungsverfahren, bei dem ein kohärenter und monochromatischer Lichtimpuls einer bestimmten Wellenlänge, meist im Infrarotbereich, auf die Erdoberfläche gesendet wird, von dieser gestreut und anschliessend mit einer Photodiode wieder registriert wird (Wagner, 2003). Über die hierfür benötigte Laufzeit kann die Distanz zwischen dem Sensor und der reflektierenden Oberfläche ermittelt werden. Die Entfernung  $R$  berechnet sich gemäss Baltsavias (1999) aus der halben Laufzeit  $t$  multipliziert mit der Geschwindigkeit des Laserimpulses  $c$ .

$$R = \frac{t * c}{2}$$

Dabei ist die Laserstrahlgeschwindigkeit gemäss Kraus (2002) ungefähr 0.03% langsamer als die Lichtstrahlgeschwindigkeit. LiDAR stellt dabei eine Erweiterung der konventionellen Radartechniken auf den optischen Frequenzbereich dar (Wagner et al., 2003).

### 2.3.1 Auflösungs- und Trennungsvermögen

Zwei weitere wichtige Kennwerte des flugzeuggestützten Laserscannings sind gemäss Wagner et al. (2003) und Wagner et al. (2008) das Auflösungs- und das Trennungsvermögen. Dabei ist das Auflösungsvermögen eines Laserscanners begrenzt durch die räumliche Ausdehnung des Laserstrahls und wird durch die folgende Formel beschrieben:

$$\Delta x = R\beta = \frac{H}{\cos\theta} \beta$$

Dabei stellt  $D$  die Entfernung zwischen dem Laserscanner und dem Objekt dar, wobei  $\beta$  der Öffnungswinkel des Laserstrahls ist. Die Entfernung  $R$  wird aus der Flughöhe  $H$  und dem Blickwinkel  $\theta$  bestimmt. Schaut der Laserscanner direkt nach unten gilt  $\theta = 0^\circ$  was dazu führt, dass  $R = H$  gilt. Da die Übertragung des Laserimpulses in den Aussenraum und deren anschliessenden Empfang mit Hilfe optischer Linsen erfolgt, kommt es zu Beugungserscheinungen, welche das Auflösungsvermögen begrenzen. Dabei hängt der Öffnungswinkel  $\beta$  einer optischen Apertur sowohl von der Wellenlänge, dem Durchmesser der Apertur  $D$  und einer gerätespezifischen Konstante  $K_a$  ab.

$$\beta = K_a \frac{\lambda}{D}$$

Das Trennungsvermögen zweier von Laserstrahl erfasster Objekte hängt von der Dauer  $\Delta\tau$  des ausgesendeten Laserimpulses und der Ausbreitungsgeschwindigkeit ab. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist durch die Gruppengeschwindigkeit  $V_g$  gegeben. Betrachten wir nun zwei Punkte in einem Abstand  $\Delta R$ , so muss der Laserstrahl die Strecke  $\Delta R$  zweimal durchlaufen und somit kommt das Echo vom weiter entfernten Punkt um  $\Delta T = 2\Delta R/V_g$  später beim Empfänger an als jenes vom nähergelegenen Punkt. Somit ist die kleinste Entfernung  $\Delta r$  zweier Objekte, wo noch keine Überlappung der Echos auftritt, gegeben durch:

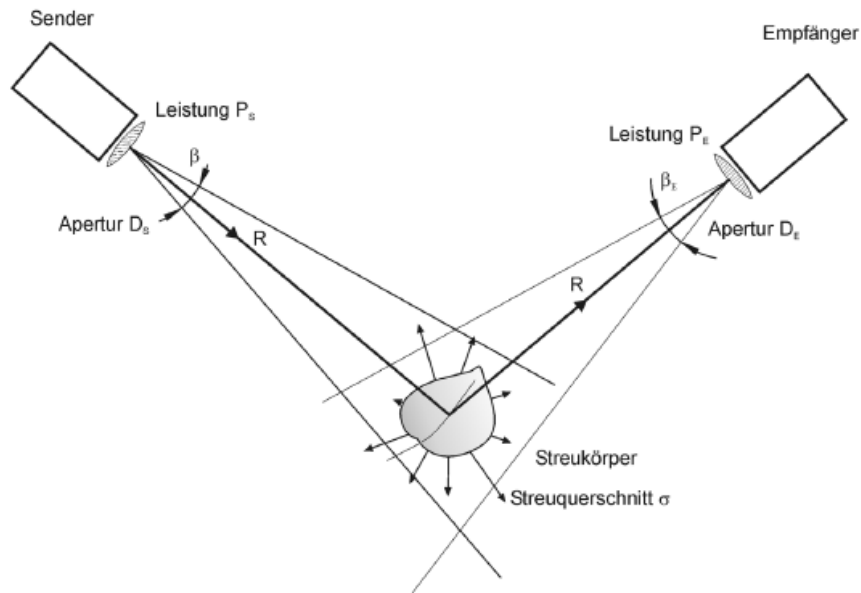
$$\Delta r = \frac{V_g \Delta\tau}{2}$$

Die Grösse  $\Delta r$  gibt somit das räumliche Trennungsvermögen an, ist aber nicht zu verwechseln mit der Messgenauigkeit eines Laserscanners, welche sich auf die Genauigkeit der Entfernungsangabe für ein Objekt bezieht.

### 2.3.2 Radargleichung

Die Intensität des empfangenen Laserimpulses hängt von mehreren Einflussfaktoren ab, welche mit der aus der Mikrowellenfernerkundung bekannten Radargleichung erfasst werden können. Die folgende Ableitung der Radargleichung für den Fall des Laserscannings basiert ebenfalls auf den Ausführungen von Wagner et al. (2003). Die folgende Abbildung zeigt die

wichtigsten Einflussgrößen, wobei zwecks einer besseren Übersicht Laser (Sender) und Photodiode (Empfänger) an verschiedenen Orten gezeichnet sind.



**Abbildung 11** Geometrie und Messgrößen in der Radargleichung. Quelle: Wagner et al., 2003

Unter der Annahme, dass die Optik des Laserscanners die Gesamtenergie der Strahlung in einem kreisförmigen Raumwinkel  $\pi\beta_s^2/4$  bündelt, so beträgt die Strahlungsdichte  $S_0$  an einem Streuobjekt in einer Entfernung  $R$  vom Laser:

$$S_0 = \frac{4P_s}{\pi R^2 \beta_s^2} \text{ (Watt/m}^2\text{)}$$

Das Streuobjekt wird normalerweise einen Teil der einfallenden Strahlung absorbieren und den Rest in alle Richtungen streuen. Das Mass für den Anteil der reflektierten Leistung ist der sogenannte Streuquerschnitt  $\sigma$  ( $\text{m}^2$ ). Die rückgestreute Leistung  $P_r$  ergibt sich somit aus der nachstehenden Gleichung:

$$P_r = S_0 \cdot \sigma = \frac{4P_s}{\pi R^2 \beta_s^2} \cdot \sigma$$

Die Strahlungsleistung  $S_E$  am Empfänger beträgt dann:

$$S_E = \frac{P_r}{4\pi R^2} = \frac{4P_s}{\pi R^2 \beta_s^2} \cdot \frac{\sigma}{R^2}$$

Die vom Empfänger mit einer kreisrunden Apertur mit Durchmesser  $D_E$  gemessene Leistung ist dann gegeben durch:

$$P_E = S_E \frac{\pi D_E^2}{4} = \frac{4P_s}{\pi R^2 \beta_s^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{\pi D_E^2}{4} = \frac{P_s D_E^2}{4\pi R^4 \beta_s^2} \cdot \sigma$$

Zum Abschluss werden noch die Verluste im Gerät (Wirkungsgrad) und in der Atmosphäre (Transmissionsfaktor) korrigiert, was zur folgenden, für das Laserscanning angepassten, Radargleichung führt:

$$P_E = \frac{P_s D_E^2}{4\pi R^4 \beta_s^2} \cdot \eta_{SYS} \eta_{ATM} \cdot \sigma$$

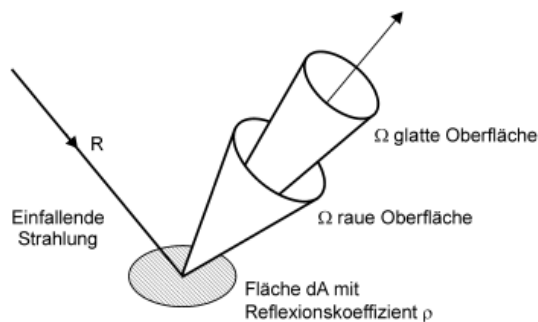
### 2.3.3 Interaktion des Laserstrahls mit dem Streukörper

Da im Fall des Laserscannings die Dimensionen der Streukörpers immer um ein Vielfaches grösser sind als die Wellenlängen, kann der Streuprozess mit einer geometrisch-optischen Näherung beschrieben werden. Das kleinste noch detektierbare Objekt innerhalb eines Laserstrahles hängt somit nicht von der Objektgrösse ab, sondern in erster Linie von dessen Reflektionseigenschaften (Baltsavias, 1999). Die auf den Streukörper mit der projizierten Fläche  $dA$  auftreffende Strahlungsleistung ist gleich  $S_0 dA$ , wovon wiederum ein Teil reflektiert wird. Dieser Anteil wird mit  $\rho S_0 dA$  beschrieben, wobei  $\rho$  der Reflexionsgrad ist. Um den Streuquerschnitt zu erhalten muss auch noch berücksichtigt werden, dass die Streuung gerichtet ist. Unter der Annahme, dass die reflektierte Strahlung gleichmässig in einem Raumwinkel  $\Omega$  gestrahlt wird, ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \cdot \rho \cdot dA \text{ innerhalb des Streukegels}$$

$$\sigma = 0 \text{ ausserhalb des Streukegels}$$

Eine sehr glatte Oberfläche zeichnet sich durch eine gerichtete Streuung und folglich durch kleine Werte für  $\Omega$  aus, während für raue Flächen die Werte für  $\Omega$  entsprechend gross sind. Ob eine Fläche glatt oder rau ist, hängt vom Grössenverhältnis von den Unebenheiten der Oberfläche im Vergleich zur Wellenlänge des verwendeten Systems ab. Im optischen und Infrarotbereich können nur wenige Flächen, wie Wasser oder Glas, als glatt bezeichnet werden. Nachfolgende Abbildung zeigt den Streuquerschnitt eines Körpers mit glatter, respektive rauher Oberfläche.



**Abbildung 12** Streuquerschnitt eines Körpers mit glatter und rauher Oberfläche Quelle: Wagner et al., 2003

Der Streuquerschnitt eines Objektes hängt stark von dessen Form und Grössenausdehnung ab. Als Referenzmodell für raue Oberflächen wird oft ein Lambertscher Strahler herangezogen, welcher die meiste Energie in einem Raumwinkel der Grösse  $\pi$  streut:

$$\sigma_{Lambert} = 4 \cdot \rho \cdot dA$$

Die folgende Tabelle gibt gemessene Werte des Reflexionsgrades ausgewählter Materialien bei einer Wellenlänge von 1µm wieder. Im Bezug auf den Einsatz von LiDAR im Wald sind vor allem die Werte von Ahornblättern und Eichenblättern interessant. Aufgrund des hohen Schwankungsbereichs des Reflexionsgrades  $\rho$  und der Tatsache, dass die Bedingungen zum Zeitpunkt der Aufnahme nicht immer bekannt sind, sind diese Angaben mit Vorsicht zu verwenden.

**Tabelle 3** Reflexionsgrade unterschiedlichster Materialien Quelle: Wagner et al., 2003

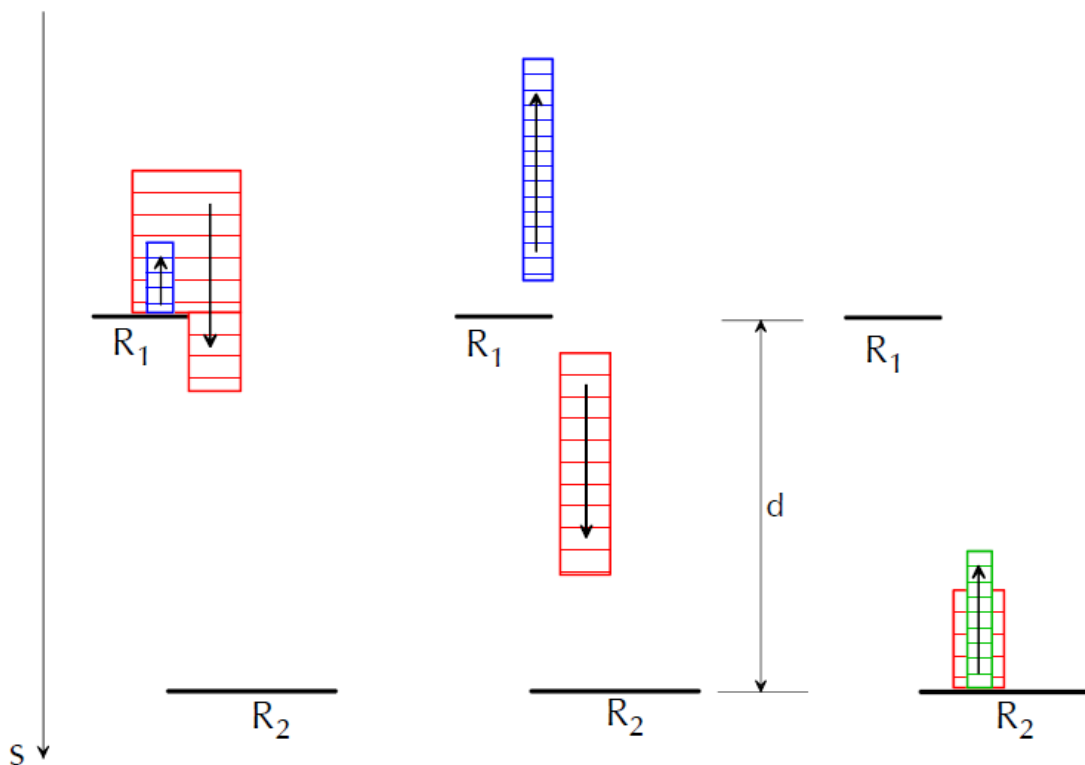
<b>Material</b>	<b>Reflexionsgrad bei 1 µm</b>
Ahornblatt	0.4
Aluminiumfolie	0.8 - 0.9
Asphalt	0.2
Chrom	0.6
Edelstahl	0.2 - 0.6
Edelstahl oxidiert	0.1 - 0.2
Eichenblatt	0.65
Kupfer	0.9
Maisblätter	0.9
Platin	0.45 - 0.6
Sandboden nass	0.15
Sandboden trocken	0.3
Schluff trocken	0.6
Schnee	0.25
Terra Cota	0.3
Wasser senkrechter Einfall	< 0.01
Wasser stark schleifender Einfall	bis zu 0.3
Weizen Stängel	0.9
Weizen Frucht	0.65
Zement	0.4

Der Reflexionsgrad von Vegetation beträgt gemäss Wever und Lindenberger (1999) zwischen 0.3 und 0.5. Die verschiedenen Oberflächen haben einen Einfluss auf die Messdistanz des Lasers. Je glatter eine Oberfläche ist, desto grösser ist der Reflexionsgrad und desto grösser ist die mögliche Messdistanz und umgekehrt. Ein Laserstrahl kann multiple Echos produzieren, wenn der Laserstrahl auf seinem Weg auf mehrere Objekt in verschiedenen Distanzen trifft.

Dies ist gemäss Katzenbeisser (2003) dann der Fall, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Die beleuchteten Objekte befinden sich auf verschiedenen Höhen
- Der Laserstrahl hat die Möglichkeit andere Objekte teilweise zu treffen
- Objekte sind gross genug und weisen eine genügende Reflexivität auf um Echos zu generieren
- Der Laserstrahl verfügt über einen genügend grossen Durchmesser um mehrere Objekte zu beleuchten

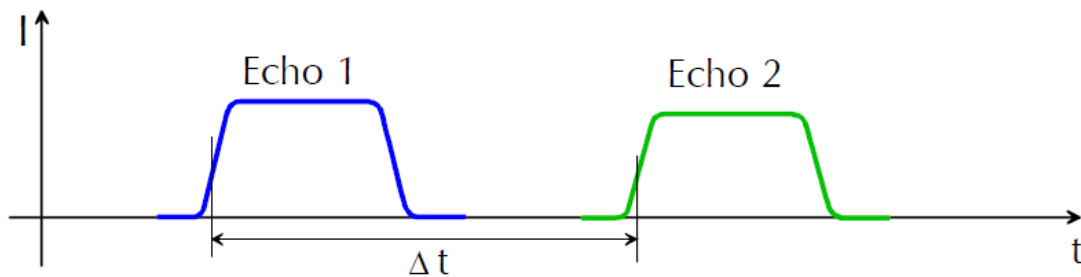
Die folgende Abbildung zeigt die Interaktion zwischen dem Laserstrahl und den auf verschiedenen Höhen vorhandenen reflektierenden Oberflächen. Ein Teil des Laserstrahls wird an der Oberfläche R<sub>1</sub> reflektiert während der andere Teil seinen Weg fortsetzt und erst an der Oberfläche R<sub>2</sub> reflektiert wird.



**Abbildung 13** Interaktion des Laserstrahls mit den auf verschiedenen Höhen vorhandenen reflektierenden Oberflächen Quelle: Katzenbeisser 2003



Die beiden so erzeugten Echos liegen zeitlich auseinander, wie folgende Abbildung zeigt.



**Abbildung 14** Zeitlicher Unterschied zwischen 2 Laserechos Quelle: Katzenbeisser 2003

Aus Einfachheitsgründen geht man von flachen Oberflächen aus und dass Echos dieselbe Form haben als der ausgesendete Laserimpuls. Der zeitliche Unterschied  $\Delta t$  der beiden Echos korrespondiert gemäss Katzenbeisser (2003) direkt mit dem Abstand  $d$  zwischen den beiden reflektierenden Oberflächen und beträgt:

$$\Delta t = \frac{2d}{c} \text{ oder } d = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

Betrachtet man nun die Interaktion des Laserstrahls beim Durchdringen eines Waldgebietes, so kommt es zu multiplen Echos. So werden zum einen Teile des Lichtimpulses an den Blättern und Ästen in den verschiedenen Höhen gestreut und zum anderen werden sie unter Umständen erst vom Boden reflektiert. Diese Eigenschaft macht es möglich den Boden unter bewaldetem Gebiet zu extrahieren, da der letzte Puls mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vom Boden stammt. Der Anteil der Bodenechos an allen Echos wird gemäss Barilotti et al. (2007) mit dem Laser Penetrations Index (LPI) beschrieben:

$$LPI = \frac{G_{ij}}{(G_{ij} + V_{ij})}$$

Dabei beschreibt  $G_{ij}$  die Bodenpunktdichte und  $V_{ij}$  die Vegetationspunktdichte, welche über dem Boden liegen. Gemäss empirischen Forschungen liegt der LPI zwischen 31% bei Nadelwald und bei 64% bei Mischwäldern (Hoss, 1997 und Kraus et al., 1997). Die Penetrationsrate ist in Europa zwischen spätem Herbst und Frühling am grössten aufgrund des fehlenden Blattwerks und somit am besten für topographische Aufnahmen unter bewaldeten Flächen geeignet (Kraus und Pfeiffer, 1998).

### 2.3.4 Genauigkeiten von LiDAR

Die Genauigkeit der 3D-Koordinaten, welche durch LiDAR gewonnen werden, hängen von vielen Faktoren ab. Baltasavias (1999) unterscheidet die folgenden Hauptfaktoren welche die Genauigkeiten beeinflussen.

#### Distanzgenauigkeit

Die Distanzgenauigkeit ist die Komplizierteste. In der Praxis jedoch ist ihr Beitrag relativ gering, sofern die nötigen Vorsichtsmaßnahmen und Messungen akkurat gemacht werden. Dies gilt jedoch nicht bei niedrigen Flughöhen und schmalem Scanwinkel, wo der Anteil am Gesamtbeitrag der Fehler steigt. Die Distanzgenauigkeit hängt hauptsächlich von folgenden Faktoren ab:

- Möglichkeit dieselbe relative Position des ausgesendeten und des empfangenen Laserstrahls zu bestimmen um das Zeitintervall zu messen. Dies ist limitiert durch Rauschen, die Signalstärke, die Sensitivität des Schwellwertdetektors und durch die Länge und Reproduzierbarkeit des ausgesendeten Pulses.
- Genauigkeit mit welchem systemabhängige Verzögerungen registriert werden können.
- Genauigkeit der Zeitintervalle.

#### Positionsgenauigkeit

Die Positionsgenauigkeit hängt nebst dem GPS Gerät, der GPS Satelliten Konstellation während des Fluges, Anzahl, Verteilung und Distanz der Bodenreferenzstation zur Trägerplattform, Versatzgenauigkeit und den Abweichungen zwischen GPS und INS respektive INS und Laserscanner, hauptsächlich von der Qualität der Nachverarbeitung des differential GPS ab.

### Fluglagegenauigkeit

Die Fluglage beeinflusst die Richtung des ausgesendeten Laserstrahls. Die Fluglagegenauigkeit hängt dabei von der Qualität des INS ab. Der Effekt der dreidimensionalen Fluglagenungenauigkeit nimmt mit zunehmender Höhe und zunehmendem Scanwinkel zu.

### Zeitversatz

Für eine akkurate 3D Positionierung zu einem bestimmten Zeitpunkt sind die Orientierung, die Position und die Entfernung nötig. Die Aufzeichnungszeitpunkte müssen bekannt und exakt sein. Ist dies nicht der Fall kann es zu variablen Fehlern kommen. Der Fehler nimmt dabei mit steigender Änderungsrate der beteiligten Aufzeichnungsinstrumente zu.

Gesamthaft betrachtet setzt sich die Ungenauigkeit aus einem variablen Teil, welcher von den Hauptparametern, wie Flughöhe, Scanwinkel, Bodentopographie und Bodenbedeckung beeinflusst wird, und einem konstanten Teil, welcher unabhängig von den zuvor genannten Parametern ist, wie GPS Genauigkeit, INS Genauigkeit, etc. zusammen. Für detailliertere Angaben zu den Ungenauigkeiten des variablen Teiles sei hier auf Hopkinson (2006) und Goodwin et al. (2006) verwiesen.

### 2.3.5 Haupteinsatzbereiche LiDAR

Das primäre Ziel in der Entwicklung des Laserscanning war die topographische Kartierung bewaldeten Geländes (Lindenberger, 1993). Ein weiteres Anwendungsgebiet für Laserscanning sind jene Gebiete, welche aufgrund des zu geringen Kontrastes und Textur, wie beispielsweise Gletscher, Gezeitengebiete und Strände, nicht geeignet sind für Luftaufnahmen (Wever und Lindenberger, 1999). In der Zwischenzeit haben sich die Anwendungsmöglichkeiten und Anwendungsfelder enorm erweitert. Laserscanning findet unter anderem Anwendung in den folgenden Gebieten (Wever und Lindenberger, 1999 und Flood, 1999):

- Topographische Kartierung
- Forstwirtschaft
- Überschwemmungskartierung und hydrologische Analysen und Simulationen
- Küstenzonenmanagement und Gezeitenzonenkartierung
- Erkennung und Kartierung von Oberflächenerosionsgebieten

- Gletscherkartierung und Modellierung von Gletscherbewegungen
- Digitale Stadtmodelle
- Korridormapping und Überwachung von Strassen, Eisenbahntrassen, Pipelines und Stromleitungen
- Volumenberechnungen bei Tagebauten und Deponien
- Archäologie

Die technologischen Fortschritte während der letzten beiden Jahrzehnten erweiterten die Einsatzmöglichkeiten für LiDAR in vielen weiteren Bereichen und entwickeln sich laufend weiter (Flood, 1999 und Lefsky et al., 2002).

### **2.3.6 LiDAR in der Forstwirtschaft**

Mit LiDAR-Systemen können sowohl vertikale als auch horizontale Informationen gewonnen werden. Dies ist besonders speziell für den Einsatz in Wäldern nützlich (Peterson et al., 2005).

Für Forstanwendungen werden LiDAR Systeme nach Dubayah und Drake (2000) grob aufgrund der nachfolgenden Charaktereigenschaften klassiert:

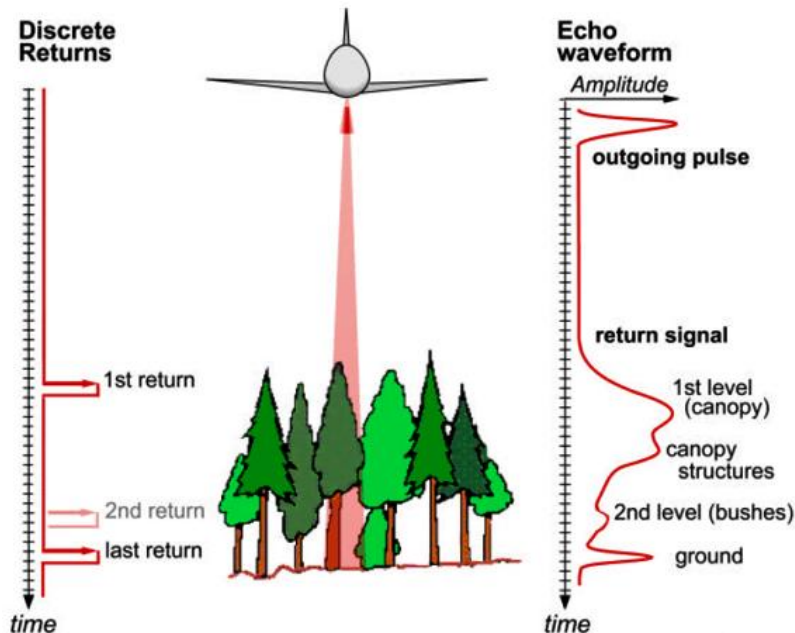
1. Registrierung des aufgezeichneten Signals
2. Grösse der Ausleuchtungszone (Footprint)
3. Abtastfrequenz und Scanmuster

#### **Registrierung des aufgezeichneten Signals**

Bei der Registrierung des aufgezeichneten Signals unterscheidet man ob nur das erste Echo und/oder das letzte Echo, weitere punktuelle Echos oder die gesamte Bandbreite des zurückgestreuten Signals aufgezeichnet wird. Laser können entweder kontinuierlich Licht aussenden oder in kurzen Impulsen. Im ersten Fall spricht man auch von „Continuous Wave“ und im zweiten Fall von „Pulsed Laser“ Scannern (Wagner et al., 2003).

Die „Pulsed Laser“ Scanner, bei welchen diskrete Echos aufgezeichnet werden, verfügen aufgrund ihrer Puls Repetitionsrate und ihrer schmalen Ausleuchtungszone über eine sehr hohe räumliche Auflösung. Diese Scanner werden bevorzugt bei der detaillierten Kartierung von Boden- und Waldoberflächen eingesetzt. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Systeme sehr weit entwickelt und weit verbreitet und somit verfügbar sind. Die „Continuous Wave“ Scannern

zeichnen die Echos über die gesamte Pulsdauer kontinuierlich auf und enthalten somit detailliertere Informationen (Lefsky et al., 2002). Folgende Abbildung veranschaulicht die Echoaufzeichnung von „Pulsed Laser“ auf der linken Seite und „Continuous Laser“ Scannern auf der rechten Seite in einem bewaldeten Gebiet.



**Abbildung 15** Laserscanningmethoden über bewaldeten Gebieten Quelle: Riegler (2007)

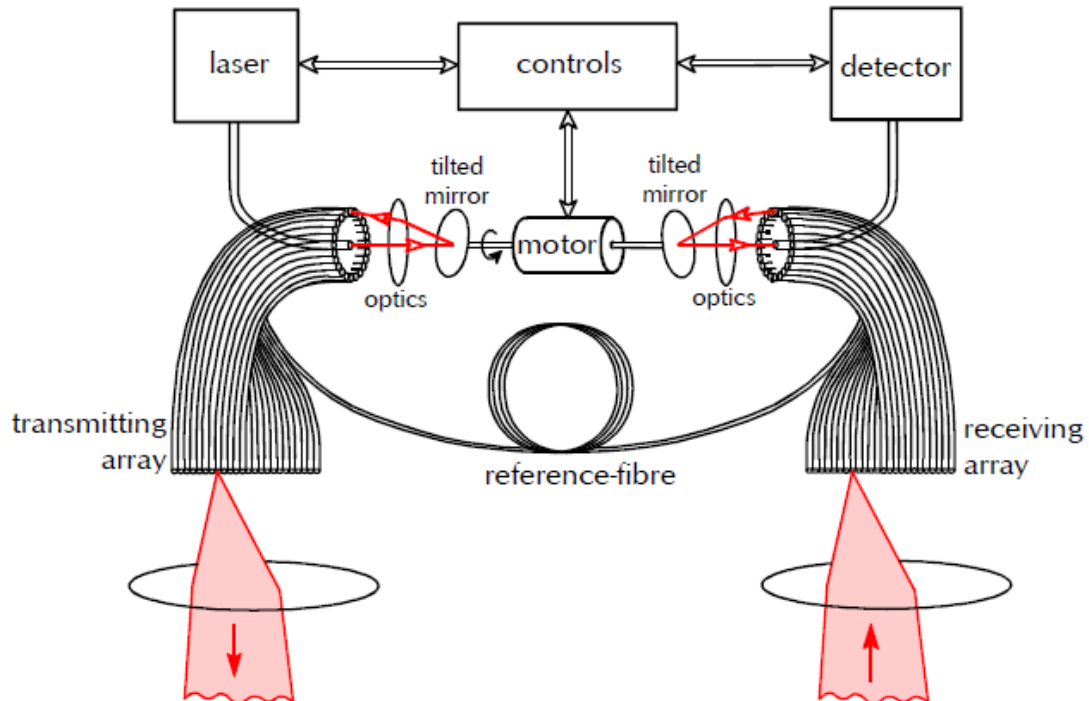
### Grösse der Ausleuchtungszone

Bei der Ausleuchtungszone wird zwischen kleinen und grossen Footprints unterschieden. Bei den kleinen Footprints beträgt die Grösse typischerweise mehrere Zentimeter und bei den grösseren sind dies bis zu mehreren Dekameter.

### Abtastfrequenz und Scanmuster

Die Abtastfrequenz und das Scanmuster unterscheiden sich je nach Hersteller. Die unterschiedlichen Scanmuster entstehen durch unterschiedliche Scan-Mechanismen, wie oszillierende Spiegel, Palmer Scanner, Fiber Scanner und rotierenden Polygonen. Nachfolgend ein Beispiel eines Fiber Scanners des Toposys-Systems, welches bei der Datenaufnahme für diese Arbeit verwendet wurde. Der Vorteil von Fiber Scannern ist, dass die übertragende und die empfangende Optik identisch ist und dass diese Scanner nur über wenig mechanische Komponenten verfügen.

Sie sind somit robuster und erlauben schnellere Scangeschwindigkeiten (Wehr und Lohr, 1999).



**Abbildung 16** Prinzip eines Faserscanners Quelle: Wehr und Lohr, 1999

Nahezu alle heute zum Einsatz kommenden kommerziellen LiDAR-Systeme sind tieffliegende und flugzeuggestützte Systeme, welche über kleine Footprints verfügen und die Echos diskret aufzeichnen (Ackermann, 1999). Bei den aufgezeichneten Daten handelt es sich um 3D-Punktwolken, welche an sich noch keine verwertbare Information darstellen. Es braucht daher geeignete Modelle, um aus den Punktwolken relevante Parameter zu extrahieren (Wagner et al., 2003).

### 2.3.7                      **Vor- und Nachteile von LiDAR im Allgemeinen und speziell bei Forstanwendungen**

Ein Vorteil von LiDAR bei Einsatz in Wäldern ist, dass beim Puls welcher im Infrarotbereich, meist zwischen 900 - 1064 Nanometern, ausgesendet wird, die Reflektanz von Vegetation sehr hoch ist. LiDAR weist bei der Erfassung grosser Waldflächen gegenüber den traditionellen Verfahren wie Feldaufnahmen, Luftbildauswertungen und Photogrammetrie klare Kostenvorteile auf und ist weniger zeitintensiv (Renslow, 2000). Auch liefern

Luftbilddauswertungen nur zweidimensionale Informationen, wohingegen LiDAR die räumliche Analyse in der dritten Dimension erlaubt (Lefsky et al., 2002). Auch Omasa et al. (2006) und Lewis und Hancock (2007) bezeichnen LiDAR als mächtiges Instrument für die direkte 3D-Messungen von Baumhöhen von Einzelbäumen und ganzen Baumkronendächern. Ein weiterer Vorteil von LiDAR ist die objektive Qualität der aufgenommenen Daten. Bei Feldaufnahmen und den Luftbildinterpretationen kann es gemäss Haara und Haarala (2002) aufgrund von subjektiven Bewertungen des Dateninterpretierers zu qualitativen Unterschieden in den Resultaten kommen. Weiter ist der Aufnahmezeitpunkt von LiDAR Systemen unabhängig von der Tageszeit, da es sich um ein aktives Fernerkundungsverfahren handelt (Renslow, 2000, Ackermann, 1999 und Wever und Lindenberger, 1999). Sowohl Dubayah und Drake (2002) als auch Wagner et al. (2008) bezeichnen LiDAR als Durchbruchstechnologie und sehen in LiDAR das vielversprechendste Fernerkundungsverfahren speziell für Forstanwendungen. Die erwähnten Autoren attestieren der LiDAR Technologie ein grosses Potential in der Vegetationscharakterisierung.

Neben diesen Vorteilen gibt es auch gewisse Nachteile. So ergeben sich aufgrund der geringen Grösse des Footprints in den kommerziellen Systemen und je nach Grösse des aufzunehmenden Gebietes, extensive Flugkampagnen. Auch führen kleine Footprints dazu, dass zum Beispiel die Baumspitzen nicht registriert werden (Zimble et al., 2003). Bei der Aufnahme mit LiDAR, wie auch alle anderen optischen Fernerkundungsverfahren, können bei zu starker Bewölkung oder starken atmosphärischem Dunst, die ausgesendeten Signale abgeschwächt werden bevor sie die Oberfläche erreichen (Wever und Lindenberger, 1999). Ein weiterer Nachteil ist, dass luftgestützte LiDAR-Systeme erst seit den 1990er Jahren kommerziell und kosteneffizient eingesetzt werden und somit noch relativ jung sind, was dazu führt, dass es noch gewisse Defizite im Bereich der angewandten Algorithmen und in der Datenprozessierungskette gibt. (Dubayah und Drake, 2000).

LiDAR bietet sich bei Forstanwendungen für die direkte Messung der Höhe des Baumkronendaches resp. Einzelbaumes, der vertikalen Verteilung der aufgezeichneten Echos und die Topographie unter dem Baumkronendach an. Daneben können weitere Kennwerte modelliert und abgeleitet werden. Werden LiDAR Daten mit Daten von anderen Sensoren fusioniert, ergeben sich noch weitere Möglichkeiten. Wang et al. (2008) führten ein Experiment durch, bei welchem die Unterscheidung in Wald und Nichtwald, einem der wichtigsten Parameter des NFI, vollautomatisch unterschieden werden kann. Hierfür kombinierten sie LiDAR Daten mit hochaufgelösten Luftbildern. Dabei werden

Bildsegmentierungsmethoden angewendet um homogene Flächen abzuleiten und mit den LiDAR Daten werden flache Gebiete und Gebäude ausgeschieden. Die anschließende Zusammenführung der Daten erlaubt die Unterscheidung in Wald- und Nichtwaldgebiete. Die Resultate ihrer Studie sind vielversprechend, bedürfen aber noch weiterer Entwicklung und ausführlicheren Tests. Ein weiteres Beispiel für die Möglichkeiten, welche sich bei der Fusionierung von LiDAR ergeben, zeigen Diederhagen et al. (2003), welche LiDAR Daten mit GIS-Daten zusammenführen und daraus Forstinventurparameter ableiten.

Eine Auflistung der Waldmerkmale und deren Herleitungen finden sich analog zu Dubayah und Drake (2000), in der nachstehenden Tabelle.

**Tabelle 4** Waldmerkmale und deren Herleitung Quelle: Dubayah und Drake (2000)

<b>Waldmerkmal</b>	<b>Herleitung</b>
Baumkronenhöhe	Direkt
Topographie	Direkt
Vertikale Verteilung der Echodaten	Direkt
Biomasse über dem Boden	Modelliert
Grundfläche	Modelliert
Mittlerer Stammdurchmesser	Modelliert
Vertikale Belaubungsprofile	Modelliert
Baumkronendachvolumen	Modelliert
Baumdichte	Abgeleitet
Baumkronendachbedeckungsgrad	Fusion mit anderen Sensoren
Leaf Area Index (LAI)	Fusion mit anderen Sensoren
Biodiversitätsindikator	Fusion mit anderen Sensoren

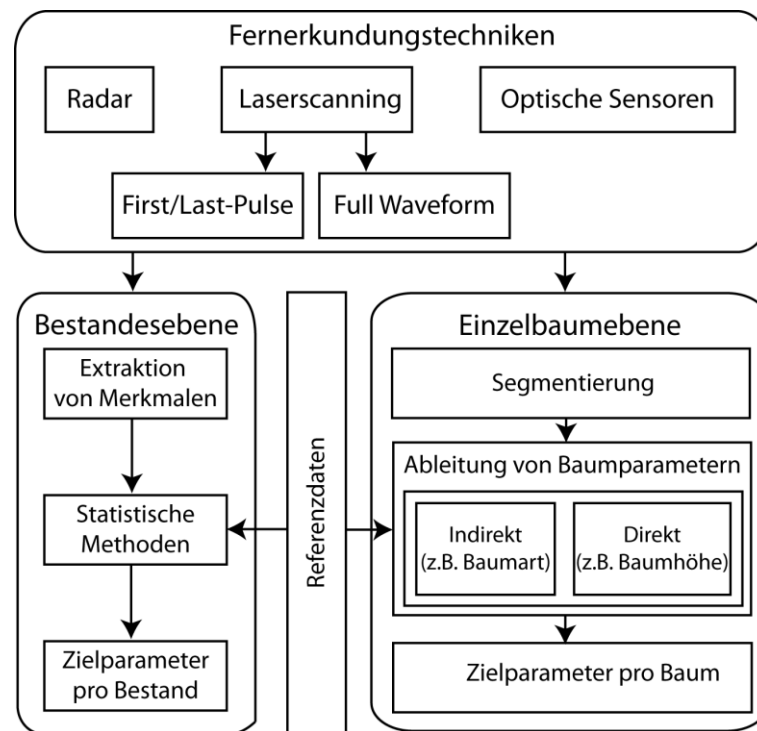
LiDAR-Systeme und die daraus direkt gewonnenen, modellierten, abgeleiteten oder fusionierten Daten sind somit eine wichtige Grundlage für die Informationsgewinnung in Wäldern und werden aufgrund ihrer systembedingten Eigenschaften auch immer öfters in der Praxis eingesetzt.

### 2.3.8 Weitere Fernerkundungstechniken bei Forstanwendungen

Neben LiDAR stehen für die Erfassung und Modellierung von Wäldern mehrere alternative Fernerkundungstechniken zur Verfügung. Folgende Abbildung gibt einen Überblick über die verwendeten Fernerkundungstechniken bei Forstanwendungen. Aktuell gibt es in der Wissenschaft zwei Hauptansätze um mit flugzeuggestütztem Laserscanning



forstwirtschaftliche Ressourcen zu charakterisieren. Der erste Ansatz beschäftigt sich mit dem Bereitstellen von Daten auf Bestandesebene und beim zweiten Ansatz wird versucht die Daten auf der Einzelbaumebene zu gewinnen, hierbei handelt es sich um die sogenannte Einzelbaumextraktion. Die Einzelbaumextraktion benötigt eine höhere Dichte an Laserechos als diejenige auf Bestandesebene (Reitberger, 2010 und Vaukonen et al., 2010).



**Abbildung 17** Fernerkundungstechniken bei Forstanwendungen und deren Anwendung auf Bestandes- und Einzelbaumebene Eigene Darstellung nach Reitberger 2010

## Radar

Bei Radio Detection And Ranging-Systemen (Radar), ebenfalls ein aktives Fernerkundungsverfahren, werden Mikrowellen ausgesendet und die Laufzeit und Amplitude der reflektierten Signale gemessen, so dass die Entfernung der Objekte zum Sensor berechnet werden kann. Mikrowellen nehmen im elektromagnetischen Spektrum Wellenlängen zwischen 1mm und 1m ein und besitzen eine Energie von  $2 \times 10^{-25}$  bis  $2 \times 10^{-22}$  J. Aufgrund dieser Wellenlänge bzw. Frequenz ergibt sich eine charakteristische Wechselwirkung mit der Materie. Die Reflexion der Mikrowellen wird dabei hauptsächlich von den elektrischen Materialeigenschaften beeinflusst. Weitere Merkmale sind ein hoher Transmissionsgrad der Atmosphäre und die Fähigkeit der Mikrowellen, in bestimmtem Mass in Objekte einzudringen oder sie zu durchdringen. Die Eindringtiefe ist dabei abhängig von der Wellenlänge. Sie ist

umso grösser, je länger die verwendeten Wellen sind und je niedriger der Feuchtegehalt des Materials ist. So können zum Beispiel die Wellen des L-Bandes (15 cm bis 30 cm) den Oberflächenstreuer Vegetation durchdringen und direkt mit dem darunter liegenden Volumenstreuer Boden interagieren. Aus der Intensität der Rückstreuung kann auf die Oberflächenrauigkeit und den Wassergehalt des Objektes geschlossen werden. Radar kann bei forstlichen Anwendungen sowohl auf Bestandes- als auch auf Einzelbaumebene angewendet werden. Es wird zwischen Radar-Systemen mit „Realer Apertur“ und Systemen mit „Synthetischer Apertur“ (engl. Synthetic Aperture Radar oder SAR) unterschieden (Reitberger, 2010). In einer Studie von Hyyppä et al. (2000) wurde die Genauigkeit von verschiedenen Fernerkundungsdaten, darunter auch Radar, untersucht. Sie konnten zeigen, dass die durch Radar ermittelte mittlere Baumhöhe um 3m von den Felddaten abweicht, welche bei konventionellen Forstinventaren 2m beträgt. Weiter kamen sie zum Schluss, dass Bilddaten mehr auswertbare Informationen enthalten als Radarbilder. In einer weiteren Studie von Sexton et al. (2009), welche durch LiDAR-, Radar- und Felddaten gemessene Baumhöhen miteinander vergleicht, kommen die Autoren zum Schluss, dass die mit LiDAR aufgenommenen Daten die höchste Genauigkeit aufweisen.

### Interferometrisches SAR

Eine Alternative zu LiDAR-Aufnahmen mit speziellem Fokus auf die Ermittlung von Baumhöhen bietet interferometrisches SAR, ebenfalls ein aktives Fernerkundungsverfahren. Dabei wird versucht durch den Phasenunterschied zwischen zwei SAR-Aufnahmen, die von verschiedenen Positionen stammen, dreidimensionale Objektinformationen abzuleiten (Reitberger, 2010). So werden die Höhen der einzelnen Baumhöhen mit der Hilfe des Vegetationshöhenmodells bestimmt (vgl. Kapitel 3.2.3). Für die Generierung des DSM eignen sich die kurzen Wellen des X-Bandes (ca. 3 cm), da diese kaum das Kronendach des Waldes durchdringen und an den Blättern und Zweigen gestreut werden. Für das DTM sind die Wellen des P-Bandes mit ihrer Wellenlänge von 30cm bis 100cm von Vorteil, da sie den Wald bis zum Boden durchdringen können. Der Nachteil bei der Ermittlung der einzelnen Baumhöhen ist, dass sich die Information nicht direkt messen lässt, sondern dass die Messung abhängig von der Waldstruktur ist, mit der Frequenz und der Polarisation variiert und zusätzlich in jedem Fall ein DTM vorhanden sein muss um die Baumhöhen zu errechnen (Lewis und Hancock, 2007). Unter anderem zeigen die Arbeiten von Andersen et al. (2003) und Heurich (2006) die Möglichkeiten mit interferometrischem SAR auf. Sie kommen dabei zum Schluss, dass die Oberflächenmodelle von interferometrischem SAR weniger detailliert sind als Oberflächenmodelle, welche mit der Hilfe von LiDAR generiert wurden. Sie kommen weiter

zum Schluss, dass es sich bei der Ableitung von Einzelbauminformationen aus Radardaten zwar um vielversprechende Ansätze handelt, die aber noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind und noch weitere Forschungen nötig sind.

### Passive optische Fernerkundungsverfahren

Diese Fernerkundungsverfahren umfassen Luftbildkameras und abbildende Spektrometer, welche die von der Waldoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung aufzeichnen. Die Aufzeichnung kann flugzeug- oder satellitengestützt sein. Bei digitalen Systemen unterscheidet man je nach Anzahl der spektralen Kanäle zwischen panchromatischen, multispektralen und hyperspektralen Sensoren (Reitberger, 2010).

- Luftbilder

In der Schweiz werden Luftbilder schon seit längerem in der Forstplanung und Inventarisierung verwendet (Wang et al., 2008). Im LFI sind Luftbilder seit den Anfängen ein unentbehrliches Hilfsmittel. Erstens erlauben sie eindeutige Nichtwald-Probeflächen zu identifizieren, welche von den Feldequipen nicht besucht werden müssen. Zweitens werden im Luftbild die Koordinaten von Fixpunkten in der Nähe von neuen Probeflächen bestimmt, die den Aufnahmegruppen das punktgenaue Lokalisieren der Probefläche im Gelände wesentlich erleichtern. Drittens wird seit der zweiten Landesforstinventur eine eigenständige Stichprobeninventur mit Wald-/Nichtwaldentscheid und weiteren Merkmalen durchgeführt (Brändli, 2010). In der dritten Landesforstinventur wurde der Wald noch stärker in einen landschaftlichen Kontext gestellt und die Luftbildinterpretation wurde inhaltlich und methodisch wesentlich weiterentwickelt. Die Interpretationen und Entscheide der Luftbildinterpretierenden wurden in einer Geodatenbank erfasst, was eine systematische Qualitätssicherung an hochwertigen und reproduzierbaren Daten erlaubt.

- Spektrometer

Die grosse Stärke von abbildenden Spektrometern liegt in der Möglichkeit mehrere Bänder im elektromagnetischen Spektrum erfassen zu können. Hyperspektrale Sensoren können Strahlungsintensitäten sogar in hunderten eng benachbarten Kanälen vom sichtbaren bis in den mittleren Infrarotbereich aufnehmen (Reitberger, 2010). Dies ermöglicht verschiedene biophysikalische und strukturelle Oberflächeneigenschaften abzuleiten (Blackburn, 2006). Beispiele für solche Sensoren sind das Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer

(AVIRIS), der Hyperspectral Mapper (HyMap<sup>TM</sup>) oder das Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment (HYDICE), welches für die Klassifikation von sieben tropischen Baumarten im Regenwald von Costa Rica eingesetzt wurde und eine höchste Klassifikationsrate von 92% erreichte (Clark et al., 2005).

Der grösste Nachteil der passiven optischen Fernerkundungsmethoden ist, dass sie das Kronendach eines Waldes nicht zu durchdringen vermögen und somit keine Aussagen über darunterliegende Vegetation gemacht werden können. Die Struktur von mehrstufigen Wäldern können so nur begrenzt erfasst werden.

### Kombination von LiDAR mit anderen Fernerkundungssensoren

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Studien, welche sich mit der Datenfusion von LiDAR-Daten und von Daten, die von anderen aktiven und passiven Fernerkundungssensoren stammen, in Waldgebieten beschäftigen. Unter anderem LiDAR und Radar in Hyde et al. (2007), LiDAR und Luftbilder in Desclée et al. (2008) und Wang et al. (2008), LiDAR und Satellitenbilder in Wulder und Seemann (2003) und Schardt et al. (2000), LiDAR und Multispektraldaten in Breidenbach et al. (2010) und Leckie et al. (2003) sowie die Kombination von terrestrischem und luftgestütztem LiDAR in Lindberg et al. (2010).

## 2.4 Forschungskontext

Seit ihrer Erfindung im Jahr 1960 werden Laser für militärische und zivile Aufgaben in der Fernerkundung eingesetzt. Im militärischen Bereich stehen die Aufklärung und Zielenksteuerung im Mittelpunkt des Interesses. Im zivilen Bereich stehen die Altimetrie (Höhenmessung) sowie atmosphärische und hydrologische Anwendungen im Vordergrund (Flood, 1999). Bei den hydrologischen Anwendungen steht vor allem die Bathymetrie im Fokus der Anwendungen. Die Bathymetrie beschäftigt sich mit der Vermessung der topografischen Gestalt der Meeresböden. Dabei werden Laserstrahlen im Wellenlängenbereich von 532 nm eingesetzt, da in diesem Bereich Wasser besser durchdrungen werden kann (Lefsky et al., 2002).

Die ersten LiDAR-Systeme in den 1980er Jahren waren Profiling-Systeme, bei welchen eine einzelne Datenzeile direkt unter dem Flugzeug aufgezeichnet wurde (Lefsky et al., 2002, Omasa et al., 2007). Die ersten Studien fokussierten dabei auf den Gebrauch von Profiling-Systemen für die Abschätzung von Baumhöhen, Walddichte, Baumspizien und

Biomasseabschätzungen (Hyypä et al., 2004). So zeigten zum Beispiel Nelson et al. (1984), dass die Änderung des Laserprofils mit der Änderung in der Vegetationsdichte korreliert und Maclean und Krabill (1986) zeigten auf, dass man mit LiDAR das Holzvolumen eines Waldgebietes abschätzen kann.

In den 1990er Jahren wurden dann die Profiling Systeme zu Scanning-Systemen weiterentwickelt, welche es erlauben grössere Flächen abzudecken. Dabei wird der Laserstrahl zum Beispiel mit der Hilfe von oszillierenden Spiegeln quer zur Flugrichtung abgelenkt (Omasa et al., 2007). Mitte der 1990er Jahre traten die ersten kommerziellen Anbieter im Bereich des Laserscannings auf, welche auf Kundenwunsch Laserscannerflüge zur Erfassung der topografischen Gegebenheiten und anderer Eigenschaften der Landoberfläche durchführten (Flood, 1999). Einer der ersten kommerziellen Anwendungen im Bereich des flugzeuggestützten Laserscannings in den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) war die Überwachung und Kartierung von Vegetation im Bereich von Stromleitungskorridoren, welche eine potentielle Gefahrenquelle darstellt, wenn sie in Kontakt mit den Stromleitungen kommt. Die Genauigkeit und Schnelligkeit von LiDAR macht es nun möglich grosse Gebiete sehr genau zu kartieren, was vor diesem Zeitpunkt nur mit zeitintensiven und teuren Felderhebungen möglich war. Zu Beginn der 1990er Jahre betrug die Punktdichte bei schmalen Footprints nur wenige Pulse pro  $m^2$  und die Pulsrepetitionsfrequenz lag bei 1 – 25 kHz. Durch die technologische Weiterentwicklung nahm die Genauigkeit und die Punktdichte der LiDAR Systeme zu. Vor allem die Weiterentwicklung von GPS und INS trugen zur Verbesserung der Genauigkeit bei. So liegen aktuelle Werte je nach System bei zum Teil weit über 10 Punkten pro  $m^2$  und die Pulsrepetitionsfrequenz beträgt 100 kHz (Omasa et al., 2007).

Die Forschungsschwerpunkte in den forstwirtschaftlichen Anwendungsgebieten von LiDAR liegen in den 1990er Jahren auf der Ermittlung von Durchschnittswerten auf Bestandesebene. So ermittelt Naesset (1997a) die durchschnittliche Baumhöhe und Nilson (1996) errechnete das durchschnittliche Stammvolumen aus First- und Last-Echo Daten auf ausgewiesenen Testflächen. Magnussen et al. (1999) stellten fest, dass 6 bis 10 Echos pro Baumkrone ausreichend sind um in den Daten einzelne Bäume zu erkennen. Hyypä und Inkenen (1999) zeigten dass Einzelbäume aus LiDAR Daten identifiziert werden können. Die Möglichkeit der Einzelbaumextraktion macht es nun möglich die individuellen Baumhöhen und weitere Parameter zu extrahieren respektive zu berechnen. Hyypä et al. (2001) zeigten zum ersten Mal, dass einzelne Bäume eines borealen Waldgebietes detektiert werden können. Sie setzten dafür einen automatischen Segmentierungsansatz ein, welcher es erlaubt wichtige forstwirtschaftlich relevante Parameter, wie beispielsweise die individuellen Baumhöhen und die individuellen Baumkronendurchmesser, abzuleiten. Mit diesen Angaben wiederum können

weitere Kennwerte, wie der durchschnittliche Stammdurchmesser und das Stammvolumen berechnet werden.

Die darauffolgenden Ansätze beschäftigen sich mehrheitlich mit der Extraktion von verschiedenen Einzelbauminformationen. Mehrheitlich verwendeten die verschiedenen Autoren Vegetationshöhenmodelle, welche sich aus der Differenz zwischen digitalem Oberflächenmodell und digitalem Geländemodell errechnen lassen oder Informationen, welche sich aus der 3D Punktwolke ableiten lassen. Unter anderem Andersen et al. (2003), Leckie et al. (2003), Morsdorf et al. (2003), Straub (2003), Popescu et al. (2003), Wack et al. (2003), Pitkänen et al. (2004), Solberg et al. (2006), Tiede und Hoffmann (2006) und Falkowski et al. (2006). Diese Autoren benutzten für ihre Forschung mehrheitlich Nadelwälder als Untersuchungsgebiete, da sich hier die Informationen leichter ableiten lassen. Brandtberg et al. (2003) beschäftigten sich zum ersten Mal mit der Extraktion von Einzelbäumen in einem Laubwaldgebiet im Osten der USA.

Um die Forschungserkenntnisse über die Einzelbaumextraktion zu erweitern und zu konsolidieren wurde ein EuroSDR / ISPRS Projekt zur Einzelbaumextraktion gegründet. Ziel war die Qualität, Genauigkeit und die Möglichkeiten von automatischen und halbautomatischen Einzelbaumextraktionsmethoden, welche auf LiDAR Daten mit hoher Punktdichte und hochauflösenden Bilddaten basieren, zu evaluieren. Insgesamt nahmen 12 Partner aus den USA, Kanada, Norwegen, Schweden, Finnland, Deutschland, Österreich, Schweiz, Italien, Polen und Taiwan daran teil (Kaartinen und Hyypä, 2004).

Ein weiteres Projekt, welches sich mit der Erforschung weitergehender Methoden der Laservermessungstechnik und deren Adaption an die besonderen Anforderungen im Bereich des Umweltmonitorings beschäftigte, war das Projekt NATSCAN, welches von 01.11.2001 bis zum 31.10.2004 von der Universität Freiburg in Breisgau koordiniert wurde. Dabei sollten in einer ersten Phase flugzeuggetragene Laserscannersysteme einerseits und stichprobenartig, terrestrisch erhobene Detailscans in der zweiten Phase andererseits zu einem Inventursystem integriert werden, welches vielfältige Möglichkeiten der Auswertung erlaubt. Dabei sollten exemplarisch unter anderem softwaregestützte Auswertungen für Betriebsinventuren öffentlicher und privater Forstbetriebe untersucht werden (<http://www.natscan.uni-freiburg.de>, Zugriff: 25.06.2010).

Wang et al. (2007) präsentierten einen voll automatischen Ansatz, der auf einer normalisierten 3D-Punktwolke basiert. Dabei wird das Untersuchungsgebiet in sogenannte Voxel (3D-Pixel) eingeteilt und anschliessend werden die einzelnen Punkte in den entsprechenden Voxeln in deren Ebene projiziert. Die so auf verschiedenen Höhen entstehenden Bilder werden mit der Hilfe eines hierarchisch morphologischen Prozesses zu

Baumkronen zusammengeführt. Dieser Prozess beginnt mit dem hellsten Pixel in der projizierten Ebene. Der Vorteil dieser Methode ist, dass nicht nur Bäume, deren Kronen im Kronendach und somit im digitalen Oberflächenmodell sichtbar sind, extrahiert werden können, sondern auch solche, die unterhalb des geschlossenen Kronendachs wachsen.

Rahmann und Gorte (2008) extrahierten Einzelbäume, welche mit sehr hochauflösenden (70 Echos / m<sup>2</sup>) LIDAR-Daten aufgenommen wurden. Die Aufnahme erfolgte aus einem Hubschrauber. Die Extraktion basiert nicht mehr auf einem Vegetationshöhenmodell sondern auf einem Dichtemodell. Die Grundüberlegung hierbei ist, dass bei Leaf-off Bedingung die Punktdichte aufgrund von Ästen im Zentrum der Baumkrone höher und gegen den Rand kontinuierlich abnehmen muss, als bei Leaf-on Bedingung. Weiter zeigten Rahmann und Gorte (2008a), dass ihre Methode auch geeignet ist, um einzelne Kronensegmente abzuleiten.

Reitberger et al. (2009) präsentierten einen neuen Segmentationsansatz für Einzelbäume aus LiDAR Daten. Dabei standen vom Testgebiet, welches sich im bayrischen Nationalpark befindet, sowohl First- und Lastechodaten von einem „Pulsed Laser“ Scanner (Falcon II von Toposys) als auch Daten, welche von einem „Continuous wave“ Scanner (Riegl LMS-Q560) aufgezeichnet wurden, zur Verfügung. Dies ermöglicht den direkten Vergleich der beiden Aufnahmesysteme. Die Daten des Riegl LMS-Q560 Scanners verfügen dabei über eine Punktdichte von 25 Punkte/m<sup>2</sup> und diejenige des Falcon II Scanners über eine von nur gerade 10 Punkten/m<sup>2</sup>. Mit ihrem neuen Segmentierungsansatz, welcher darauf beruht, dass das Gebiet eines Baumes in Voxel unterteilt wird und diese dann untereinander auf Ähnlichkeiten überprüft und in einem zweiteiligen Graph dargestellt werden, konnten die Autoren zeigen, dass die Detektierung von Bäumen in den unteren Waldschichten möglich ist. Dies ist bei den herkömmlichen Ansätzen, welche vom Vegetationshöhenmodell ausgehen, in dieser Form nicht möglich, da die Bäume der unteren Schichten von den oberen Schichten überlagert und somit nicht erkannt werden können. Auch wendeten die Autoren eine spezielle Stammdetektierungsmethode an, welche es erlaubt benachbarte Bäume voneinander zu trennen. Dies ist möglich da bei den Daten des Riegl Scanners, der über eine höhere Punktdichte verfügt, die Stämme der einzelnen Bäume durch mehr Echos abgebildet werden. Dieser Ansatz verbessert die Detektionsrate der Einzelbäume in den mittleren und unteren Baumschichten und verbessert die Genauigkeit der Stammposition. Mit ihrer Untersuchung zeigten die Autoren, dass die Verarbeitung von „Continuous wave“ Scanner Daten zu einem besseren Ergebnis im Vergleich zu Daten, welche mit einem „Pulsed Laser“ Scanner aufgenommen wurden, führen.

Die aktuellste Forschung im Bereich der Anwendung des Laserscanning im forstwissenschaftlichen Bereich ist die Auslotung der Möglichkeiten, welche sich durch die

Anwendung „Continuous wave“ Scanner Daten in diesem Bereich ergeben. Vergleiche hierzu unter anderem Gupta et al. (2010), Reitberger (2010), Reitberger et al. (2009), Cici et al. (2008) und Hyde et al. (2005).

Um die Effizienz der angewendeten Algorithmen zur Erkennung von Einzelbäumen zu ermitteln, werden vermehrt Testreihen durchgeführt. Siehe unter anderem Vauhkonen et al. (2010) und Monnet et al. (2010). Neben real existierenden Testgebieten werden auch Testgebiete simuliert um die verschiedenen Algorithmen zu testen, wie Zhang & Sohn (2010) zeigen. Weiterhin aktuelles Thema ist die Datenfusion zwischen LiDAR-Daten und anderen Daten, wie zum Beispiel Multispektraldaten in Buddenbaum & Hill (2010) und beispielsweise Landsatbildern in Hill et al. (2010). Um grossflächig Waldgebiete zu erfassen werden die Daten, welche satellitengestützte Lasersysteme erzeugen, ausgewertet und auf ihre Brauchbarkeit getestet, siehe hierzu Rosette et al. (2010).

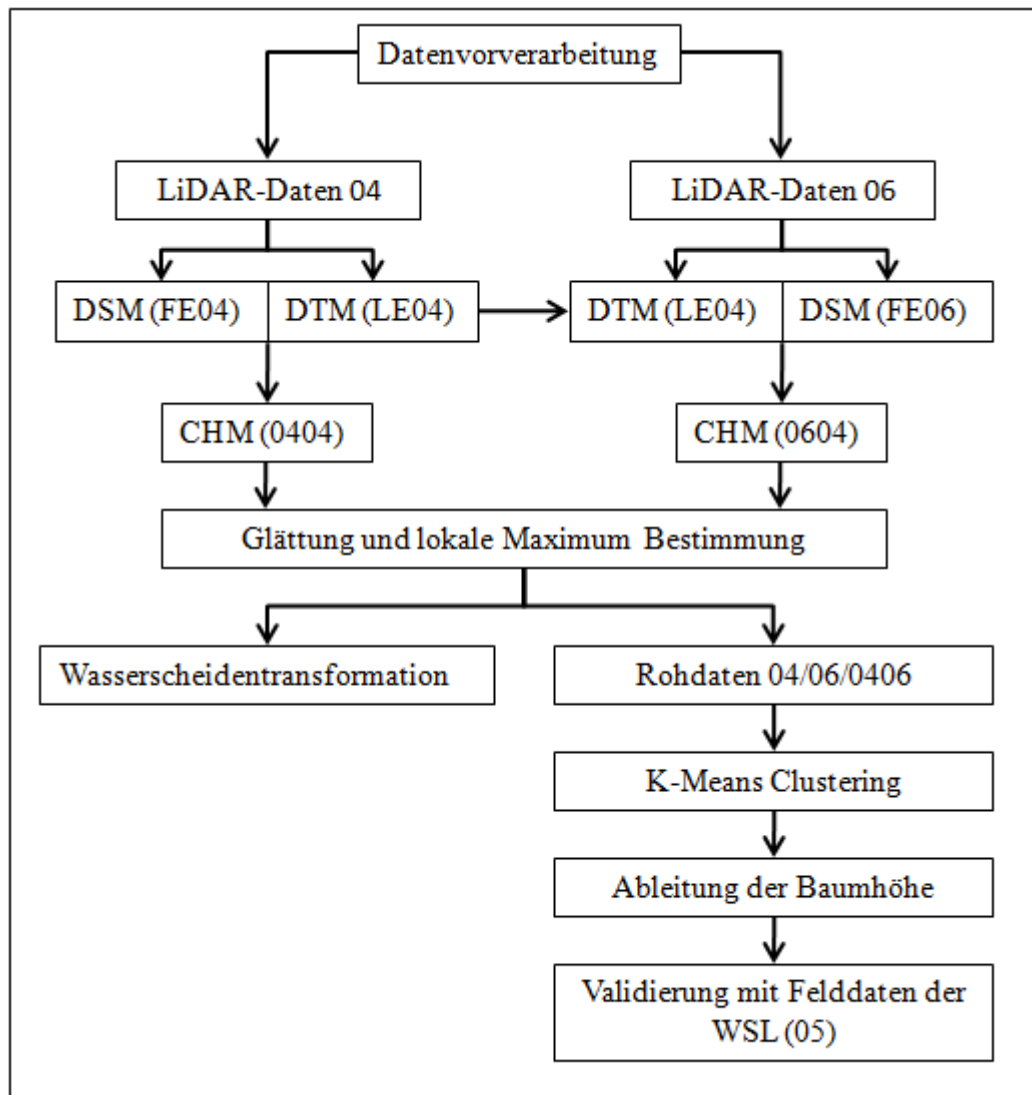


### 3 Methoden

Die Methodik lässt sich in zwei Teile gliedern. Im ersten Teil wird auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten mit den Oberflächenmodellen gearbeitet, um mögliche Informationen auf Einzelbaumbene zu extrahieren. Hierfür werden die vorhandenen Daten der beiden Datensätze vorverarbeitet, anschliessend werden die verschiedenen Oberflächenmodelle abgeleitet, welche im nächsten Schritt geglättet werden. Daran anschliessend erfolgt die Ermittlung der lokalen Maxima. Diese werden mit den Referenzdaten verglichen, was eine erste Aussage bezüglich der Baumpositionsgenauigkeit erlaubt. Dieses Vorgehen bezüglich der Ableitung von Einzelbauminformationen aus Rastermodellen findet in der Literatur breite Anwendung, vergleiche hierzu beispielsweise Persson et al., 2002, Brandtberg et al., 2003, Chen et al., 2006, Koch et al., 2006, Heurich 2008 und Reitberger 2010. Im ersten Teil wird somit versucht eine optimale Kombination der Faktoren Rasterweite und Anzahl Glättungsdurchläufe und den daraus resultierenden lokalen Maxima zu ermitteln.

Im zweiten Teil findet die eigentliche Segmentierung statt. Es werden zwei Segmentierungsmethoden angewendet. Weiterverfolgt wir jedoch nur die Methode des K-Means Clusterings, da die Wasserscheidentransformation bei den vorliegenden Daten keine für die Weiterverarbeitung brauchbaren Resultate liefert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird versucht Baumparameter abzuleiten. Es wurden die beide Datensätze 2004 und 2006 als auch die Kombination der beiden mit der Clusteranalyse prozessiert. Als Ausgangspunkt für diese Arbeit dienen die Matlab Routinen, welche von Dr. Felix Morsdorf im Zuge seiner Forschungstätigkeit entwickelt wurden. Die Matlab Routinen wurden zum Teil direkt übernommen aber auch modifiziert um sie den Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes anzupassen. Im Anschluss wurde noch der Baumparameter Baumhöhe abgeleitet und mit den Felddaten der Testfläche validiert.

Für die Auswertung der Datensätze wurden mit Matlab<sup>®</sup> Version 2010a der Firma MathWorks sowie dem Softwarepaket ArcGIS 9.3. der Firma ESRI gearbeitet. Um einen besseren Überblick über die durchgeführten Arbeitsschritte zu bekommen folgt auf der nächsten Seite ein detailliertes Arbeitsablaufdiagramm. FE steht dabei für First- und LE für Lastechodaten.



**Abbildung 18** Ablaufdiagramm der einzelnen Arbeitsschritte

Im Folgenden werden nun die durchgeführten Arbeitsschritte chronologisch gemäss ihrer Ausführung aufgeführt.

### 3.1 Datenvorverarbeitung

Die getrennt nach First- und Lastecho vorliegenden Rohdaten wurden so verarbeitet, dass sie in Form von X-, Y- und Z-Koordinaten vorliegen. Die entsprechenden Werte mussten beim Datensatz von 2004 nur ausgelesen werden. Beim Datensatz 2006 mussten die Werte zusammengeführt werden, da die Daten getrennt nach Flugstreifen vorlagen.

## 3.2 Höhenmodelle

Die Basisverarbeitung der Laserscannerdaten führt zu einem Höhenmodell, welches die Erdoberfläche präzise beschreibt; ein solches Höhenmodell wird als „Digital Surface Model“ (DSM) bezeichnet. In einem weiteren Arbeitsschritt können die Vegetation und die Gebäude entfernt werden, so dass ein Höhenmodell der Geländeoberfläche ein sogenanntes „Digital Terrain Model“ (DTM) entsteht ([www.toposys.de](http://www.toposys.de), Zugriff: 12.09.2010).

Das DSM ist somit ein Oberflächenmodell, welches aus den Firstechodaten gerechnet wird. Ein DTM hingegen ist ein Geländemodell, welches die Geländeoberfläche ohne die darauf befindlichen Objekte repräsentiert (Suter, 2008). Bei der Erstellung von qualitativ hochstehenden DTM's ist es nötig alle Vegetations- und Gebäudepunkte zu eliminieren ohne dabei die Punkte zu löschen, die von der Geländeoberfläche stammen (Kraus und Pfeifer, 1998). Für diesen Zweck werden verschiedene Filteralgorithmen entwickelt (Kraus und Pfeifer, 1998 und Chen et al., 2006). Diese Algorithmen werden mehrheitlich durch proprietäre Software implementiert und werden meist vom Laserdatenlieferant entwickelt (Popescu und Kini, 2004).

Aus den beiden Modellen DSM und DTM kann nun auch ein Vegetationshöhenmodell, auch „Canopy Height Model“ (CHM) genannt, berechnet werden. Es wird aus der Differenz zwischen dem DSM und dem DTM gebildet und gibt dabei die Objekthöhe über Grund wieder (Wang und Gong, 2009; Chen et al., 2006; Koch et al., 2002; Persson et al., 2002). Da die Höhenmodelle auf bestimmte Rasterweiten interpoliert werden, ergibt sich hier bereits ein erster Informationsverlust im Vergleich zu den Rohdaten (Axelsson, 1998).

### 3.2.1 DTM

Für das DTM werden das von TopoSys bereitgestellte DTM von 2004 verwendet. Grund dafür ist, dass die Daten bereits gefiltert vorliegen und zu einem Zeitpunkt aufgenommen wurden, als das Untersuchungsgebiet nicht belaubt war. Hierfür werden die X-, Y-Koordinaten und die Höhenwerte aus dem Rasterdatensatz DTM 2004 mit 1m Bodenauflösung, mit der Hilfe von ArcGis, ausgelesen. Anschliessend wurde das DTM mit einer dreiecksbasierten linearen Interpolationsmethode auf verschiedene Bodenauflösungen von 0.1m bis 1m in 0.1m Intervallen interpoliert.

### 3.2.2 DSM

Die DSM werden für beide Zeitpunkte 2004 und 2006 aus den Firstecho Rohdaten generiert. Diese werden analog zum DTM auch auf verschiedene Rasterweiten von 0.1m bis 1m in 0.1m Intervallen interpoliert, damit diese beiden Oberflächenmodelle im nächsten Schnitt miteinander verrechnet werden können.

### 3.2.3 CHM

Die nun in verschiedenen Rasterweiten vorliegenden DSM's und DTM's können dazu verwendet werden die CHM zu generieren. Es resultieren dabei die folgenden normalisierten CHM's:

- $CHM\ 2004 = DSM\ 2004 - DTM\ 2004$   
0.1 - 1m Auflösung in 0.1m Schritten
- $CHM\ 2006 = DSM\ 2006 - DTM\ 2004$   
0.1 - 1m Auflösung in 0.1m Schritten

## 3.3 Glättung

In einem weiteren Schritt werden die zuvor erzeugten CHM mit einem Filter in 6 Anwendungsdurchläufen geglättet. Hierfür wird ein Gauss 3x3 Tiefpassfilter verwendet,

1	2	1	
2	4	2	/ 16
1	2	1	

**Abbildung 19** Gauss 3x3 Tiefpassfilter

welcher in der Literatur breite Anwendung findet. Er eignet sich gemäss Chen et al. (2006) für die Unterdrückung von irrelevanten lokalen Maxima, was bei der Ermittlung von Baumspitzen im nächsten Schritt eine Rolle spielt. Die Filtergewichte betragen dabei im Zentrum 1/4, jeweils 1/8 bei den Nachbarn in X und Y Richtung sowie 1/16 bei den diagonalen Nachbarn. Vergleiche hierzu unter anderem Hyypä et al. (2001), Morsdorf et al. (2004) und Solberg et al. (2006).

### 3.4 Lokale Maximum Bestimmung

Um die Position von Bäumen respektive Baumspitzen wird vielfach eine sogenannte lokale Maxima Bestimmung durchgeführt. Diese Filterungsmethode ist in der Praxis vielfach erprobt, siehe unter anderem Pitkänen et al. (2001), Popescu und Kini (2002), Person et al. (2002), Morsdorf et al. (2004), Maltamo et al. (2004), Tiede et al. (2005), Solberg et al. (2006), Koch et al. (2006) und Chen et al. (2006). Die Methode weist gemäss Hopkinson et al. (2006) den Vorteil auf, dass sie robust und einfach ist. Ein lokales Maximum ist gemäss Popescu et al. (2003) ein Pixel, welches den höchsten Z-Wert (Höhe) im Vergleich zu seiner Nachbarschaft aufweist. Dabei werden unterschiedlich grosse durch den Benutzer definierte Filter angewendet. Am meisten verbreitet sind 3x3, 4x4 oder 5x5 Filter (Popescu und Kini, 2003). In dieser Arbeit wird ein 3x3 Filter verwendet, um die lokalen Maxima abzuleiten. Es werden nur die lokalen Maxima berücksichtigt, welche sich mindestens 3 Meter über dem Boden befinden. Die detektierten Baumspitzen dienen neben der Positionsbestimmung der einzelnen Bäume auch als Ausgangspunkte für die später folgende Segmentierung.

### 3.5 Bestimmung der optimalen Kombination der Rasterweite und Anzahl der Glättungsdurchläufe für die beiden Datensätze 2004 und 2006

Nach der Ermittlung der lokalen Maxima bei den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten zwischen Rasterweite und Anzahl Glättungsdurchläufen wird versucht, die bestmögliche Kombination zu eruieren. Hierzu werden die lokalen Maxima mit den Referenzdaten verglichen. Dabei wird jedem Referenzbaum ein lokales Maximum, sofern vorhanden, innerhalb eines bestimmten Radiuses zugewiesen. Dieser Radius stellt den mittleren Abstand von einem zum nächstgelegenen Baum dar und wird auf der Basis der Referenzdaten berechnet und beträgt für das Testgebiet 3.17 m. In der Matlab Routine wird er mit 3 m verwendet. Werden innerhalb dieses Radiuses mehrere lokale Maxima gefunden, wird nur jenes genommen, welches in Bezug auf die Höhe, jenem des Referenzbaumes am ähnlichsten ist. Wird kein lokales Maximum innerhalb des Radiuses gefunden, wird kein Baum zugewiesen. Diese Zuweisung ist nötig um überhaupt eine erste Aussage bezüglich der Baumposition machen zu können. Um die Güte der optimalen Kombination der Rasterweite und der Anzahl Glättungsdurchläufe zu evaluieren, wird folgendes Erfolgskriterium verwendet:

$$\text{Erfolgskriterium} = \frac{\text{Anz. zugewiesener Bäume}}{\text{Anz. Referenzbäume}} * \frac{\text{Anz. zugewiesener Bäume}}{\text{Anz. lokale Maxima}}$$

Das Erfolgskriterium wird dabei umso besser, je mehr die Anzahl der zugewiesenen Bäume mit der Anzahl der Referenzbäume und der Anzahl der lokalen Maxima übereinstimmt. Die am besten geeignete Kombination wird als Ausgangspunkt für die im nächsten Schritt folgenden Segmentierungsmethoden verwendet.

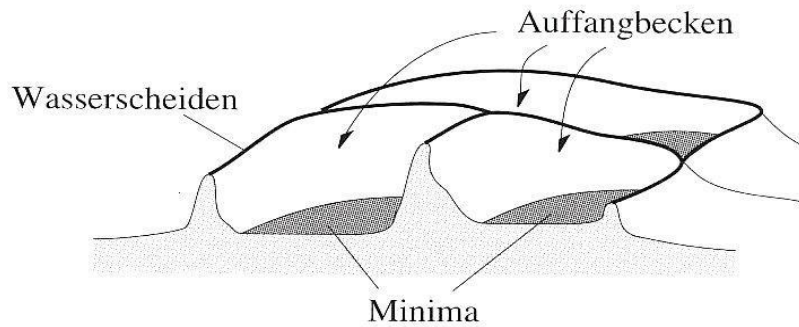
### **3.6 Segmentierung**

Von den bestgeeigneten lokalen Maxima ausgehend erfolgt nun eine Segmentierung, welche zum Ziel hat, die einzelnen Bäume innerhalb des CHM aufgrund ihrer Kronenumrisse zu extrahieren. Die Segmentierung eines Bildes kann als Einteilung des Bildes in verschiedene Regionen, die über bestimmte Eigenschaften verfügen, definiert werden. Nachdem das Bild in Segmente zerlegt ist, können für jedes Segment Messungen durchgeführt und Nachbarschaftsbeziehungen zwischen benachbarten Segmenten untersucht werden. Die Segmentierung eines Bildes ist somit ein Schlüsselschritt in Richtung der quantitativen Interpretation von Bilddaten (Soille, 2003). Zur Abgrenzung der einzelnen Baumkronen wird die Wasserscheidentransformation von Vincent und Soille (1991) und die k-means Clustering Methode von Morsdorf et al. (2004) angewendet.

#### **3.6.1 Wasserscheidentransformation**

Ein auf der Bildebene definiertes und für die Segmentierung eines Oberflächenmodells naheliegendes Segmentierungsverfahren ist die Wasserscheidentransformation. Dieses Verfahren stammt aus der digitalen Bildverarbeitung und interpretiert dabei die Grauwertunterschiede als Höhenrelief (Reitberger, 2010).

Der Grund hierfür, dass sich dieses Verfahren für die Segmentierung eines Oberflächenmodells anbietet, liegt gemäss Straub (2003) darin, dass die Grundidee der Wasserscheidentransformation in der Simulation einer Überflutung besteht. Dabei wird das Bild gemäss der folgenden Abbildung in sogenannte Auffangbecken segmentiert. Diese Auffangbecken entsprechen denjenigen Stellen des Oberflächenmodells, die sich beim Fluten mit einer Flüssigkeit zuerst füllen. Die namensgebenden Wasserscheiden sind Dammkronen zwischen den einzelnen Auffangbecken.



**Abbildung 20** Funktionsweise einer Wasserscheidentransformation Quelle: Soille 2003

Als Resultat der Transformation erhält man zusammenhängende Segmente, die den Auffangbecken entsprechen. Dabei muss das zu segmentierende Bild so transformiert werden, dass die gesuchten Regionen jeweils über ein lokales Minimum im transformierten Bild enthalten. Im Fall von Oberflächenmodellen bei denen – wie bei der Extraktion von Einzelbäumen respektive Baumkronen – die lokalen Maxima den gesuchten Objekten entsprechen, ist eine solche Transformation beispielsweise die Invertierung (Straub, 2003).

Die Wasserscheidentransformation findet in der Literatur breite Anwendung, sowohl bei Nadewäldern, als auch bei Laub- respektive Mischwäldern, unter anderem Pyysal und Hyypä (2002), Straub (2003), Chen et al. (2006), Rossmann et al. (2007) und Reitberger et al. (2009). Anwendung speziell bei Laub- respektive Mischwäldern siehe Patenaude et al. (2004), Koch et al. (2006), Kwak et al. (2007) und Heurich (2008).

### 3.6.2 K-Means Clustering

Die zweite Segmentierungsmethode, welche in dieser Arbeit beschrieben wird ist jene des K-Means Clusterings. Sie basiert auf der Vorlage von Morsdorf et al. (2004) und wird auf den Koordinatentripeln der Rohdaten durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein bekanntes Verfahren zur Clusteranalyse. Der Algorithmus ist weit verbreitet und in den gängigen statistischen Softwarepaketen, unter anderem auch in Matlab, integriert. Bei einer Clusteranalyse wird versucht aus den N-Elementen eines Merkmalsraumes K-Gruppen zu bilden, die Elemente enthalten, die sich untereinander ähnlich sind. Der k-means Clustering Algorithmus selbst versucht die Summe der Distanzen im Merkmalsraum zu den sogenannten Clusterzentren zu minimieren. Als Ähnlichkeitskriterium wird die euklidische Distanz verwendet. Die eigentliche Durchführung der Clusteranalyse geschieht in einem iterativen Prozess, welcher stark von den zu Beginn gewählten Clusterzentren abhängig ist (Bradley und Fayyad, 1998). Als Ausgangspunkte dienen die lokalen Maxima des Datensatzes 2004 mit

100cm Rasterweite und 1 Glättungsdurchlauf, welche im vorherigen Schritt ermittelt wurden. Die Z-Koordinate des Ausgangspunktes wird ebenfalls angepasst, da sich das Verhältnis von Kronenhöhe zu Kronendurchmesser eines Mischwaldgebietes erheblich von dem eines Gebirgsnadelwaldes unterscheidet. In der Arbeit von Morsdorf et al. (2004) ergaben sich hierfür Referenzwerte zwischen 3 und 6. In dieser Arbeit wurde das Verhältnis aufgrund der zur Verfügung stehenden Werte von 307 Referenzbäumen, von welchen alle Daten vorhanden sind, das mittlere Verhältnis berechnet, was 1.93 ergab. Auch wurde ein Höhengrenzwert von 3m eingesetzt, um Cluster, welche ausschliesslich oder zu einem grossen Teil Bodenechos aufweisen, auszuschliessen. Der Anteil der Bäume im Testgebiet, die kleiner als 3m sind, beträgt 1.67% und fällt somit nur gering ins Gewicht.

### **3.7 Ableitung des Baumparameters Höhe**

Für die Ableitung des Baumparameters Baumhöhe wurden die Daten der Cluster, welche aus der Clusteranalyse resultieren, verwendet. Die X- und Y-Koordinate geben den Schwerpunkt der in die XY-Ebene projizierten konvexen Hülle aller zum Cluster gehörenden Punkte wieder. Die Höhe ist der maximale Höhenwert eines jeden Clusters, welches die Spitze eines Baumes repräsentiert. Um ein Vergleich zwischen lasergewonnenen Daten und den Referenzdaten durchführen zu können, wurden die Werte der Laserdaten den Referenzdaten zugewiesen. Dabei wurde gleich vorgegangen wie bei der Zuweisung der lokalen Maxima und den entsprechenden Referenzdaten. Sowohl bei den Referenzdaten als auch bei den Laserdaten werden nur Höhenwerte, welche grösser als 3m sind, verwendet. Im Untersuchungsgebiet beträgt der Anteil der Bäume unter 3m nur gerade 1.67% und wird als vernachlässigbar betrachtet. Es werden die Daten von 2004 und 2006 als auch die Kombination der beiden verarbeitet. Nach erfolgter Zuweisung können die Referenzdaten direkt mit den aus dem Laserscanning gewonnenen Daten verglichen werden.

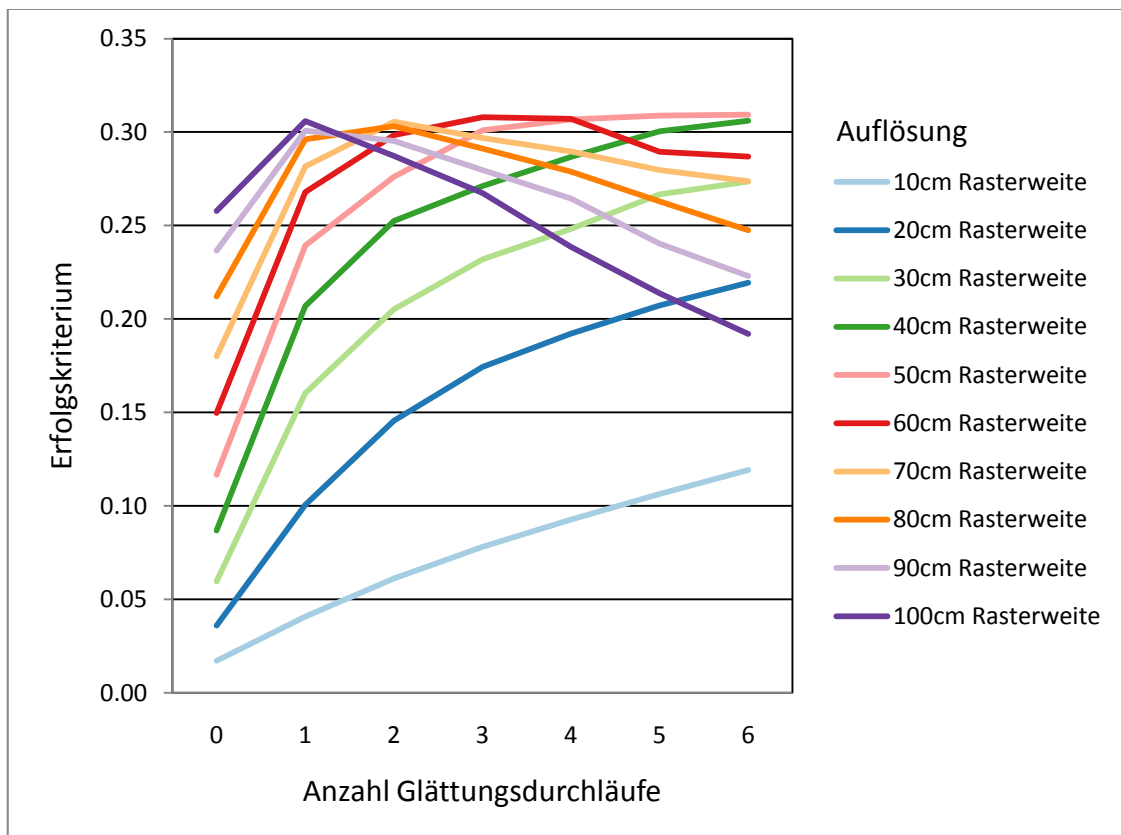


## 4 Resultate

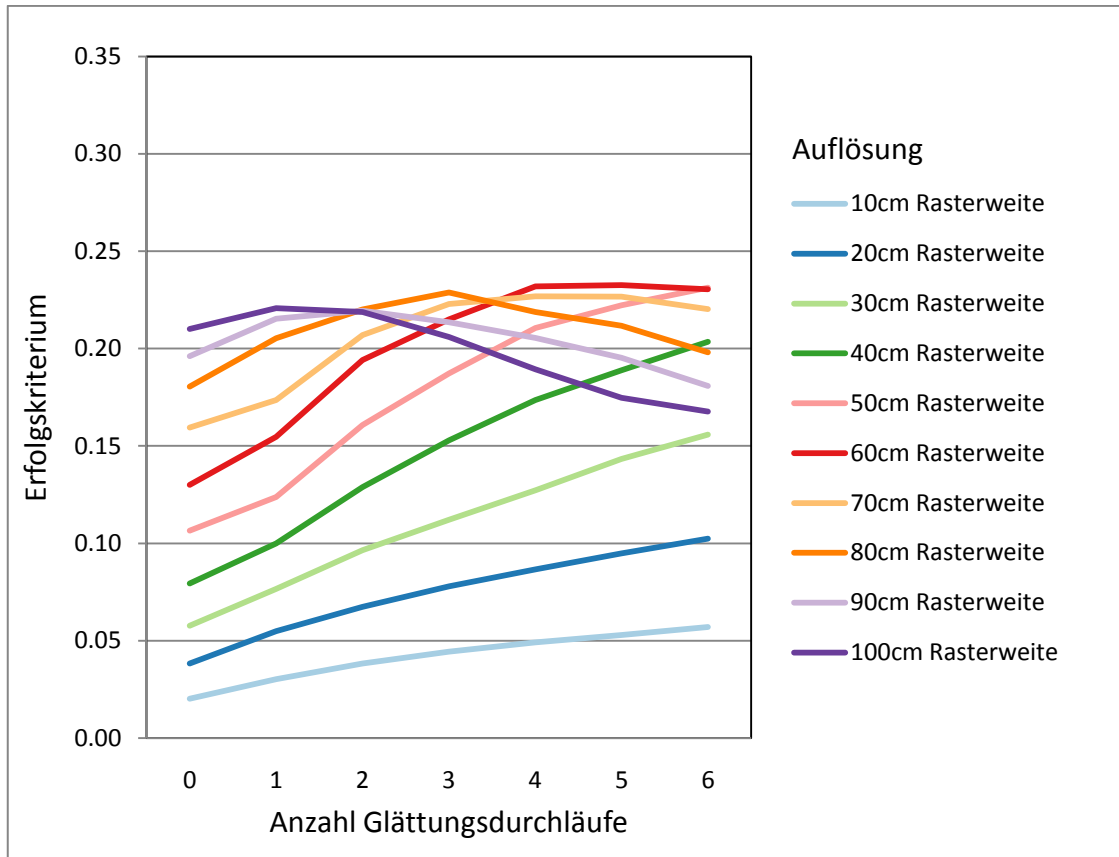
Im Folgenden werden die Resultate dargelegt.

### 4.1 Bestimmung der optimalen Kombination der Rasterweite und Anzahl der Glättungsdurchläufe für die beiden Datensätze

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen das Erfolgskriterium in Abhängigkeit der Rasterweite und der Anzahl Glättungsdurchläufe für die beiden Datensätze. Auffallend ist, dass der Datensatz 2006, welcher im belaubten Stadium aufgenommen wurde, besser abschneidet als der Datensatz 2004, welcher zum unbelaubten Zeitpunkt aufgenommen wurde. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Laserstrahl zum unbelaubten Zeitpunkt tiefer in den Wald eindringen kann und somit auch auf unterschiedlichsten Ebenen an Ästen etc. reflektiert wird. Aufgrund dieser unruhigeren Oberfläche werden im Datensatz 2004 mehr lokale Maxima ermittelt als im Datensatz 2006, was sich direkt im besseren Erfolgskriterium von 2006 niederschlägt.



**Abbildung 21** Kombination von Rasterweite und Anzahl Glättungsdurchläufen mit Erfolgskriterium für den Datensatz von 2006



**Abbildung 22** Kombination von Rasterweite und Anzahl Glättungsdurchläufen mit Erfolgskriterium für den Datensatz von 2004

Um detailliertere Aussagen über die Qualität der Kombinationsmöglichkeiten zu treffen werden nun die jeweils 4 höchsten Werte vertieft betrachtet. In Anbetracht dessen, dass jeder zusätzliche Glättungsdurchlauf zu einem Informationsverlust führt, werden jeweils die höchsten Werte bei niedriger Anzahl Glättungsdurchläufe bevorzugt behandelt, dies trifft speziell beim Datensatz 2004 zu. Die Rasterweite ist in cm angegeben.

Um eine erste Aussage über die Positionsgenauigkeit treffen zu können, werden die ermittelten lokalen Maxima, wie in der Methodik beschrieben, den Referenzdaten zugewiesen. Die Ergebnisse dieser ersten Zuweisung finden sich in den beiden folgenden Tabellen.

**Tabelle 5** Die 4 besten Kombinationsmöglichkeiten von Rasterweite und Anzahl Glättungsdurchläufen des Datensatzes 2006

<b>Rasterweite_Glättungsdurchläufe</b>	<b>100_1</b>	<b>70_2</b>	<b>60_3</b>	<b>60_4</b>
Anzahl zugewiesener lokaler Maxima	1371	1449	1425	1290
Anzahl Referenzbäume	3182	3182	3182	3182
Anteil zugewiesener lokaler Maxima an den Referenzbäumen	43.09%	45.54%	44.78%	40.54%
Abweichung in Ost-West (m)	1.00	0.95	0.97	0.94
Abweichung in Nord-Süd (m)	1.02	1.03	1.00	0.96
Mittlere Abweichung (m)	1.01	0.99	0.99	0.95

**Tabelle 6** Die 4 besten Kombinationsmöglichkeiten von Rasterweite und Anzahl Glättungsdurchläufen des Datensatzes 2004

<b>Rasterweite_Glättungsdurchläufe</b>	<b>100_1</b>	<b>80_2</b>	<b>80_3</b>	<b>60_4</b>
Anzahl zugewiesener lokaler Maxima	1649	1581	1340	1578
Anzahl Referenzbäume	3182	3182	3182	3182
Anteil zugewiesener lokaler Maxima an den Referenzbäumen	51.82%	49.69%	42.11%	49.59%
Abweichung in Ost-West (m)	1.12	1.08	1.07	1.08
Abweichung in Nord-Süd (m)	1.08	1.09	1.08	1.06
Mittlere Abweichung (m)	1.10	1.08	1.07	1.07

Die ideale Rasterweite liegt für beide Datensätze zwischen 60 und 100cm mit entsprechender Anzahl Glättungsdurchläufen zwischen 1 und 4. Der Anteil der zugewiesenen Bäume repräsentiert durch die lokalen Maxima an den Referenzbäumen, ist besser für den Datensatz 2004. Dies ist wiederum auf die höhere Anzahl der lokalen Maxima aufgrund der rauheren Oberfläche zurückzuführen. Für den Datensatz 2004 liegt die eigentliche Erkennungsquote zwischen 42.11% und 51.82% und für den Datensatz 2006 zwischen 40.54% und 45.54%.

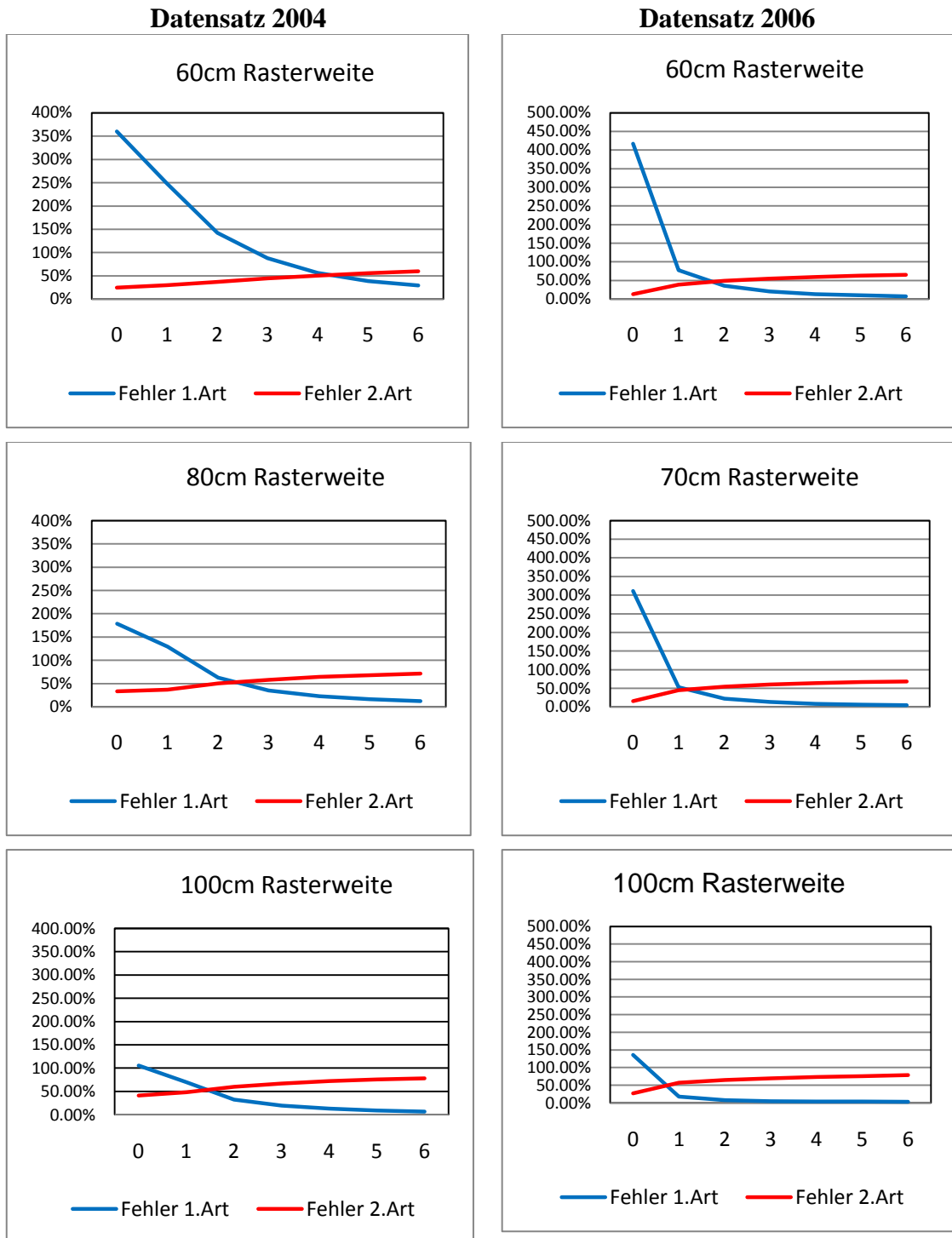
Betrachtet man die Positionsabweichungen zwischen den Referenzbäumen und den zugewiesenen lokalen Maxima, welche als entsprechende Baumspitzen angenommen werden, so werden mit dem Datensatz 2006 die genaueren Ergebnisse erzielt als mit dem Datensatz

von 2004. Dies ist auch wieder auf die höhere Anzahl der ermittelten lokalen Maxima zurückzuführen. Aufgrund der höheren Anzahl der lokalen Maxima, können diese innerhalb des definierten Radiuses eher den Referenzbäumen zugeordnet werden, was sich direkt an einem höheren Anteil der zugewiesenen Bäume an den Referenzbäumen widerspiegelt. Die Zuweisung funktioniert beim Datensatz 2004 also besser, dafür ist die Genauigkeit beim Datensatz 2004 sowohl in Ost-West als auch in Nord-Süd Richtung um ca. 10cm schlechter als beim Datensatz 2006.

Um eine Aussage über die Anzahl Glättungsdurchläufe machen zu können, werden bei den zuvor ausgewählten Rastergrößen beider Datensätze, sowohl der Fehler 1.Art (Commission Error), als auch der Fehler 2.Art (Omission Error) ermittelt und einander gegenübergestellt. Als Fehler 1.Art wird in dieser Arbeit der Anteil aller nicht zugewiesenen lokalen Maxima an der Anzahl der Referenzbäume angenommen. Als Fehler 2.Art wird der Anteil der Referenzbäume, welche keinem lokalen Maximum zugeordnet werden konnten, an der Anzahl der Referenzbäume angenommen. Der Fehler 1.Art nimmt mit zunehmender Anzahl Glättungsdurchläufe zuerst stark und dann immer schwächer ab. Dies ist auf die sinkende Anzahl lokaler Maxima zurückzuführen. Der Fehler 2.Art wird bei zunehmenden Glättungsdurchläufen grösser, da die Anzahl der Referenzbäume, welchen kein lokales Maximum im entsprechenden Radius zugeordnet werden kann, grösser wird. Ziel ist es den Fehler 1.Art zu minimieren und gleichzeitig den Fehler 2.Art so klein als möglich zu halten.

Betrachtet man nun die entsprechenden Rasterweiten und vergleicht diese sowohl innerhalb des gleichen Aufnahmejahre als auch zwischen den Aufnahmezeitpunkten, lässt sich feststellen, dass sich der Bereich, wo der Fehler 1.Art minimal und der Fehler 2. Art möglichst klein bleibt im Jahr 2004 von 4 bei 60cm Rasterweite über 2-3 bei Rasterweite 80cm zu 1 bis 2 Glättungsdurchläufen bei Rasterweite 100cm verschiebt. Vergleicht man dazu den Datensatz 2006 so zeigt sich ein leicht anderes Bild. Bei 60cm Rasterweite liegt der Bereich zwischen 1 und 2 und verschiebt sich bei 70cm nur leicht nach links zu 1 und liegt schliesslich bei 100cm Rasterweite zwischen 0 und 1 Glättungsdurchlauf.

Es kann somit gesagt werden, dass beim Datensatz 2004 der Bereich bei dem der Fehler 1.Art minimal und gleichzeitig der Fehler 2.Art so klein als möglich ist um 1 bis 2 Glättungsdurchläufen höher liegt als beim Datensatz 2006.



**Abbildung 23** Fehler 1.Art und Fehler 2.Art für die jeweiligen Rasterweiten der beiden Datensätze 2004 (links) und 2006 (rechts)

Dies ist mit der rauheren Oberflächenstruktur beim Datensatz 2004 erklärbar. Daten, welche zu einem laubfreien Zeitpunkt aufgenommen werden, müssen somit stärker geglättet werden. Für die im nächsten Schritt folgende Segmentierung, bei welcher die lokalen Maxima als Ausgangspunkte der Segmentierung dienen, werden die lokalen Maxima aus dem

Datensatz 2004 mit 100cm Rasterweite und einem Glättungsdurchlauf verwendet, da diese Rasterweite über den höchsten Anteil zugewiesener Bäume an den Referenzbäumen verfügt und dies für die Segmentierung an sich wichtiger ist als die Positionsgenauigkeit.

## 4.2 Wasserscheidentransformation

Auf der Basis der erzeugten CHM wurde versucht eine Wasserscheidentransformation durchzuführen. Als Ausgangspunkte dienen die lokalen Maxima mit 100cm Auflösung und 1 Glättungsdurchlauf. Mit den zur Verfügung stehenden Daten konnten keine brauchbaren Resultate erzielt werden. In beiden Datensätzen kommt es zu einer starken Untersegmentierung, welche völlig unbrauchbar ist in Bezug auf die Extraktion von Einzelbauminformationen. Auch die Anwendung anderer lokaler Maxima mit anderen Rasterweiten und Glättungsdurchläufen führte zu keinem brauchbaren Ergebnis. Der Grund hierfür kann in den zu geringen Helligkeitsunterschieden der Höhenwerte liegen. Auch eine Ausdehnung des Helligkeitsbereiches führte zu keinem Ergebnis, weshalb der Versuch abgebrochen wurde und auf die K-Means Clustering Methode gewechselt wurde.

## 4.3 K-Means Clustering

Es wurde die Methodik von Morsdorf et al. (2004) angewendet, welche nur leicht modifiziert wurde. Für das Untersuchungsgebiet Birriboden ergeben sich dabei die folgenden Laserpunktdichten und Anzahl Laserechos im Testgebiet:

**Tabelle 7** Anzahl Laserechos und Punktdichten innerhalb des Testgebietes

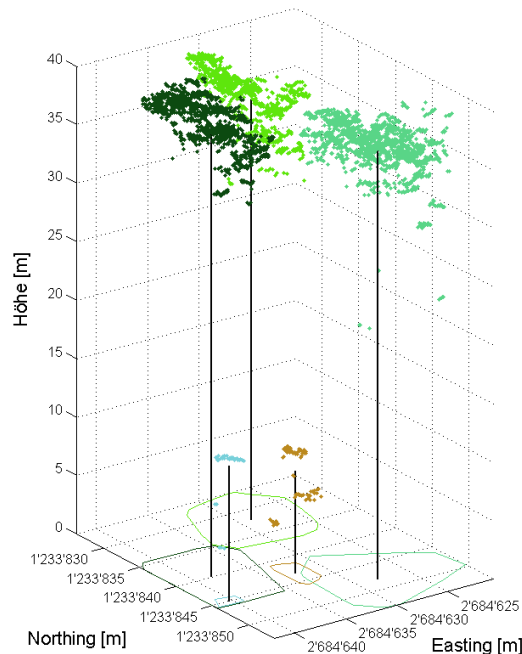
<b>Datensatz</b>	<b>Anzahl Laserechos (First-und Lastecho)</b>	<b>Punktdichte (Echos / m<sup>2</sup>)</b>
2004	1'586'509	16.61
2006	1'848'167	14.26
2004 & 2006	3'434'676	30.87

Das Clustering wurde für die beiden Datensätze einzeln sowie für die beiden Datensätze zusammen durchgeführt. Das Clustering lieferte die auf der nächsten Seite in Tabelle 8 dargestellten Ergebnisse. Die Clusteranzahl, welche potentielle Baumstandorte widerspiegeln wurden dahin eingeschränkt, dass nur Cluster, welche Werte höher als 3m aufweisen, weiterprozessiert werden. Bei der Durchführung der Clusteranalyse kam es zur Bildung von leeren Clustern, deren Anzahl im Datensatz 2006 deutlich am höchsten liegt, gefolgt vom Datensatz 2004 und deren Kombination.

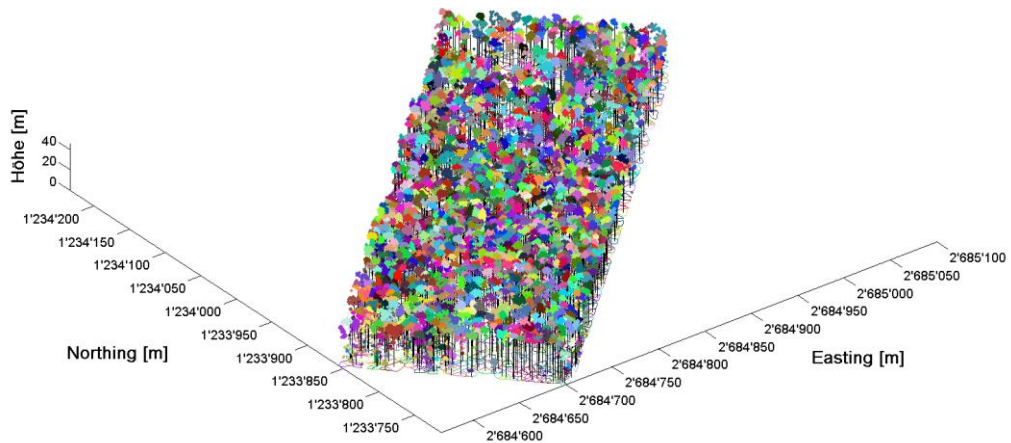
**Tabelle 8** Ergebnisse des K-Means Clustering

Datensatz	Anzahl Cluster	Anzahl leere Cluster	Anteil leere Cluster an der Anzahl Cluster	Cluster mit Höhe > 3m
2004	4503	23	0.51%	2484
2006	3404	292	8.58%	3058
2004 & 2006	4638	2	0.04%	3567

Betrachtet man nur die Cluster mit einer Höhe von mehr als 3m, so kommt die Clusteranzahl derjenigen der 3182 Referenzbäume beim Datensatz 2006 am nächsten, gefolgt vom Datensatz 2004. Beim kombinierten Datensatz kommt es zu einer eigentlichen Übersegmentierung. Es werden mehr Cluster gebildet als es Referenzbäume gibt. Warum bei der Durchführung der Clusteranalyse beim Datensatz so viele leere Cluster gebildet wurden, müsste weiter untersucht werden. Ein Zusammenhang mit der aus den Befliegungszeitpunkten resultierenden Punktdichten und Aufnahmeparameter könnte als mögliche Ursache in Frage kommen. Nachfolgend abgebildet ist ein Ausschnitt eines Clusteranalyseresultat. Abgebildet sind 5 Cluster des kombinierten Datensatzes 2004 und 2006.

**Abbildung 24** Ausschnitt eines Clusteranalyseresultats des kombinierten Datensatzes 2004 & 2006

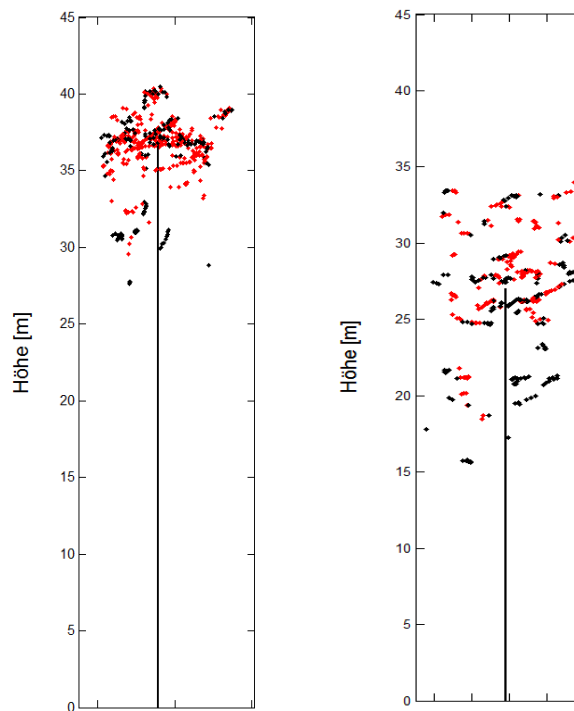
Um einen Eindruck für das gesamte Untersuchungsgebiet zu geben, ist im folgenden das Resultat der Clusteranalyse für den Datensatz 2004 abgebildet. Im Anhang C werden Querschnitte der Ergebnisse der Clusteranalyse in X- (Easting [m]) und Z-Achse (Höhe [m]) dargestellt.



**Abbildung 25** Ergebnis der Clusteranalyse für den Datensatz 2004 für das gesamte Untersuchungsgebiet des Birribodens

Neben den Koordinaten und der Höhe wurde in der Clusteranalyse auch die Erkennung von First- und Lastecho mitgegeben. Somit ist es nun möglich innerhalb des Baumsegmentes die Punkte nach Last- und Firstecho zu unterscheiden. Ein Beispiel ist auf der nächsten Seite abgebildet. Dabei handelt es sich um zwei Baumsegmente des Datensatzes 2006. Rote Punkte entsprechen den Firstecho- und schwarze Punkte den Lastechodaten. Diese Unterscheidung ist auch auf den Datensatz 2004 und auf den kombinierten Datensatz 2004 und 2006 anwendbar.





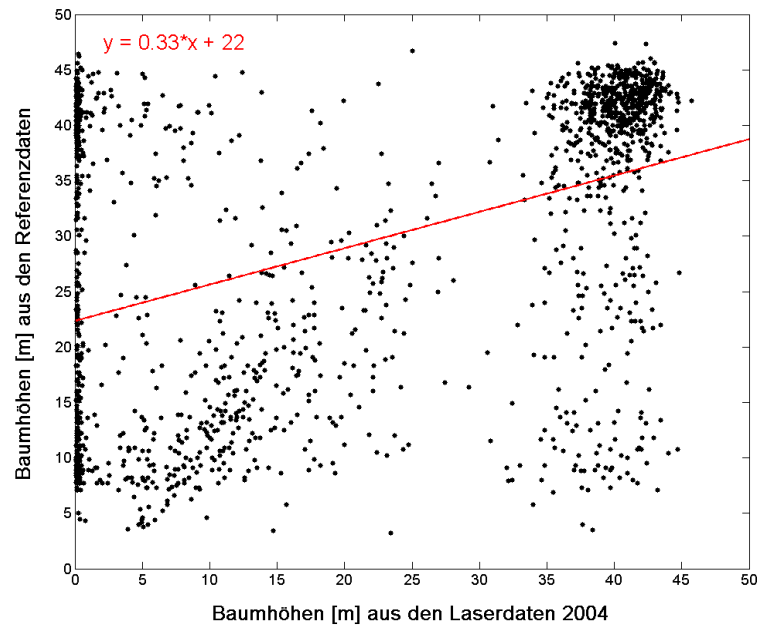
**Abbildung 26** Zwei Baumsegmente des Datensatzes 2006 mit farblich unterscheidbaren First- und Lastechodaten

Um die Clusterdaten mit den Referenzdaten zu vergleichen, wurde die gleiche Zuweisungsmethodik wie bei den lokalen Maxima angewendet. Die Resultate der Zuweisung werden in der Tabelle 9 im nächsten Kapitel aufgeführt.

#### 4.4 Ableitung des Baumparameters Höhe

Im Untersuchungsgebiet gibt es 3182 Referenzbäume, welche über 3m hoch sind. Für die Zuweisung werden sowohl in den Referenzdaten als auch in den Clusterdaten der jeweiligen Datensätze nur Höhendaten berücksichtigt, welche grösser als 3m sind. Der Grund hierfür liegt in der Optimierung der Zuweisungsquote. Vor allem beim Datensatz 2004 und dem kombinierten Datensatz 2004 & 2006 kommt es zu Falschzuweisungen zwischen Referenzbäumen und Clusterdaten, welche sich in Bodennähe befinden.

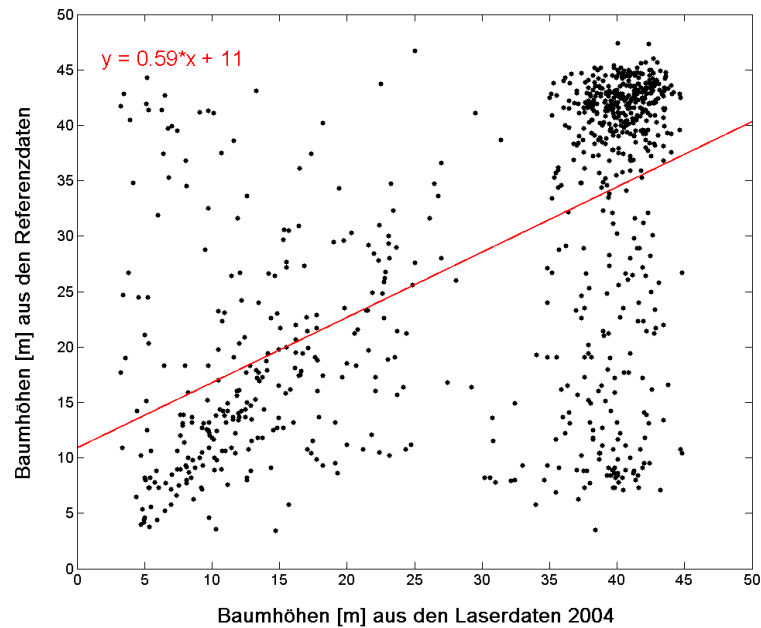
Die Abhängigkeit der Baumhöhe, als metrisch messbares Merkmal, wird mit einer einfachen linearen Regression untersucht. Als Beispiel wird hier das Zuweisungsdiagramm für die Clusterdaten ohne Höhenbeschränkung für den Datensatz 2004 aufgezeigt.



**Abbildung 27** Zuweisungsergebnis der aus Laserdaten abgeleiteten Clusterhöhen und den Referenzdaten für den Datensatz 2004 (ohne Höhenbeschränkung)

Gut zu erkennen sind die Punktdaten, welche von den Laserdaten 2004 stammen und deren maximale Höhe nahe am Boden liegt. Die Fehler der Zuweisung liegen darin, dass sich innerhalb von 3m um den Referenzbaum, ein oder mehrere Clusterkoordinaten befinden. Bei der Zuweisung wird dem Referenzbaum das nächstähnliche Clusterzentrum in Bezug auf die Höhe zugewiesen. Werden nur Cluster und Referenzdaten mit einer Höhe von mehr als 3m verwendet, lässt sich das Resultat merklich verbessern.

Nachfolgend für den Datensatz 2004 das Ergebnis der Zuweisung mit den Baumhöhenwerten über 3m.



**Abbildung 28** Zuweisungsergebnis der aus Laserdaten abgeleiteten Clusterhöhen und den Referenzdaten für den Datensatz 2004 (mit Minimaler Höher 3m)

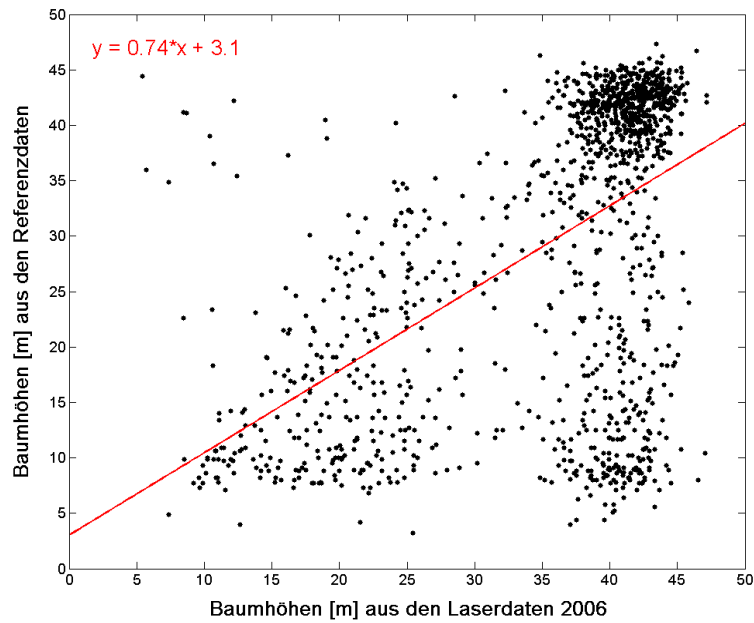
Das Resultat der Zuweisung von Clustern zu den entsprechenden Referenzbäumen ist in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

**Tabelle 9** Anteil der den Referenzbäumen zugewiesenen Clusterdaten

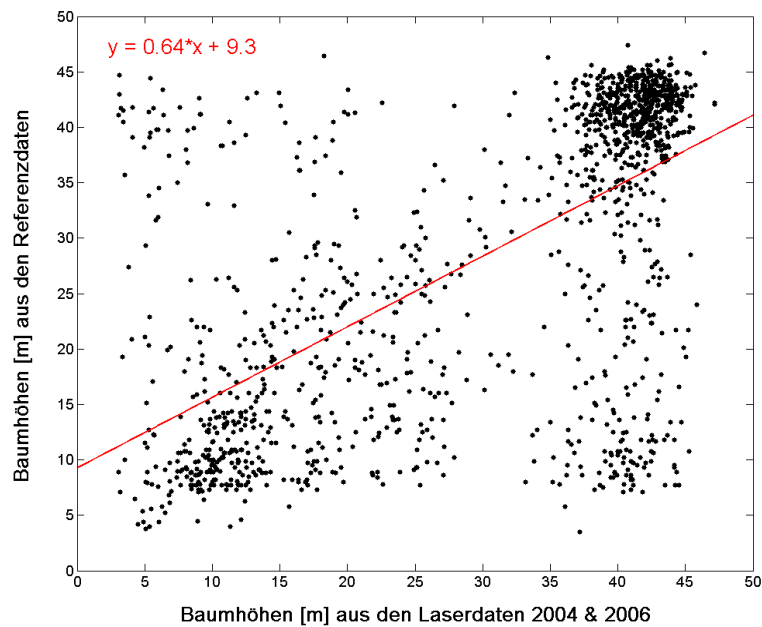
Datensatz	Cluster mit Höhe > 3m	Anzahl zugewiesener Cluster innerhalb 3m Radius um Referenzbaum	Anteil zugewiesener Cluster an den Referenzbäumen
2004	2484	1350	42.43%
2006	3058	1501	47.17%
2004 & 2006	3567	1563	49.12%

Nachstehend sind noch die Zuweisungsdiagramme mit einer minimalen Höhe von 3m für den Datensatz 2006 und den kombinierten Datensatz 2004 & 2006 aufgeführt. Vergleicht man den Datensatz 2004 mit dem Datensatz 2006, kommt es beim Datensatz 2006, aufgrund der Aufnahme im belaubten Zustand, zu deutlich weniger Misszuweisungen im Bereich von niedrigen Baumhöhen, welche aus den Laserdaten abgeleitet werden, da der Laserstrahl

aufgrund der Belaubung den Boden gar nicht erreicht. Dafür steigt die Anzahl der Baumhöhen der Laserdaten, welche niedrigeren Baumhöhen der Referenzdaten zugewiesen werden.



**Abbildung 29** Zuweisungsergebnis der aus Laserdaten abgeleiteten Clusterhöhen und den Referenzdaten für den Datensatz 2006 (mit Minimaler Höhe 3m)



**Abbildung 30** Zuweisungsergebnis der aus Laserdaten abgeleiteten Clusterhöhen und den Referenzdaten für den kombinierten Datensatz 2004 & 2006 (mit Minimaler Höhe 3m)

Beim kombinierten Datensatz sind diese Effekte weniger stark ausgeprägt, was zu erwarten war. Um einen Vergleich über die Qualität der Zuweisung machen zu können, werden nun noch die Abweichungen in Ost-West und Nord-Süd aufgeführt. Für die 3 Datensätze ergibt sich folgende Tabelle.

**Tabelle 10** Positionsabweichungen der den Referenzbäumen zugewiesenen Clusterdaten

	Datensatz 2004	Datensatz 2006	Kombinierter Datensatz 2004 & 2006
Abweichung Ost-West (m)	1.03	1.08	1.08
Abweichung Nord-Süd (m)	1.07	1.08	1.06
Mittlere Abweichung (m)	1.05	1.08	1.07

Die bisher betrachteten Baumhöhen der Referenzdaten wurden allesamt aus einem Regressionsmodell hergeleitet. Zusätzlich wurden im Untersuchungsgebiet auch die Baumhöhen von 307 Bäumen gemessen. Dies erfolgte über allometrische Beziehungen. Um eine Aussage über die Qualität der berechneten und gemessenen Baumhöhen machen zu können, wurden für die 3 Datensätze jeweils die mittlere Baumhöhe, die Standardabweichung (STD) sowie die Differenz der Laserbaum- und Referenzbaumhöhe der zugewiesenen Bäume und deren Korrelationskoeffizient berechnet. Die detaillierte Tabelle ist im Anhang D aufgeführt.

**Tabelle 11** Baumhöhendifferenz und Korrelationskoeffizient der den Referenzdaten zugewiesenen Clusterdaten

	Differenz Baumhöhe Laserdaten - Referenzdaten (m)	Korrelations- koeffizient
Datensatz 2004 (Berechnete Werte)	1.01	0.566
Datensatz 2004 (Gemessene Werte)	-1.53	0.618
Datensatz 2006 (Berechnete Werte)	6.12	0.526
Datensatz 2006 (Gemessene Werte)	2.5	0.557
Datensatz 2004 & 2006 (Berechnete Werte)	1.81	0.629
Datensatz 2004 & 2006 (Gemessene Werte)	-0.11	0.609

## 5 Diskussion der Resultate

Im Folgenden sollen die erzielten Resultate vertieft analysiert, mit anderen Forschungsarbeiten verglichen, sowie die dabei auftretenden Schwierigkeiten aufgezeigt werden.

### 5.1 Bestimmung der optimalen Kombination der Rasterweite und Anzahl der Glättungsdurchläufe für die beiden Datensätze

Die Rasterweite und die Anzahl der Glättungsdurchläufe mit entsprechendem Filter der Vegetationshöhenmodelle, beeinflussen direkt die Anzahl der daraus abgeleiteten lokalen Maxima, welche als Einzelbaumpositionen angenommen wurden. Die beiden Hauptprobleme bei der Bestimmung der Baumspitzen mit der lokalen Maxima Methode sind zum einen, dass nicht jedes lokale Maxima, welches eine Baumspitze darstellt, gefunden wird. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn sich die Baumspitze eines kleineren Baumes in der Nähe von Ästen eines grösseren Baumes befindet (Pitkänen et al., 2001). Weiter problematisch ist der grosse Fehler 1. Art. Dabei werden lokale Maxima, welche effektiv keine Baumspitzen darstellen, fälschlicherweise als Baumspitzen detektiert (Chen et al., 2006). Die Anzahl der lokalen Maxima ist umso grösser, je kleiner die Rasterweite und je weniger stark die Daten geglättet sind. Wie in vielen Studien gezeigt, hat die Wahl der Anzahl Glättungsdurchläufe auf dem Vegetationshöhenmodell direkt Einfluss auf die beiden Erfolgskriterien ( Fehler 1. Art und Fehler 2. Art). Weniger stark geglättete Daten haben eine hohe Anzahl lokaler Maxima zur Folge, was sich einerseits in einem hohen Anteil zugewiesener Bäume widerspiegelt, andererseits es dadurch aber auch viele fälschlicherweise als Bäume klassierte lokale Maxima gibt. Das Gegenteil ist bei einer hohen Anzahl von Glättungsdurchläufen der Fall (Solberg et al., 2006).

Ziel wäre es nun eine möglichst gute Kombinationsmöglichkeit der Faktoren Rasterweite, Glättungsdurchläufe und der daraus resultierenden Anzahl lokaler Maxima zu finden. Die optimale räumliche Auflösung, des im Zentrum der Betrachtung stehenden Elementes, sollte möglichst demjenigen des real existierenden Elements, in diesem Fall desjenigen eines Einzelbaumes, entsprechen. Da sich Bäume stark unterscheiden können, gibt es keine eigentliche beste Lösung. Vielmehr kann nur eine Empfehlung abgegeben werden, die jedoch stark von den Eigenschaften des Untersuchungsobjektes abhängt. Betrachtet man die Bäume im Untersuchungsgebiet Birriboden, so beträgt der Anteil alle Bäume, welche grösser als 8m sind 94.3%, jener der Bäume grösser als 25m beträgt sogar 52.44% und verfügen alle über entsprechende Ausdehnungen. So beträgt der mittlere Kronendurchmesser aller

Referenzbäume auf der Testfläche 9.37m. Dieser Wert wurde aus 307 Bäumen abgeleitet, von welchen diese Angaben verfügbar sind. Diese Tatsache muss man sich bei den folgenden Betrachtungen immer vergegenwärtigen.

### **5.1.1 Vergleich mit anderen Arbeiten**

Für die in beiden Datensätzen ermittelten optimalen Rasterweitenbereiche von 60 bis 100cm der entsprechenden Oberflächenmodelle und die darauf basierenden lokalen Maxima, können als geeignet betrachtet werden, die Charakteristik (Ausdehnung und Höhe) und Position von Einzelbäumen des Testgebietes wiederzugeben. In anderen Arbeiten, welche sich mit lokalen Maxima und den entsprechenden Oberflächenmodellen beschäftigen, werden ähnliche Rasterweiten verwendet. Patenaude et al. (2004) und Kwak et al. (2007) verwenden in den Mischwaldgebieten ihrer Arbeiten ebenfalls eine Rasterweite von 100cm, die Rasterweiten in Morsdorf et al. (2004) beträgt 50cm, diejenige von Solberg et al. (2006) 25cm. Die beiden letztgenannten beziehen sich auf Nadelwaldgebiete, in welchen die einzelnen Bäume über geringere Ausdehnungen verfügen, was den mittleren Kronendurchmesser betrifft. So beträgt der Kronendurchmesser in Morsdorf et al. (2004) zwischen 1.5m und 3m und rechtfertigt somit die höhere Auflösung in Bezug zum im Fokus stehenden Objekt eines Nadelbaumes.

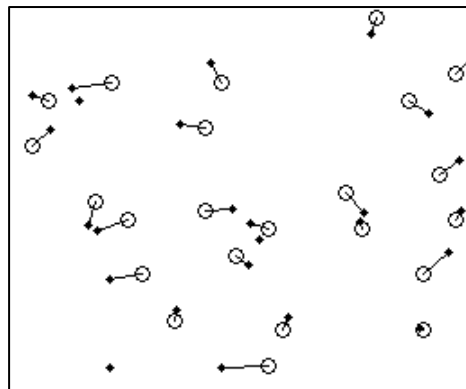
Die Genauigkeit bei der Ermittlung der lokalen Maxima als Baumspitzen aus den CHM, hängt stark von den verwendeten Methoden ab. Monnet et al. (2010) kommen in ihrer Arbeit zum Schluss, dass die Wahl einer geeigneten Parametrisierung für die Extraktion von Einzelbäumen mit Bedacht festgelegt werden muss. Eine eigentliche beste Lösung in Bezug zur Wahl der geeigneten Parameter gibt es (noch) nicht. Mit ihrer Parametersensitivitätsanalyse konnten sie jedoch zeigen, dass die Wahl von unterschiedlichen Rasterweiten auf ihren beiden unterschiedlichen Untersuchungsgebieten zu unterschiedlich guten Ergebnissen führt. Somit kann gesagt werden, dass die Wahl der geeigneten Parameter stark von der Struktur und Charakteristik des Untersuchungsobjektes abhängt.

Die Zuweisung von lokaler Maxima als Baumspitzen, zu den entsprechenden Referenzbäumen wurde auch in der Arbeit von Vauhkonen et al. (2010) untersucht. Dabei wurden verschiedene Algorithmen auf unterschiedliche Untersuchungsgebiete angewendet. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über den durchschnittlichen Anteil der Baumspitzenkandidaten, welche den Referenzdaten zugewiesen werden konnten. Für die Daten vom Birriboden werden jeweils die durchschnittlichen Werte, der jeweils 4 besten Zuweisungsanteile, welche in Kapitel 7.1 ermittelt wurden, genommen (Vgl. hierzu Tabelle 5 & 6).

**Tabelle 12** Mittlere Zuweisungsquote zwischen Baumspitzenkandidaten aus lokalen Maxima und Referenzbäumen auf entsprechenden Testflächen. Quelle Vauhkonen et al., 2010, ergänzt durch eigene Angaben.

Deutschland	Norwegen	Schweden	Birriboden 2004	Birriboden 2006
48.00%	42.00%	60.00%	48.30%	43.69%

Die Zusammensetzung des Untersuchungsgebietes Deutschland besteht aus 11 in Laub- und Nadelwald aufgeteilte Flächen. Die Nadelwaldflächen bestehen hauptsächlich aus Tannen, diejenigen der Laubwaldflächen hauptsächlich aus Eiche, Buche und Birke. Die Zusammensetzung der skandinavischen Testflächen besteht mehrheitlich aus Kiefern und Fichten, so wie einem geringeren Anteil an Laubbäumen, hier hauptsächlich Birke. Die schwedische Testfläche besitzt im Vergleich mit der Norwegischen die höheren Bäume, was die höhere Zuweisungsquote ergibt. Die Daten des Birribodens sind am ehesten mit den Daten von Deutschland zu vergleichen, da sie sich am ähnlichsten sind, was die Baumartenzusammensetzung anbelangt. Es werden, was die Zuweisungsquote betrifft, ähnliche Werte erzielt, was für den verwendeten Ansatz spricht. Die Methode der lokalen Maxima Bestimmung auf den geglätteten CHM's liefert in der Studie von Vauhkonen et al. (2010) ebenfalls eines der besten Resultate, was die Zuweisungsquote betrifft. Die Zuweisung erfolgt innerhalb der Testfläche des Birribodens bei grossen freistehenden Bäumen besser als bei dichtstehenden kleineren Bäumen, was die nachfolgende Abbildung zeigt. Schwarze Punkte stellen dabei die Referenzpunkte dar, welche mit Verbindungslinien den entsprechenden lokalen Maxima als Baumspitzenkandidaten verbunden sind. Freistehende Punkte sind Referenzpunkte, denen keine geeigneten Baumspitzenkandidaten zugewiesen werden konnten. Auch Gebiete, welche über dichten Jungwuchs (Aufforstungsgebiete) verfügen, stellen ein Problem bei der Zuweisung dar.



**Abbildung 31** Ausschnitt eines Zuweisungsresultats in einem Gebiet, welches durch grosse, und freistehende Bäume geprägt ist



Die Glättung des CHM ist unabdingbar um ein möglichst optimales Verhältnis zwischen lokalen Maxima und den Fehlern 1. und 2. Art zu erzielen. Um auch hier einen Vergleich machen zu können, wurde wieder die Studie von Vauhkonen et al. (2010) herangezogen, welche für die jeweiligen Untersuchungsgebiete neben der Zuweisungsquote auch die Fehler 1. und 2. Art ermittelten. Der Fehler 1. und 2. Art variieren, je nach angewandter Methode, für den Fehler 1. Art von 19.6 bis 46.1% und derjenige vom Fehler 2. Art zwischen 39 und 60.6%.

Die Werte, die in dieser Arbeit ermittelt wurden, sind in den nächsten zwei Tabellen ersichtlich und basieren auf den über das Erfolgskriterium ermittelten Rasterweiten und Anzahl Glättungsdurchläufen, der 4 besten Resultate.

**Tabelle 13** Fehler 1. und 2. Art für unterschiedliche Rasterweiten und Glättungsdurchläufe für den Datensatz 2004

<b>Rasterweite_Glättungsdurchläufe 2004</b>	<b>100_1</b>	<b>80_2</b>	<b>80_3</b>	<b>60_4</b>
Fehler 1.Art (Comission Error)	69.80%	62.45%	35.39%	56.41%
Fehler 2.Art (Omission Error)	48.18%	50.31%	57.89%	50.41%

**Tabelle 14** Fehler 1. und 2. Art für unterschiedliche Rasterweiten und Glättungsdurchläufe für den Datensatz 2006

<b>Rasterweite_Glättungsdurchläufe 2006</b>	<b>100_1</b>	<b>70_2</b>	<b>60_3</b>	<b>60_4</b>
Fehler 1.Art (Comission Error)	17.60%	22.34%	20.33%	12.98%
Fehler 2.Art (Omission Error)	56.91%	54.46%	55.22%	59.46%

Vergleicht man die Werte der Fehler 1. und 2. Art der beiden Tabellen mit denjenigen von Vauhkonen et al. (2010) so weisen sie eine ähnliche Spannweite auf. Die Werte des Fehlers 1. Art beim Datensatz 2004 sind höher als im Datensatz 2006, was sich mit der unruhigeren Oberfläche und der daraus resultierenden höheren Anzahl lokaler Maxima, welche aus der Befliegung im unbelaubten Zustand erfolgte, erklären lässt.

Im Datensatz 2006 ist somit die Anzahl der nicht den Referenzbäumen zugewiesenen lokalen Maxima geringer als im Datensatz 2004, was sich im kleineren Fehler 1. Art niederschlägt. Die Genauigkeit der Zuweisung der lokalen Maxima als Baumspitzenkandidaten, ist im Datensatz 2006 besser als im Datensatz 2004.

### 5.1.2 Schwierigkeiten

Ein eigentliches Problem stellt die Zuweisung der Referenzbäume zu den aus den Laser-Daten ermittelten lokalen Maxima dar. Diese ist mit Fehlern behaftet, aber zwingend nötig um überhaupt eine Aussage über die Qualität der Resultate zu machen. Es kommt zu Falschzuweisungen, welche die Resultate negativ beeinflussen. So kann einem Referenzbaum aufgrund der räumlichen Nähe ein falsches lokales Maximum zugeordnet werden, dies ist beispielsweise der Fall, wenn sich neben einem kleinen Referenzbaum ein lokales Maxima mit einer grösseren Höhe befindet. Dieses Problem kann auch nicht mit der angepassten Zuweisungsmethode, bei der jedem Referenzbaum das, in Bezug auf die Baumhöhe nächstähnliche lokale Maxima, zugewiesen wird, behoben werden. Das Resultat wird zwar besser als mit der Zuweisung des nächstgelegenen Echos, weist aber immer noch Falschzuweisungen auf. Ebenfalls funktioniert die Zuweisung bei grossen freistehenden besser als bei dichtstehenden niedrigen Bäumen.

Ein weiteres Problem, vorallem in einem Mischwaldgebiet mit grossen Laubbäumen, welche über grosse Kronendurchmesser verfügen, ist, dass kleinere Bäume und der gesamte Unterwuchs aufgrund der Verdeckung nur bedingt oder gar nicht vom Laserstrahl erfasst werden. Dies ist besonders dann der Fall wenn die Bäume belaubt sind. Da mit den Daten während des belaubten Stadiums die genaueren Positionen ermittelt werden können, muss auch hier ein Kompromiss eingegangen werden. Ebenfalls schwierig auseinanderzuhalten sind eng beieinanderstehende Bäume, welche zusammen ein lokales Maximum bilden. Wird das CHM zu stark geglättet, können benachbarte Bäume nicht mehr auseinandergehalten werden. In beiden Fällen können die einzelnen Bäume nicht extrahiert werden (Reitberger et al., 2009).

## 5.2 Segmentierung

Um möglichst genaue Angaben von Baumparametern zu erhalten, muss eine möglichst korrekte Segmentierung der einzelnen Baumkronen erfolgen. Die Einzelbaumextraktion ist somit direkt abhängig vom Ergebnis der Segmentierung, was die Ausdehnung und Lokalisierung der einzelnen Bäume betrifft und stellt somit keine einfache Aufgabe dar (Pyysalo & Hyypä, 2002 und Wack et al., 2003).

Die meisten in der Forschung verwendeten Algorithmen für die Extraktion von Einzelbäumen basieren auf Oberflächenmodellen (Vgl. Kapitel 3.2). Nur ein kleiner Teil der Forschungsarbeit auf diesem Gebiet verwendet Clusteranalyse basierte Methoden um aus LiDAR-Daten Einzelbäume zu extrahieren, unter anderem Morsdorf et al. (2003), Morsdorf et al. (2004), Cici et al. (2008), Kwak et al. (2008) und Ko et al. (2009). Clusteranalyse basierte

Algorithmen werden in anderen Forschungsgebieten für verschiedenste Anwendungen verwendet. Ihre Anwendung auf dem Gebiet der Forstwissenschaften im Zusammenhang mit LiDAR-Daten ist eher rar (Gupta et al., 2010).

Der Anteil der den Referenzbäumen zugewiesenen Clusterdaten beträgt 42.43% für den Datensatz 2004, 47.17% für den Datensatz 2006 und 49.12% für den kombinierten Datensatz 2004 & 2006. Die Clusterbildung führt somit bei höheren Punktdichten zu besseren Ergebnissen.

### **5.2.1 Vergleich mit anderen Arbeiten**

Ein direkter Vergleich mit anderen Arbeiten ist schwierig, da das SSegmentierungsergebnis stark von der Waldstruktur und dessen Charakteristik abhängig ist, wie Heurich (2006) mit einem Beispiel zeigte. Dabei verwendete Heurich (2006) den gleichen Algorithmus, welcher von Persson et al. (2002) entwickelt wurde, auf einem anderen Testgebiet an und kommt zu ganz anderen Ergebnissen. Diese Vergleichstudie bezieht sich auf eine Anwendung einer bildbasierten Segmentierungsmethode. Sie hat ihre Gültigkeit aber auch bei der Anwendung der K-Means Clusteranalyse, aufgrund der strukturabbildenden Eigenschaften des Laserscannings. Ein Problem der bildbasierten Segmentierungstechniken ist, dass keine sich überlappenden Segmente gebildet werden. Dies führt in einem Wald mit unterschiedlich hohen Baumschichten, Einzelbäumen und dem gesamten Unterwuchs zu einem nicht der Realität entsprechendem Ergebnis (Persson et al., 2002). Der Vorteil der K-Means Clusteranalyse ist, dass sie genau dies zulässt. Die K-Means Clusteranalyse liefert bei hohen Punktdichten die besseren Resultate, der Unterschied ist jedoch nicht so stark ausgeprägt obwohl die Punktdichte im kombinierten Datensatz 2004 & 2006 annähernd doppelt so gross ist wie in den Datensätzen der Jahre 2004 und 2006.

### **5.2.2 Schwierigkeiten**

Die Hauptschwierigkeit liegt auch hier in der Zuweisung der Referenzbäume zu den entsprechenden Clusterdaten. Die Zuweisung ist noch mit erheblichen Fehlern belastet. Auch in der Arbeit von Morsdorf (2004), welche über eine Punktdichte von 30 Laserechos pro m<sup>2</sup> und somit in etwa gleich hoch, wie der hier verwendete kombinierte Datensatz ist, zeigt das gleiche Problem. Die Anzahl der Fehlzusweisungen ist im untersuchten Testgebiet um einiges grösser, was auch hier mit der unterschiedlichen Struktur und Charakteristik des Untersuchungsgebietes erklärt werden kann. Ebenso zeigt sich wieder, dass die gleiche Methodik auf ein unterschiedliches Untersuchungsgebiet angewendet, zu einem anderen

Ergebnis führt. Die erzielten Zuweisungsquoten liegen im Bereich der in der Literatur in Laubwäldern erzielten Ergebnisse. So rapportieren Koch et al. (2006) für Laubwald Erfolgsquoten von 50 – 60%, Chen et al. (2006) erzielen eine Erfolgsquote von 64.1% und Heurich (2006) eine solche von 40.3%. Heurich (2006) macht zudem in seiner Arbeit auf die falsch zugewiesenen Bäume aufmerksam. Auch die Vergleichstudie von Vauhkonen et al. (2010) kommen zu ähnlichen Ergebnissen, wie bereits in Tabelle 12 des Kapitels 8.1.1 gezeigt wurde.

### **5.3 Ableitung des Baumparameters Baumhöhe**

Hierfür wurde die Baumhöhe der Referenzdaten derjenigen aus den Clusterdaten gewonnenen Baumhöhen gegenübergestellt. Die mittlere Positionsabweichung liegt in einem ähnlichen Bereich wie diejenige bei der Zuweisung der lokalen Maxima. Die Unterschiede bei der Clusteranalyse sind weniger stark ausgeprägt. Auch liefern alle 3 Datensätze ähnliche Abweichungen und liegen maximal 3cm auseinander. Das beste Ergebnis diesbezüglich liefert der Datensatz 2004 gefolgt vom kombinierten Datensatz 2004 & 2006 und Datensatz 2006.

#### **5.3.1 Vergleich mit anderen Arbeiten**

Eine systematische Unterschätzung der Baumhöhe, welche aus den Laserdaten abgeleitet wurde, wie sie in vielen anderen Arbeiten, unter anderem Heurich (2006), Solberg (2006), Brandtberg (2006) und Nilson (1996), rapportiert werden, kann in dieser Arbeit nur zum Teil bestätigt werden.

Für das Untersuchungsgebiet standen neben den Baumhöhenwerten, welche aus einem Regressionsmodell hergeleitet wurden, auch 307 Werte zur Verfügung, bei welchem die Baumhöhe gemessen wurde. Für die berechneten Werte findet sich die kleinste Abweichung für den Datensatz 2004 mit 1.01m und den kombinierten Datensatz 2004 & 2006 mit 1.81m. In beiden Fällen werden die Baumhöhen leicht überschätzt. Beim Datensatz 2006 beträgt die Überschätzung 6.12m. Betrachtet man nun die gemessenen Werte so präsentiert sich ein anderes Bild. Die Baumhöhe des Datensatzes 2004 wird nun mit 1.53m und diejenige des kombinierten Datensatzes noch leicht mit 0.11m unterschätzt. Die Baumhöhe des Datensatzes 2006 wird nur noch mit 2.5m überschätzt. Die Ergebnisse für den Datensatz 2004 und den kombinierten Datensatz passen unter diesem Gesichtspunkt in den Forschungskontext. Es zeigt sich, dass das Resultat der Baumhöhen, welche aus einem Regressionsmodell abgeleitet wird, mit Vorsicht zu betrachten ist. Die Baumhöhendifferenz aller Datensätze, die aus dem Regressionsmodell berechnet wurden, sind allesamt höher als diejenigen, welche gemessen

wurden. Die Überschätzung der Baumhöhe des Datensatzes 2006 kann auf den Aufnahmezeitpunkt und der daraus resultierenden Falschzuweisung zurückgeführt werden. Hierbei werden Laserechos, welche vom beinahe geschlossenen Kronendach stammen, kleineren Bäumen, welche sich darunter befinden, zugewiesen. Die stärkste Korrelation ergibt sich beim kombinierten Datensatz 2004 & 2006, gefolgt vom Datensatz 2004 und Datensatz 2006.

### **5.3.2 Schwierigkeiten**

An dieser Stelle sei auf das Problem der Falschzuweisungen hingewiesen, welche bereits bei den Resultaten in Kapitel 7.4 aufgeführt wurden.

## 6 Fazit

Die Extrahierung der 3D-Struktur von Einzelbäumen aus LiDAR Daten ist keine einfache Aufgabe. Vielmehr stellt sie aufgrund der Struktur und der Charakteristik des Untersuchungsobjektes Wald eine grosse Herausforderung dar. Bei der Wahl der Methode muss sowohl auf eine geeignete Parametrisierung als auch auf eine gute Wahl des Algorithmus geachtet werden um ein möglichst gutes Resultat zu erzielen. So muss beispielsweise bei der Ermittlung der lokalen Maxima aus den CHM darauf geachtet werden, den Fehler 1.Art zu minimieren und gleichzeitig den Fehler 2.Art so klein als möglich zu halten, um ein optimales Ergebnis zu erhalten. Dasselbe gilt bei der Wahl einer geeigneten Rasterweite und auch bei der Anzahl der Glättungsdurchläufe.

Bei den hier vorliegenden Daten führte die Wasserscheidentransformation zu keinem brauchbaren Resultat. Mit der Anwendung der K-Means Clusteranalyse konnten, je nach Datensatz, zwischen 42.43% und 49.12% der Bäume des Untersuchungsgebietes, welches in einem Mischwaldgebiet liegt, extrahiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass die K-Means Clusteranalyse, mit denen aus den CHM berechneten lokalen Maxima als Startpunkten, für die Extraktion der 3D-Struktur von Einzelbäumen in einem durch Laubwald dominierten Mischwald, geeignet ist.

Die erzielten Resultate decken sich mit den aktuellen Forschungsergebnissen auf diesem Gebiet. Allerdings kommt es noch zu Falschzuweisungen zwischen den Referenzbäumen und den Clusterdaten, so dass die Güte des Resultates noch nach unten korrigiert werden muss. Die Problembereiche, welche speziell in einem Laubmischwald auftreten, sind in der Literatur bekannt und konnten auch in dieser Arbeit bestätigt werden. So kommt es beispielsweise dazu, dass Bäume, welche sich in den unteren Schichten eines Waldes befinden, nur schlecht oder gar nicht erkannt werden, dies ist vor allem ein Problem bei der Befliegung im belaubten Zustand. Ein weiteres Problem sind eng zusammenstehende Bäume. Die Methodik funktioniert am besten bei grossen freistehenden Bäumen.

Die hier angewendete Methodik basiert auf der Vorlage von Morsdorf et al. (2004), welche die Methodik in einem Nadelwaldgebiet in der Nähe des Ofenpasses (Schweiz) durchgeführt haben. Die Anwendung der gleichen Methodik auf zwei unterschiedlichen Testflächen und die daraus resultierenden unterschiedlichen Ergebnisse bestätigen nochmals, dass die Struktur und Charakteristik des Untersuchungsgebietes entscheidenden Einfluss auf das Resultat hat. Es zeigt sich, dass es keine eigentlich beste Lösung gibt. Somit gibt es auf dem Gebiet der Extrahierung der 3D-Struktur bei Einzelbäumen in Laubmischwäldern noch erheblichen Forschungsbedarf, da es auf diesem Gebiet noch nicht so viele Vergleichsstudien gibt. Ebenso müssten die Studien, welche bisher allesamt auf relativ kleinen Testflächen

durchgeführt wurden, auf grösseren Testflächen überprüft werden, um eine möglichst grossflächige Anwendung mit entsprechenden Resultaten zu erzielen.

## 6.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Aus den erzielten Untersuchungsergebnissen und der Diskussion, lassen sich für die im Kapitel 1.1 gestellten Forschungsfragen folgende Schlüsse ziehen:

### **Kann die 3D-Struktur von Einzelbäumen eines Laubmischwaldgebietes aus Daten, welche mit flugzeuggestütztem Laserscanning mit diskreter Echoaufzeichnung aufgenommen wurden, automatisch extrahiert werden?**

Einzelbäume können bei geeigneter Wahl der Parameter und der Wahl des richtigen Algorithmus aus diskret aufgezeichneten Laserscanningdaten extrahiert werden. Das Resultat ist dabei sehr stark von der Struktur und den typischen Charaktereigenschaften des zu untersuchenden Testgebietes abhängig. In dieser Arbeit führte nur die K-Means Clusteranalyse zu einem brauchbaren Resultat, was für diese Methode spricht. Die verwendeten lokalen Maxima, welche aus den CHM für die Startpunkte der Clusteranalyse ausgewählt wurden, können als geeignet betrachtet werden um ein brauchbares Ergebnis zu erzielen. Diese wurden aus den verschiedenen Kombinationen von Rasterweiten und Glättungsdurchläufen ermittelt. Die Glättung des CHM ist unabdingbar, um ein möglichst optimales Verhältnis zwischen lokalen Maxima und den Fehlern 1. und 2. Art zu erzielen. Insgesamt konnten von den 3182 Referenzbäumen im Testgebiet, je nach Datensatz, zwischen 42.43% und 49.12% detektiert werden. Es kommt aber in diesem Fall noch zu Falschzuweisungen zwischen den Referenzbäumen und den Clusterdaten, was zusätzlich noch berücksichtigt werden muss. Es wurden nur Bäume berücksichtigt, welche grösser als 3m sind.

### **Stimmen die erzielten Ergebnisse mit denjenigen der aktuellen Forschung auf dem Gebiet der Einzelbaumextraktion in Mischwaldgebieten überein? Wo liegen die Grenzen? Wo gibt es Verbesserungspotential?**

Die hier angewendete Methodik führt zu Ergebnissen, welche mit der aktuellen Forschung übereinstimmen, was die Erfolgsquote betrifft. Ein direkter Vergleich zwischen den verschiedenen Arbeiten ist jedoch schwierig, da sich die Untersuchungsgebiete stark voneinander unterscheiden. Im Vergleich zu Studien, welche sich mit der Einzelbaumextraktion in Nadelwaldgebieten befassen, gibt es für Mischwaldgebiete noch erhebliches Forschungspotential, was die Erfolgsquote betrifft. Diese liegt in

Nadelwaldgebieten um einiges höher. Es gibt keine eigentlich beste Lösung. Entscheidend ist eine vorsichtige Wahl der Parameter. In Bezug auf den abgeleiteten Baumparameter Baumhöhe kann eine systematische Unterschätzung der Baumhöhe, wie sie in der Literatur anzutreffen ist, nur zum Teil bestätigt werden. Die besten Ergebnisse wurden hierbei beim Datensatz 2004 erzielt, welcher bei Leaf-Off Bedingung aufgenommen wurde. Werden, statt der aus den Regressionsmodellen verwendeten berechneten Höhe, die im Feld gemessenen Baumhöhen genommen, kommt es bei den Datensätzen von 2004 und dem kombinierten Datensatz 2004 & 2006 zu einer Unterschätzung, wie sie in der Literatur vorzufinden ist. Die gemessenen Daten sind aber nur von 307 Referenzbäumen bekannt. Es stellt sich somit unweigerlich die Frage nach der Korrektheit, der aus den Regressionsmodellen abgeleiteten Baumhöhen. Diese wurde aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Verbesserungspotential gibt es vor allem bei der Detektion der Bäume, welche sich nicht in der obersten Baumschicht befinden.

#### **Welche Vorteile ergeben sich durch die Kombination der Datensätze im belaubten und unbelaubten Vegetationszustand im Vergleich zu den solitären Datensätzen?**

Durch die Kombination der beiden Datensätze wird ein besseres Ergebnis bei der Zuweisung der Referenzdaten zu den Clusterdaten und der ermittelten Baumhöhe erzielt. Es können insgesamt 49.12% der Cluster zugewiesen werden. Allerdings müssen hier wiederum die Falschzuweisungen berücksichtigt werden. Was die Baumhöhe betrifft, so ergeben sich beim kombinierten Datensatz die genaueren Werte. Im kombinierten Datensatz wird die gemessene Baumhöhe um 0.11m unterschätzt. Im Vergleich zu einer Unterschätzung von 1.53m im Datensatz von 2004 und einer Überschätzung von 2.5m im Datensatz 2006. Durch die Kombination der beiden Datensätze können die Ergebnisse substantiell verbessert werden.

#### **Welche Probleme ergeben sich speziell bei Mischwaldgebieten?**

Aufgrund des fast geschlossenen Kronendaches dringt der Laserstrahl beim Datensatz 2006 nicht, oder nur teilweise, durch die Vegetation. Dabei können Bäume, welche sich nicht in der obersten Baumschicht befinden nur unzureichend detektiert werden. Die Schwierigkeit der Detektion des Unterwuchses ist in der Literatur bekannt. Aufgrund der Charakteristik des Untersuchungsgebietes, welches durch sehr hohe Buchen geprägt ist, die ein beinahe geschlossenes Kronendach bilden, ist dieses Phänomen extrem ausgeprägt. Bei geschlossenem Kronendach kommt es zu Falschzuweisungen zwischen den Referenz- und Clusterdaten. Auch Gebiete, welche über dichten Jungwuchs (Aufforstungsgebiete) verfügen, stellen ein Problem



bei der Zuweisung dar. Die Zuweisung funktioniert am besten bei hohen freistehenden Bäumen.

## 6.2 Ausblick

Aus den Erkenntnissen, welche im Zuge dieser Arbeit gewonnen wurden, lassen sich folgende Potentiale für Erweiterungen und Verbesserungen der hier vorgestellten Methodik ableiten.

Da es bei der hier angewendeten Methodik viele Einzelschritte gibt, ergeben sich dementsprechend Verbesserungsmöglichkeiten. So könnten zum Beispiel die Daten mit anderen Filtern und mit unterschiedlichen Fenstergrößen auf unterschiedlichen Ebenen der Daten ausprobiert werden. In Bezug auf die Positionsgenauigkeit könnte die Anwendung der aktuellsten Forschungsergebnisse, wie beispielsweise in Reitberger (2010) vorgestellt, zu besseren Ergebnissen führen. Auch das Problem der Falschzuweisungen der Referenzdaten zu den erhobenen Laserdaten müsste nochmals vertieft und verbessert werden, da dieses direkt die Qualität der Validierung der Daten beeinflusst. Neben des ermittelten Baumparameters Baumhöhe könnten weitere Baumparameter, wie beispielsweise der Kronendurchmesser, untersucht und analysiert werden. Weiter von Interesse wäre eine mögliche Klassifikation der Bäume, aufgrund der First- und Lastechoverteilung zu den beiden Befliegungszeitpunkten, in Laub- und Nadelbäume. Eine allfällige Ableitung der Baumart und Baumspezies wäre ebenfalls eine potentielle Erweiterungsmöglichkeit. Diese könnte man zum Beispiel mit der Waldklassifikation von Füllemann (2006) vergleichen.

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die hier angewendete Methode funktioniert und Ergebnisse produziert, welche sich mit der aktuellen Forschung decken. Von Interesse wären die Ergebnisse einer erneuten Befliegung mit einem „Continuous Wave“ Scanner System und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten. Zentral wäre die Überprüfung der Möglichkeit der Detektion des Unterwuchses und der Trennung eng beieinanderstehender Bäume, welches die eigentlichen zwei Hauptproblembereiche in den hier zur Verfügung stehenden Daten sind. Auch würde der direkte Vergleich zweier unterschiedlicher Aufnahmesysteme weitere interessante Erkenntnisse zu Tage bringen.

Da die Ergebnisse der Einzelbaumextraktion direkt von der Struktur und der Charakteristik des Untersuchungsobjektes Wald, von einer geeigneten Parametrisierung und der Wahl des verwendeten Algorithmus abhängig sind, ist es schwierig von einer kleinen Testfläche, welche relativ gute Ergebnisse liefert, auf ein grösseres Gebiet zu schliessen. Speziell zu beachten ist, dass die Struktur und Charakteristik in einem Wald zum Teil sehr kleinräumig variieren kann. Grossflächige Anwendungen wären aber das Ziel Kosten-Nutzen effizienter Anwendungen, insbesondere für die Holzwirtschaft.

## 7 Literatur

- Ackermann, F. (1999). Airborne laser scanning – present status and future expectations. *ISPRS, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 64-67.
- Albertz, J. (2001). Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 2. Überarbeitete und ergänzte Auflage. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, Deutschland.
- Andersen, H-E., Reutebuch, S. & Schreuder, G. (2003). Bayesian Object Recognition for the Analysis of Complex Forest Scenes in Airborne Laser Scanner Data. *International Archives of the photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol 34, part 3A, 35-41.
- Axelsson, P. (1998). Processing of laser scanner data – algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 138-147.
- Baltsavias, E.P. (1999). Airborne Laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 164-198.
- Barilotti, A., Sepic, F., Abramo, E. & Crosilla, F. (2007). Improving the morphological analysis for tree extraction: a dynamic approach to LiDAR data. *ISPRS Workshop on Laser Scanning, Silvilaser 2007, Espoo, Finland*.
- Blackburn, G.A. (2006). Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of experimental botany*, September 2006, 1-13.
- Blaschke, T., Tiede, D. & Heurich, M. (2004). 3D landscape metrics to modelling forest structure and diversity based on laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI-8W2, Freiburg, 129-132.
- Bradley, P.S. & Fayyad U.M. (1998). Refining initial points for k-means clustering. Microsoft Research, Technical Report; MSR-TR-98-36, Appears in Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Machine Learning (ICML98).
- Brändli U-B. (2010). Schweizerisches Landesforstinventar, Ergebnisse der dritten Erhebung 2004 – 2006. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, CH-8903 Birmensdorf, Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bern.
- Brandtberg, T., Warner, T., Landenberger, R., & MacGraw, G. (2003). 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. *Remote Sensing of Environment*, 85, 290-303.
- Brandtberg, T. (2006). Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne lidar. *ISPRS Journal of Remote Sensing*, 61, 325-340.
- Breidenbach, J., Naesset, E., Lien, V., Gobakken, T. & Solberg, S. (2010). Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 911-924.

- Broggi, M.F. (1986). Konzept Naturlandschaft Sihlwald. Im Auftrag des Stadtforstamtes Zürich. Büro für Siedlungs- und Umweltplanung (BSU).
- Buddenbaum, J., & Hill, J. (2010). Fusion of full waveform Lidar and hyperspectral remote sensing data for the characterization of forest stands. Silvilaser 2010, Freiburg, Germany.
- Charta Wildnispark (2010).  
[http://www.wildnispark.ch/files/pdf/downloads/WPZ/wildnispark\\_zuerich\\_charta\\_2010\\_2018\\_mit\\_anhang.pdf](http://www.wildnispark.ch/files/pdf/downloads/WPZ/wildnispark_zuerich_charta_2010_2018_mit_anhang.pdf) Zugriff: 18.10.2010.
- Chen, Q., Baldocchi, D., Gong, P. & Kelly, M. (2006). Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 72, No. 8, 923-932.
- Cici, A., Tansey, K., Tate, N.J., Smith-Voysey, S. & Kaduk, J. (2008). Extraction of vegetation for topographic mapping from full-waveform airborne laser scanning data. Silvilaser 2008, Edinburgh, UK.
- Clark, M.L., Roberts, D.A. & Clark, D.B. (2005). Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scale. Remote Sensing of Environment, 96, 375-398.
- Desclée, B., Gingras, A., Bemelmans, V. & Patigny, E. (2008). Forest mesuration parameters derived from individual tree crown forest inventory method using airborne imagery and LiDAR. In: Hill, R., Suárez, J., Rosette, J., (eds) Silvilaser 2008, 8<sup>th</sup> international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. 335-341.
- Diedershagen, O., Koch, B. & Weinacker, H. (2003). Automatic estimation of forest inventory Parameters based on LiDAR, Multi-Spectral and FOGIS data. Proceedings Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. II, Zürich, 259-269.
- Dubayah, R.O. & Drake, J.B. (2000). Lidar Remote Sensing for Forestry Applications. Journal of Forestry, 98, 44-46.
- Egger, S. (2008). Waldbestandeskartierung und Baumtyperkennung im Sihlwald. Masterarbeit, RSL Remote Sensing Laboratories, Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Falkowski, M.J., Smith, A.M.S., Hudak, A.T., Gessler, G.E., Vierling, L.A., & Crookston, N.L. (2006). Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. Canadian Journal of Remote Sensing, 32(2), 153-161.
- Flood, M. (1999). Commercial Development of airborne Laser Altimetry. A review of the commercial instrument market and its projected growth. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 3, W 14.
- Füllemann, C., (2007). Multisensorale Waldklassifikation im Sihlwald. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Goodwin, N. R., Coops, N. C. & Culvenor, D.S. (2006). Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude, Remote Sensing of Environment, 103, 140-152.

- Gupta, S., Weinacker, H. & Koch, B. (2010). Single tree detection using full waveform laser scanner data, Silvilaser 2010, Freiburg, Germany.
- Haara, A. & Haarala, M. (2002). Tree species classification using semi-automatic delineation of trees on aerial images. *Scandinavian Journal of Forest Resources*, 17, 556–565.
- Heurich, M. (2006). Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren. *Forstliche Forschungsberichte München*, Nr. 2002.
- Heurich, M. (2008). Automatic recognition and measurements of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park. *Forest Ecology and Management*, 265, 2416-2433.
- Hill, R. A., Boyd, D. S. & Hoptkinson, C. (2010). Integrating Airborne LiDAR and Landsat ETM+ data for large area assessment of forest canopy height in Amazonia. *Silvilaser 2010*, Freiburg, Germany.
- Hopkinson, C. (2006). The influence of lidar acquisition settings on canopy penetration and laser pulse return characteristics. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2006*.
- Hoss, H. (1997). Einsatz des Laserscanner-Verfahrens beim Aufbau des Digitalen Geländehöhenmodells (DGM) in Baden-Württemberg. *Mitteilung des Deutschen Vereins für Vermessungskunde, Landesverein Baden-Württemberg*, 44. Jg, Heft 1, 1997, 5-26.
- Hyde, P., Dubayah, R., Peterson, B., Blair, J.B., Hofton, M., Hunsaker, C., Knox, R. & Walker, W. (2005). Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using waveform lidar: Validation of montane ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 96, 427-437.
- Hyde, P., Nelson, R., Kimes, D. & Levine, E. (2006). Exploring LiDAR – RADAR synergy – predicting aboveground biomass in a southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR and InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 106, 28-38.
- Hyypä, J., Hyypää, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S. & Zhu, Y-I. (2000). Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*, 128, 109-120.
- Hyypä, J., Hyypää, H., Litkey, P., Yu, X. & Haggrén, H. (2004). Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI – 8/W2.
- Hyypä, J. & Inkinen, M. (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 16, 27-42.
- Hyypä, J., Kelle, O., Lhikoinen, M. & Inkinen, 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. 38, No. 5.

- Hyypä, J., Schardt, M., Haggrén, H., Koch, B., Lohr, U., Scherrer, H.U., Paananen, R., Luukkonen, H., Ziegler, M., Hyypä, H., Pyysalo, U., Friedländer, H., Uuttera, J., Wagner, S., Inkinen, M., Wimmer, A., Kukko, A., Ahokas, E. & Karjalainen, M. (2001). HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data., *The Photogrammetric Journal of Finland* 17, 58-68.
- Kaartinen, H. & Hyypä, J. (2008). EuroSDR / ISPRS Project, Commission II "Tree Extraction", Final report, Official publication Nr. 53, EuroSDR, Frankfurt am Main, Germany.
- Katzenbeisser, R. (2003). Echo Detection. <http://www.toposys.com/pdf-ext/Engl/echo-detec3.pdf>, Zugriff: 12.10.2010.
- Kim, S., McGaughey, R.J., Andersen, H. & Schreuder, G. (2009). Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sensing of environment*, 113, 1575-1586.
- Ko, C., Soh, G. & Rimmel, T.K. (2009). Classification for deciduous and coniferous trees using airborne LiDAR and internal structure reconstructions. *Silvilaser 2009*, College Station, Texas, USA.
- Koch, B., Heyder, U. & Weinacker, H. (2006). Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 72, No. 4, 357-363.
- Kraus, K. (2000). Laser-Scanning – Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, 10, 620 – 624.
- Kraus, K und Pfeifer, N. (1998) Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Remote Sensing*, 53, 193-203.
- Kraus, K., Hynst, A., Beleda, P. & Reiter, T. (1997). Topographische Daten in bewaldeten Gebieten – Ein Pilotprojekt mit Laser-Scanner-Daten. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Geoinformation*, Heft 3, 174-181.
- Kwak, D., Lee, W., Lee, J., Biging, G.S. & Gong, P. (2007). Detection of individual trees and estimation of tree height using lidar data. *The Japanese Forest Society and Springer*.
- Kwak, D-A., Lee, W-K. & Cho, K-H. (2008). Estimation of effective plant area index using LiDAR data in forest of South Korea. *Silvilaser 2008*, Edinburgh, UK.
- Law, B. (2005). Carbon dynamics in response to climate and disturbance: Recent progress from multi-scale measurements and modeling in AmeriFlux. In: *Plant Responses to Air Pollution and Global Change*. Edited by Omasa, K., Nouchi, I. & De Kok L.J. Springer-Verlag Tokyo.
- Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L. & Shreenan, R. (2003). Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, No. 5, 633–649.
- Levsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G. & Harding, D.J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies. <http://www.jstor.org/stable/1314110>, Zugriff: 05.04.2010

- Levy, P. E., Cannell, M.G.R. & Friend, A.D. (2004). Modelling the impact of future changes in climate, CO<sub>2</sub> concentration and land use on natural ecosystems and the terrestrial carbon sink. *Global Environmental Change* 14, 21-30.
- Lewis, P. & Hancock, S. (2007). LiDAR for vegetation applications. Presentation. Zugriff: <http://www2.geog.ucl.ac.uk/~plewis/lidarforvegetation/lidarRS.pdf>, 10.12.2010
- Liang, X., Hyypä, J. & Matikainen, L. (2007). Deciduous-coniferous tree classification using difference between first and last pulse laser signatures. *IAPRS, Volume XXXVI, Part 3/w52*, 253-257.
- Lindberg, E., Holmgren, H., olofsson, K. & Olosson, H. (2010). Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning. *Silvilaser 2010*, Freiburg, Germany.
- Lindenberger, J. (1993). *Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 400, München.
- Maclean, G. & Krabill, W. (1986). Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne lidar system. *Canadian Journal of Remote Sensing* 12, 7-18.
- Maltomo, M., Eerikäinen, K., Pitkänen, J., Hyypä, J. & Vehmas, M. (2004). Estimation of Timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment*, 90, 319-330.
- Magnussen, S., Eggermont, P., & LaRiccia, V.N. (1999). Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *Forest Science*, 45, 407-422.
- Monnet, J-M., Mermint, E., Chanussot, J. & Berger, F. (2010). Tree top detection using local maxima filtering: a parameter sensitivity analysis. *Silvilaser 2010*, Freiburg, Germany.
- Morsdorf, F., Meier, E., Allgöwer, B. & Nüesch, D. (2003). Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34, part 3/W13, 27-33.
- Morsdorf, F., Meier, E., Kötz, B., Itten, K.I., Dobbertin, M. & Allgöwer, B. (2004). Lidar-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sensing of Environment*, 92, 353-362.
- Naesset, E. (1997a). Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52, 49-56.
- Nelson, R., Krabill, W. & Maclean, G. (1984). Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 15, 201-212.
- Nilsson, M. (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne laser system. *Remote Sensing of Environment*, 56, 1-7.
- Omasa, K., Hosoi, F. & Konishi, A. (2007). 3D LiDAR imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 58, No. 4, 881-898.

- Patenaude, G., Hill, R.A., Milne, R., Gaveau, D.L.A., Briggs, B.B.J. & Dawson, T.P. (2004). Quantifying forest above ground carbon content using lidar remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 93, 368-380.
- Person, A., Holgrem, J. & Söderman, U. (2002). Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 68, No. 9, 925-932.
- Peterson, B., Dubayah, R., Hyde, P., Hofton, M., Blair, J.B. & Fites-Kaufman, J. (2005). Use of Lidar for Forest Inventory and Forest Management Application. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Annual Inventory and Analysis Symposium*.
- Pitkänen, J., Maltamo, M., Hyypä, J. & Yu, X. (2004). Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, part8/W2, 187-191.
- Popescu, S. & Kini, A. (2004). TREEVAW: A versatile tool for analyzing forest canopy lidar data – a preview with an eye towards future. *ASPRS Image to Decision: Remote Sensing Foundation for GIS Applications*, September 12-16, Kansas City, Missouri.
- Popescu, S.C. & Wynne, R.H. (2004). Seeing the trees in the forest: Using lidar and Multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 70, No. 5, 589-604.
- Popescu, S., Wynne, R. & Nelson, R. (2003). Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, No. 5, 564–577.
- Pyysalo, H. & Hyypä, H. (2002). Reconstructing tree crowns from laser scanner data for feature extraction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV.
- Rahman, M.Z.A. & Gorte, B. (2008a). Individual tree detection based on densities of high points of high resolution airborne lidar. In *proceedings GEOBIA, 2008, Pixels, Objects, Intelligence: GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21<sup>st</sup> Century*, University of Calgary, Alberta, Canada, 350-355.
- Renslow, M. (2000). Evaluation of multi-return LiDAR for forestry applications. Project report. Prepared for: The inventory & monitoring steering committee, San Dimas Technology & Development center, 444 East Bonita Avenue, San Dimas, CA 91773.
- Reitberger et al. (2009). 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 561-574.
- Reitberger, J. (2010). 3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- Rosette, A.J., Suarez, J.C., North, P.R.J. & Bathgate, S. (2010). Forest parameter assessment for Britain using satellite LiDAR. *Silvilaser 2010*, Freiburg, Germany.

- Rossmann, J., Schluse, M., Bücken, A. & Krahwinkler, P. (2007). Using airborne laser scanner data in forestry management: A novel approach to single tree delineation. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland, 350-354.
- Sailer, C. (2007). Algorithmen zur Filterung von LiDAR-Daten im Sihlwald. Diplomarbeit, Geografisches Institut der Universität Zürich.
- Schardt, M., Wimmer, A., Ziegler, M. & Ruppert, G. (2000). Forest inventory by means of satellite remote sensing and laser scanning. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B7, Amsterdam.
- Sexton, J.O., Bax, T., Siqueira, P., Swenson, J.J. & Hensley, S. (2009). A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America. Forest ecology and management, 237, 1136-1147.
- Solberg, S., Naesset, E. & Bollandsas, O. (2006). Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogenous spruce forest. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72/12, 1369-1378.
- Soille, P. (2003). Morphological Image Analysis, Principles and Applications. 2<sup>nd</sup> edition, Springer Verlag.
- Straub, B. (2003). A top-down operator for the automatic extraction of trees - concept and performance evaluation. Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop 3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data, Dresden, Germany, 34-39.
- Suter, S. (2008). Objektextraktion aus LiDAR-Daten, Masterarbeit, Geographisches Institut, Universität Zürich.
- Tiede, D. & Hoffmann, C. (2006). Process oriented object based algorithms for single detection using laser scanning. International Workshop 3D Remote Sensing, Forestry Proceedings, Vienna, 14-15 Februar 2006.
- Tiede, D., Hochleitner, G. & Blaschke, T. (2005). A full GIS-based workflow for tree identification and tree crown delineation using laser scanning. In: Stilla U., Rottensteiner F. Hinz, S. (Eds) CMRT05, IAPRS, Vol. XXXVI, Part3/w24, Vienna, Austria, 9-14.
- United Nations (2005) European Forest Sector Outlook Study 1960-2000-2020. Main Report. Geneva Timber and Forest Study Paper 20. Geneva, United Nations, Economic Commission for Europe.
- Vauhkonen, J., Ene, L., Gupta, S., Heinzl, J., Holmgren, J., Pitkänen, J., Solberg, S., Wang, Y., Weinacker, H., Hauglin, M.K., Lien, V., Packalén, P., Gobakken, T., Koch, B., Naesset, E., Tokala, T. & Maltamo, M. (2010). Comparative testing of single-tree detection algorithms. Silvilaser 2010, Freiburg, Germany.
- Vincent, L. & Soille, P. (1991). Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13, 583-598.



- Wack, R., Schardt, M., Lohr, U., Barrucho, L. & Oliveira, T. (2003). Forest inventory for Eucalyptus plantations based on airborne laser scanner data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34, part 3/W13, 40-46.
- Wagner, W., Ullrich, A. & Briese, C. (2003). *Der laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche*. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- Wagner, W., Hollaus, M., Briese, C. & Ducic, V. (2008). 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform laser scanner's. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 5, 1433-1452.
- Wang, T. & Gong, J-H. (2009). Forest reconstruction using point cloud data of airborne LiDAR. *The 2009 International Conference on Management and Service Science*, Wuhan, Beijing, China
- Wang, Y., Weinacker, H. & Koch, B. (2007). Development of a Procedure for vertical structure analysis and 3D-single tree extraction within forests based on lidar point cloud. *IAPRS Volume XXXVI, Part 3/W52*.
- Wang, Y., Weinacker, H., Koch, B. & Sterenczak, K. (2008). LiDAR Point Cloud based fully automatic 3D single tree modeling in forest and evaluations of the procedure. *IAPRS Volume XXXVII. Part B6b*.
- Wehr, A. & Lohr, U. (1999). Airborne Laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 68-82.
- Wever, C. & Lindenberger, J. (1999). Experience of 10 years laser scanning. *Photogrammetrische Woche*, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart.
- Wulder, M.A. & Seemann, D. (2003). Forest inventory height update through the integration of LiDAR data with segmented Landsat imagery. *Canadian Journal of remote Sensing*, Vol. 29, 536-543.
- WSL, (2001). *Informationsblatt Forschungsbereich Wald*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. S.5.
- Zhang, J. & Sohn, G. (2010). A comparative study of single tree detection algorithms using simulated forest plots. *Silvilaser 2010*, Freiburg, Germany.
- Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C. & Gerard, P.D. (2003). Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 87, 171-182.

## A Glossar

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
3D	Dreidimensional
AVIRIS	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
CHM	Canopy Height Model
CIR	Color Infrared (Farbinfrarot)
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
et. al.	et alii (und andere)
FE	First-Echo
GIS	Geografisches Informationssystem
GPS	Globales Positionierungssystem
HYDICE	Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment
HyMap <sup>TM</sup>	Hyperspectral Mapper <sup>Trademark</sup>
Hz	Hertz
INS	Inertiales Navigationssystem
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
kHz	Kilohertz
MATLAB	Matrix Laboratory
LE	Last-Echo
Leaf-Off	Unbelaubter Zustand der Vegetation
Leaf-On	Belaubter Zustand der Vegetation
LFI	Landesforstinventar
LiDAR	Light Detection and Ranging
LPI	Laser Penetrationsindex
m.ü.M	Meter über Meer
NASA	National Aerospace and Space Administration
NIR	Nahinfrarot
RADAR	Radio detection and ranging
RGB	Rot Grün Blau
RSL	Remote Sensing Laboratories
SAR	Synthetic Aperture Radar
UTC	Universal Time Cordinated
WGS84	World Geodetic System 1984
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

## B Technische Spezifikationen des Falcon II Sensors und Befliegungsparameter der Datenaufnahme

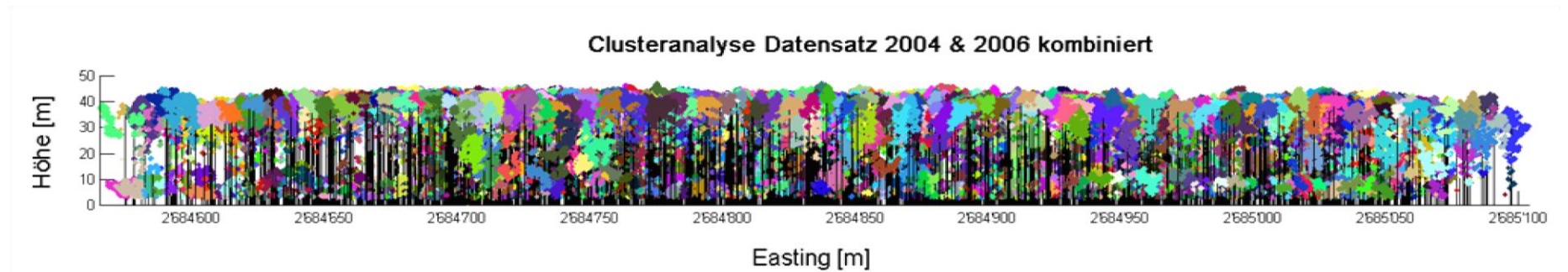
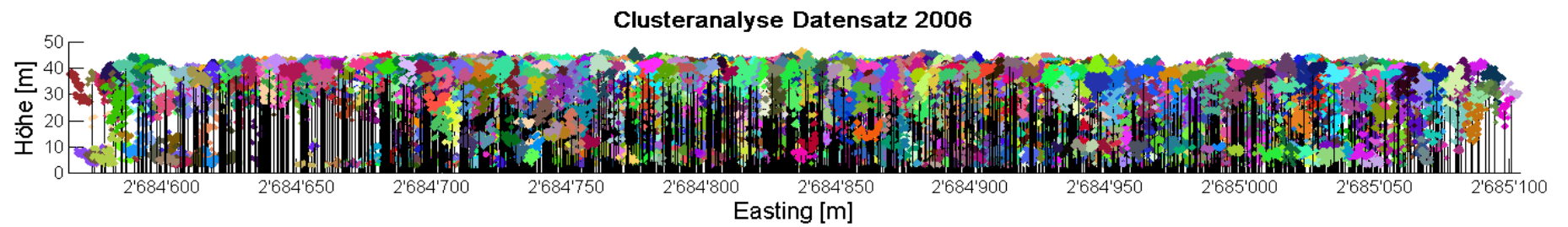
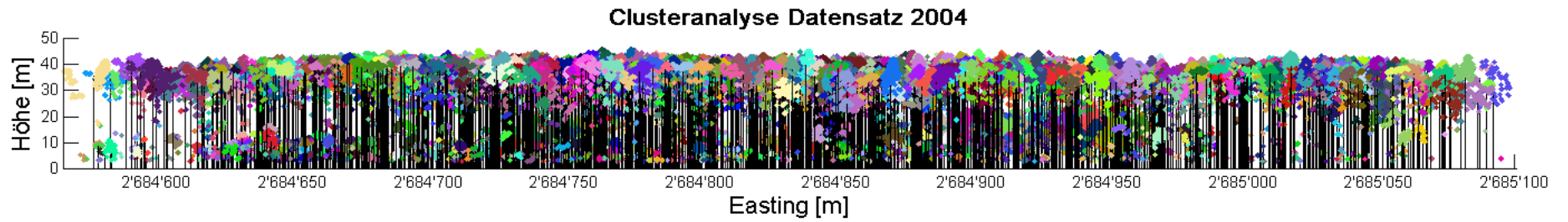
### Technische Spezifikationen Falcon II

Laserscanner Falcon II		Zeilenscanner		
Abtastrate	653 Hz	Spektralkanäle	Blau (B)	450 - 490 nm
Öffnungswinkel	14.3°		Grün (G)	500 - 580 nm
Laserimpulsfrequenz	83000 Hz		Rot (Rot)	580 - 660 nm
Reichweite	1600 m		Nahinfrarot (NIR)	770 - 890 nm
Datenaufzeichnung	First-, Last-Echo & Intensitätsdaten	Öffnungswinkel	21.6° (± 10.8°)	
Absolute Höhengenaugigkeit	< ± 0.15 m	Auflösung quer zur Flugrichtung	0.5 mrad	
Absolute Lagegenauigkeit	< ± 0.50 m	Pixel pro Kanal	682	
Rasterweite	1 m	Rasterweite	0.5 m	
Augensicherheitsabstand	0.5 m	Blende	1:1.4	

### Befliegungsparameter

Befliegungsdatum	20.04.2004	10.08.2008	17.08.2008
Befliegungsdauer	14:49 - 17:35 UTC	08:30 bis 09:50 UTC	06:25 - 09:00 UTC
mittlere Flughöhe über Grund	ca. 1250 m	ca. 1200 m	
Anzahl Flugstreifen	33	34	
Mittlere Flugstreifenbreite	295 m	295 m	
Mittlerer Abstand der Flugstreifen	150 m	148 m	
Seitliche Überlappung der Flugstreifen	49%	50%	
Basisbezugssystem	Schweizerisches Landeskoordinatensystem LV95 / CH1903+		
Referenzdaten	5 Gebäudepolygone und 53 Höhenreferenzpunkte	5 Gebäudepolygone und 144 Höhenreferenzpunkte in 5 Referenzflächen	

### C Clusteranalyse



## D Baumhöhenvergleich

	Laserdaten		Referenzdaten		Differenz Baumhöhe Laserdaten - Baumhöhe Referenzdaten (m)	Korrelationskoeffizient
	Mittlere Baumhöhe (m)	STD	Mittlere Baumhöhe (m)	STD		
Datensatz 2004 (berechnete Werte)	30.36	13.7	29.35	13.54	1.01	0.566
Datensatz 2004 (gemessene Werte)	34.63	11.6	36.16	12.01	-1.53	0.618
Datensatz 2006 (berechnete Werte)	35.72	9.591	29.6	13.53	6.12	0.526
Datensatz 2006 (gemessene Werte)	38.67	7.211	36.17	11.97	2.5	0.557
Datensatz 2004 & 2006 (berechnete Werte)	30.54	13.62	28.73	13.76	1.81	0.629
Datensatz 2004 & 2006 (gemessene Werte)	36.15	11.16	36.26	12.41	-0.11	0.609

## **Redlichkeitserklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Feuerthalen, im Januar 2011

Frank Fischer