Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

Diplomarbeit

Objektorientierte Gebäudedetektion in Laserscannerdaten und multispektralen Bildern

Zum Zwecke der Erlangung
des akademischen Grades eines Diplomingenieurs (Dipl.- Ing.)

ausgeführt am
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von
Univ. Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Wolfgang Wagner
und
Univ. Ass. Dipl.- Ing. Dr. techn. Klaus Scipal

durch
Birgit Braumann
Karmeliterhofg. 2/1/20, 1150 Wien

Wien, im Mai 2006

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines automatisierten Ablaufs einer objektorientierten Gebäudedetektion aus Laserscannerdaten und multispektralen Bildern.
Das flugzeuggetragene Laserscanning entwickelte sich in den letzten Jahren zu einer nicht mehr wegzudenkenden Datenquelle zur Erfassung der Topografie und in Folge zur Erstellung hochauflösender Gelände- und Oberflächenmodelle. Aufgrund der inzwischen stark gestiegenen Punktdichte von Laserscannerdaten haben sich neben diesen „Standardanwendungen“ eine Vielzahl weiterer Anwendungsgebiete, darunter die Gebäudedetektion und die Erstellung von 3D-Gebäudemodellen, aufgetan.
Insbesondere wegen der immer höher gewordenen räumlichen Auflösung der Bilddaten (hoher Detaillierungsgrad, hohe spektrale Varianz, etc.) gewinnen Methoden der Bildsegmentierung in der Bildanalyse mehr und mehr an Bedeutung: Bildobjekte in Fernerkundungsdaten erscheinen oft relativ homogen und können durch adäquate Segmentierungsverfahren gut abgegrenzt und dargestellt werden. Damit reduziert sich die Anzahl der zu klassifizierenden Elemente enorm. Der objektorientierte Ansatz zur Gebäudedetektion besteht aus den Teilschritten Segmentierung und Klassifikation. Die bei der Segmentierung erzeugten Pixelgruppen (Segmente) werden mit Hilfe auszuwählender Objektmerkmale innerhalb eines zu erstellenden Regelwerks den einzelnen Klassen zugewiesen. Zusätzlich zu diesen Merkmalen lassen sich räumliche und semantische Beziehungen zwischen den Segmenten oder Objektgeometrien zur Klassifikation einsetzen. Die Ergebnisse der Gebäudedetektion zeigen, dass mit den entwickelten Algorithmen Gebäude zufrieden stellend erkannt und klassifiziert werden können. Die durchgeführte Validierung bestätigt dies.

Abstract

The goal of this paper is to develop an automated procedure for an object-oriented classification of buildings from Lidar data and multispectral images.
During the last decade Airborne Laserscanning has become a mature and widely accepted technology for capturing 3D data of the topographic surface for generating high resolution DTM’s and DSM’s. Improvements in Lidar data sampling density rendered possible a number of further applications, herein building detection and the generation of 3D building models.
Beginning with the availability of very high resolution imagery and their characteristics (high level of detail, high spectral variance, etc.) image segmentation techniques have become popular in data interpretation: image objects in remote sensing data appear relatively homogeneous and can be delineated by segmentation. Thus, the number of elements as a basis for a following classification is reduced enormously. The object-oriented approach to building detection consists of the steps segmentation and classification. Pixel groups (segments) generated during segmentation are classified by applying specific object features within a developed rule base to the respective object. Beside these object features spatial and semantic relationships between image objects or geometrical properties can be employed for classification.
The results of the developed algorithms for building detection are satisfying, buildings are detected properly. The accomplished validation confirms this conclusion.

Dank

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Weiters bedanke ich mich beim Amt der O.Ö. Landesregierung, Abteilung Geoinformation und Liegenschaft, für die Bereitstellung der digitalen Farborthophotos aus der OÖ. Gesamtbefliegung 2001 durch das BEV.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung…… 1

2. Laserscanning…… 3

2.1 Einleitung…… 3

2.2 Prinzip des Laserscanning…… 4

2.2.1 Eigenschaften des Lasers…… 6

2.2.2 Prinzip der Entfernungsmessung beim Laserscanning…… 6

2.3 Entwicklung des Laserscanning…… 8

2.3.1 Post-processing der Daten…… 10

2.3.2 Systemkalibrierung…… 10

2.3.3 Stand der Technik…… 11

2.4 Genauigkeit und Auflösungsvermögen von Laserscanning…… 12

2.4.1 Genauigkeitsbetrachtungen zum Laserscanning und daraus abgeleiteter Produkte…… 13

3. Ableitung von Oberflächenmodellen aus Lidar-Daten…… 16

3.1 Gegenüberstellung Lidar – Stereophotogrammetrie…… 16

3.2 Begriffsdefinitionen digitaler Modelle…… 18

3.3 Filterung…… 19

3.3.1 Überblick über bestehende Ansätze zur DTM-Berechnung…… 20

4. Anwendungsgebiete von Laserscannerdaten…… 23

4.1 Erstellung von (einfachen) Oberflächenmodellen und Geländemodellen…… 26

4.2 Anwendungen in der Forstwirtschaft…… 27

4.3 Detektion und Modellierung von 3D-Gebäudemodellen…… 28

4.3.1 Erfassungstechniken und -Verfahren…… 29

4.3.2 Rekonstruktion und Modellierung…… 31

4.3.3 EuroSDR Comparison - Studie zur Genauigkeit von 3D Stadtmodellen…… 32

5. Bildanalyse…… 35

5.1 Klassifikation…… 35

5.1.1 Pixelbasierte Verfahren…… 35

5.1.2 Der objektorientierte Ansatz…… 37

5.2 Segmentierung…… 37

5.2.1 Segmentierungsverfahren…… 38

5.2.2 Vergleichsstudie Segmentierungssoftware…… 40
5.3 Objektorientierte Bildanalyse mit eCognition…… 45
5.3.1 Der Segmentierungsalgorithmus…… 45
5.3.2 Klassifikation in eCognition…… 47

6. Datengrundlage…… 49
6.1 Untersuchungsgebiet…… 49
6.2 Daten…… 50
6.2.1 Laserdaten…… 50
6.2.2 Orthophotos…… 50
6.2.3 Multispektrale Ikonos-Szene…… 51
6.3 Aufbereitung der Laserdaten…… 51
6.3.1 Vorbereitende Schritte…… 51
6.3.2 Das normierte Oberflächenmodell (nDSM)…… 52
6.3.3 Die Differenz aus *first pulse*- und *last pulse*-Daten …… 53

7. Gebäudedetektion…… 54
7.1 Überblick über bestehende Ansätze zur Gebäudeextraktion…… 54
7.2 Segmentierung der Laserdaten…… 57
7.3 Klassifikation der Laserdaten…… 58
7.3.1 Beschreibung der verwendeten Merkmale…… 60

8. Ergebnisse…… 63
8.1 Darstellung der Gebäudedetektion…… 63
8.2 Diskussion…… 64
8.3 Gegenüberstellung mit dem Ergebnis nach der Dempster-Shafer Methode…… 67

9. Validierung…… 69
9.1 Beurteilung und Qualitätskontrolle…… 69
9.2 Validierung der beiden Teilgebiete…… 72

10. Zusammenfassung und Ausblick…… 74

Literaturverzeichnis…… 76
Abkürzungsverzeichnis…… 81
Lebenslauf

1. Einleitung

Gebäudemodelle und digitale Stadtmodelle sind zu einem wichtigen und attraktiven Produkt in Photogrammetrie und Fernerkundung geworden. Sie enthalten die topologischen und geometrischen Informationen des dargestellten Gebietes. Das Spektrum der Applikationen für Stadtmodelle ist breit: Stadtplanung, Telekommunikation, Navigation, *location based services*, Katastrophenmanagement, Umweltschutz und –überwachung und vieles mehr. Bei einem Großteil der Anwendungsgebiete sind es in erster Linie Gebäudemodelle, denen vorrangiges Interesse gilt.

Noch bis vor einigen Jahren waren digitale Luftbilder die Hauptdatenquelle in der Erzeugung von digitalen Stadtmodellen und 3D-Gebäudemodellen. Ergänzend wurden terrestrische Aufnahmen, Grundrisspläne und aus der klassischen Vermessung gewonnene Daten verwendet. Der Prozess der Extraktion von relevanten Geodaten und Objekten aus obigen Quellen ist jedoch äußerst arbeits-, zeit- und kostenintensiv. Hinzu kommt, dass Grundrisspläne und sonstige Kartenunterlagen nicht überall verfügbar sind bzw. nicht aktuell zur Verfügung stehen. Aktualität der Daten ist aber z. B. im Fall von Katastrophenmanagement (Überschwemmungen, Erdbeben) von großer Bedeutung.

Das flugzeuggetragene Laserscanning entwickelte sich in den letzten Jahren zu einer nicht mehr wegzudenkenden Datenquelle zur Erfassung der Topografie und in Folge zur Erstellung hochauflösender digitaler Gelände- und Oberflächenmodelle. Das Verfahren zeichnet sich durch seine Effektivität und Kostengünstigkeit bei der Befliegung aus, weiters durch hohe vertikale Genauigkeit und potentielle Automatisierungsfreundlichkeit. Die in digitaler Form erfassten Daten beinhalten eine große Menge an Information über die Geländeoberfläche inklusive darauf befindlicher Objekte wie z. B. Gebäude, Vegetation, Verkehrswege, Fahrzeuge oder auch Hochspannungsleitungen.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines automatisierten Ablaufs einer objektorientierten Gebäudedetektion aus Laserscannerdaten mit bzw. ohne Einbeziehung multispektraler Daten in Form hochauflösender Orthophotos und Ikonos-Daten. Durchgeführt wird diese Aufgabe unter Verwendung der Bildverarbeitungssoftware eCognition 3.0 (Definiens Imaging GmbH, München).

Der Bedarf an neuen Methoden wächst zusehends, da der technische Fortschritt in der Sensorenentwicklung weit schneller vorangeht als jene der Auswertetechniken. Speziell bei der im Laserscannerbereich erzielten hohen Auflösung und den damit verbundenen Datenmengen reicht es nicht mehr aus, sich alleine auf die Grauwerte der einzelnen Pixel zu beziehen, sondern es muss auch deren Lage im Raum/Bild berücksichtigt werden. Aus der Lage der Pixel lassen sich Nachbarschaftsbeziehungen oder Objektgeometrien ableiten, die einen hohen Informationsgehalt aufweisen (Neubert und Meinel, 2002).

Bei der konventionellen, pixelorientierten Bildauswertung wird einzig der Grauwert zur Klassifikation herangezogen: Die Klassifikation von Bildobjekten mit ähnlicher spektraler Signatur, wie z. B. die Unterscheidung zwischen See / Fluss oder Straße / Parkplatz, ist nur schwer möglich, da sie nicht von Formparametern unterstützt wird. Weiters ist eine Verknüpfung von Bilddaten mit anderen Datenquellen, wie z. B. thematischen Karten oder Katastergrenzen, nicht unmittelbar möglich. Schließlich können semantische und strukturierte Informationen nicht mit einbezogen werden, so wäre z. B. ein kleiner Wald innerhalb städtischer Bebauung ein Park. Klassifikationsalgorithmen, die auf der Analyse der einzelnen Pixel basieren, sind somit nicht in der Lage, die Menge an enthaltener Information in den heute zur Verfügung stehenden hochauflösenden Daten zu nutzen, die Notwendigkeit der Beachtung räumlicher Beziehungen wird dringlicher.

Im Zusammenhang mit digitaler Bildverarbeitung bedeutet objektorientiert, dass nicht das einzelne Pixel, sondern sog. Segmente die Informationsträger für Analysen darstellen, um neben der spektralen Information auch Form, Textur und kontextuelle Attribute berücksichtigen zu können (Baatz und Mimler, 2002). Benachbarte Pixel werden zu Gruppen zusammengefasst, sie bilden *image objects*, Segmente. Diese Segmente sind noch keine semantisch belegten Bildobjekte, sondern vorerst nur Gruppen von Pixeln, die bestimmte Homogenitätskriterien erfüllen. Erst durch eine Klassifikation wird der Bezug zum realen Objekt hergestellt.

2. Laserscanning

2.1 Einleitung

Die Technik der flugzeuggestützten Fernerkundung mittels Laserscanning ist ein noch relativ junges Messverfahren in der Photogrammetrie, das sich jedoch in ziemlich kurzer Zeit rasant entwickelt und als Standardwerkzeug für die Generierung hochauflösender digitaler Geländemodelle etabliert hat.
Ausgangspunkt für die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit flugzeuggestütztem Laserscanning war die Erfassung der Topografie in Waldgebieten. Jedoch bewies das Laserscanning darüber hinaus im Lauf der letzten Jahre auch seine ausgezeichnete Eignung für eine Reihe weiterer Aufgaben im Bereich der Akquisition von Geodaten und der Objekterfassung.
Während in der traditionellen Photogrammetrie 3D-Objekte aus mindestens zwei Bildern rekonstruiert werden, genügt im Fall des Laserscanning nur eine Aufnahmerichtung, da für jeden Laserstrahl neben der Entfernung auch die Richtung aufgezeichnet wird (Abb. 2-1, 2-2).
Für die Praxis ist der potentielle Automatisierungsgrad des ALS (Airborne Laserscanning) von besonderer Bedeutung, weil neben der dem Laserscanning eigenen, kennzeichnenden hohen vertikalen Genauigkeit auch große Gebiete kostengünstig beflogen und bearbeitet werden können.
In der Erstellung von 3D-Geländemodellen hat ALS inzwischen andere „traditionelle" photogrammetrische Verfahren weitgehend verdrängt. Somit ersetzt das flugzeuggetragene Laserscanning zum Teil konventionelle Techniken in der Photogrammetrie, grundsätzlich jedoch ergänzen sich Photogrammetrie und Flugzeuglaserscanning aufgrund ihrer komplementären Eigenschaften.

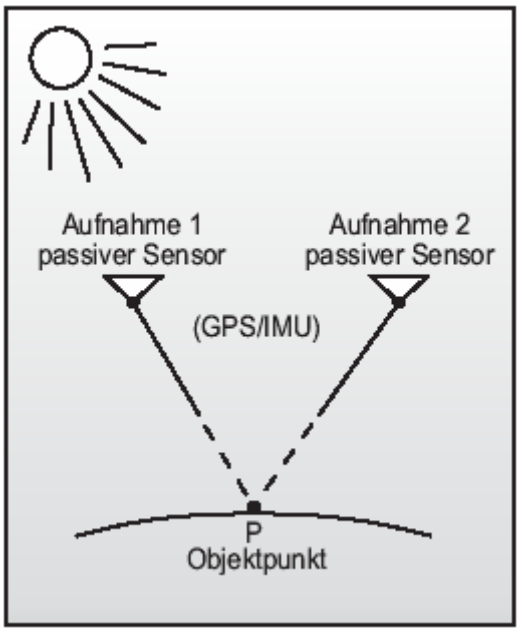

Abb. 2-1: Paradigma der Stereophotogrammetrie (Kraus, 2005)

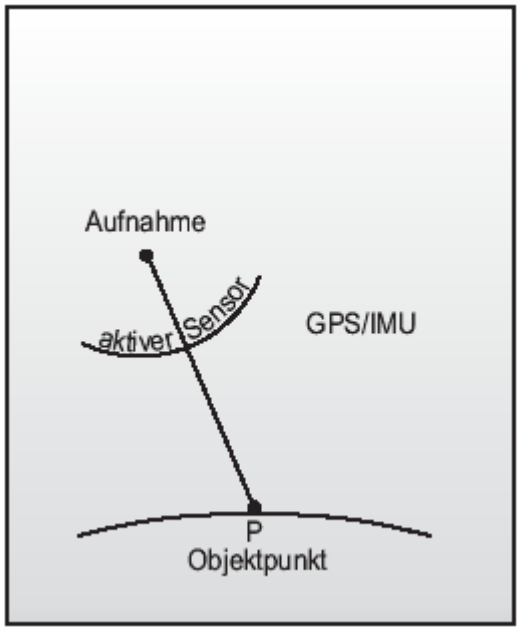

Abb. 2-2: Paradigma des ALS (Kraus, 2005)

2.2 Prinzip des Laserscanning

Laserscanning ist eine Methode zur geometrischen Datenerfassung auf der Basis von Winkel- und Streckenmessungen (Abb. 2-3). Das beim ALS eingesetzte Verfahren beruht auf einer reflektorlosen Entfernungsmessung durch einen in einem Flugzeug oder Helikopter installierten Laser zur Erdoberfläche. Ein Sender erzeugt ein optisches Signal, das von der Oberfläche, auf die es trifft, reflektiert und vom Empfänger aufgezeichnet wird.

Ein ALS-System setzt sich aus folgenden Teilkomponenten zusammen:

- dem eigentlichen Laserscanner (Entfernungsmesser und opto-mechanischem Scanner)
- dem Positionierungs- und Orientierungssystem (bestehend aus GPS und IMU)
- einer Kontroll- und Datenspeichereinheit

Durch die seitliche Ablenkung des Laserstrahls über einen Scanmechanismus quer zur Flugrichtung und die Vorwärtsbewegung des Flugzeuges wird ein Geländestreifen unter dem Flugzeug abgetastet (Maas, 2005).

Abb. 2-3: Prinzip des flugzeuggetragenen Laserscanning (Schleyer, 2002)

Auf diese Weise wird eine große Anzahl unregelmäßig verteilter Punkte der Geländeoberfläche aufgezeichnet. Die über GPS und IMU registrierte Position der einzelnen Punkte entspricht dem Ort, an dem der eintreffende Laserpuls von der Oberfläche reflektiert wurde, z. B. einem Baum, einem Hausdach oder auch dem offenen Gelände (Abb. 2-4).

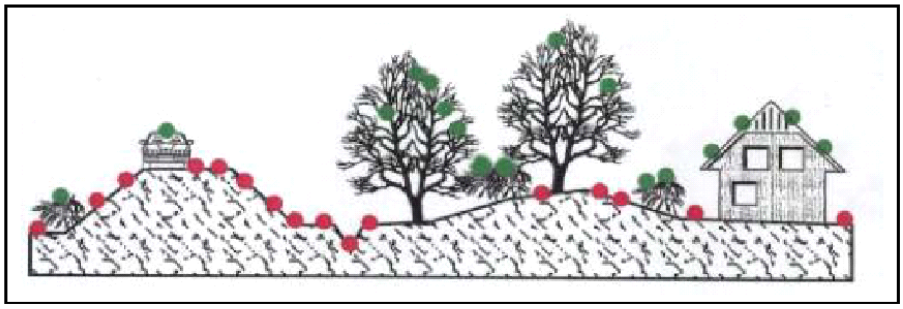

Abb. 2-4: Verteilung der gemessenen Laserpunkte (Schönemeier, 1996)

Die Systemparameter Messrate, Scanwinkel und Scanfrequenz sind variabel einstellbar und bestimmen die Dichte und Verteilung der Laserpunkte auf der Geländeoberfläche zusammen mit der Flughöhe und der Fluggeschwindigkeit.

In der Fernerkundung wird das Laserscanning als „aktives" Messverfahren bezeichnet, da der Laser einen Lichtstrahl aussendet und somit unabhängig von der Sonne als Beleuchungsquelle ist. Dieses Signal wird an der Oberfläche, auf die es trifft, gestreut. Im Empfänger registriert eine Photodiode jenen Teil des Laserlichts, das in Richtung der Fernerkundungsplattform zurückgestreut wird. Das Empfangssignal beinhaltet sämtliche entfernungsbezogenen Einflüsse, was neben der Distanz zwischen Sensor und Oberfläche im Fall von Mehrfachreflexionen auch Höheninformationen über die auf der Geländeoberfläche befindlichen Objekte sind (Abb. 2-5).

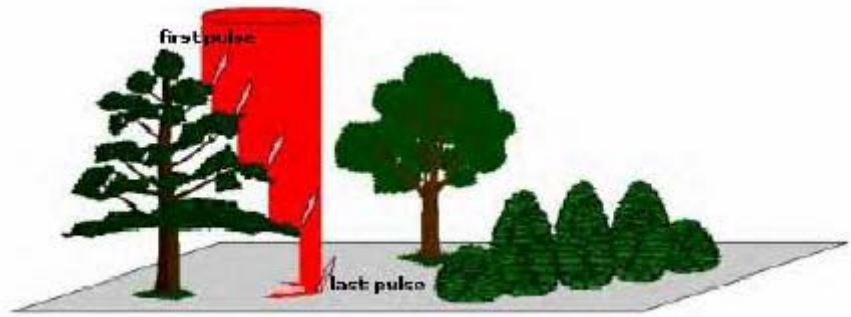

Abb. 2-5: Schema einer Mehrfachreflexion (TopoSys)

Im Gegensatz zum ALS stellen passive Fernerkundungssysteme reine Empfänger dar, die, abhängig vom Frequenzband, entweder die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung oder die Thermalstrahlung der Erde aufzeichnen (Wagner, Ullrich, Briese, 2003). Darin liegt u. a. ein großer Vorteil des Laserscanning: Da das Messverfahren nicht an die Beleuchtung der Objekte durch die Sonne gebunden ist, werden die Aufnahmen weder durch störende Wolkenschatten beeinträchtigt, noch beeinflussen diverse Schatten von Gebäuden oder Vegetation die Intensität der zurückgestreuten Strahlung, da ja Bestrahlungs- und Aufnahmerichtung identisch sind. Somit kann das System auch bei schlechten Beleuchtungsverhältnissen oder theoretisch auch nachts eingesetzt werden.

Laserscanning liefert somit eine dichte 3D-Punktwolke, die die Erdoberfläche inklusive sämtlicher darauf befindlicher künstlicher und natürlicher Objekte enthält. Gemessen werden, ähnlich wie bei der Tachymetrie, Richtungen und Entfernungen, aus denen ein Bild von Höhendaten abgeleitet wird. Das Verfahren ist allerdings nicht in der Lage, konkrete Objekte abzubilden, die Koordinaten beziehen sich auf den quasi-zufälligen Fußpunkt des Laserstrahls, wo er gerade die Erdoberfläche trifft. Das System erzeugt keine visuell interpretierbare Bildinformation, man erhält von der aufgenommenen Landschaft nur die Höhenwerte. Für die Extraktion relevanter Parameter aus der Punktwolke (Geländeoberfläche, Höhen von Gebäuden oder Bäumen etc.) sind vor der Bearbeitung entsprechende mathematische und geometrische Modellbildungen anzuwenden (siehe Kapitel 3.3).

2.2.1 Eigenschaften des Lasers

Laserlicht besitzt ausgezeichnete und für das Laserscanning bedeutende Eigenschaften. Es ist

- nahezu monochromatisch
- stark bündelungsfähig – dadurch kann eine sehr hohe Leistungsdichte und Strahlungsintensität erreicht werden
- kohärent – die vom Laser ausgesandten Wellen bewegen sich fast phasengleich

Die Bezeichnung LIDAR (***LI****ght* ***D****etection* ***A****nd* ***R****anging*) bezieht sich auf das optische Äquivalent von Radar (***RA****dio* ***D****etection* ***A****nd* ***R****anging).* Ein Nachteil gegenüber Mikrowellenmesssystemen (Radar) ist, dass Messungen im optischen Bereich stärker durch die Atmosphäre beeinflusst werden, d. h. Absorptions- und Streuungsvorgänge aufgrund von Wasserdampf und Aerosolen kommen stärker zum Tragen. Zusätzlich beeinflussen diese atmosphärischen Bestandteile die Gruppengeschwindigkeit des Laserimpulses, eine Nichtberücksichtigung führt zu Fehlern in der gemessenen Entfernung.

2.2.2 Prinzip der Entfernungsmessung beim Laserscanning

Für die Entfernungsmessung zur Oberfläche der Erde bzw. deren Bedeckung durch Gebäude oder Vegetation gibt es zwei unterschiedliche Methoden:

- Laufzeitmessung
- Phasenmessung

Derzeit zum Einsatz kommende kommerzielle Laserscannersysteme basieren alle auf dem Prinzip der Laufzeitmessung über Laserimpulse (Wagner, Ullrich, Briese, 2003). Der Vollständigkeit halber wird im Folgenden auf beide Systeme eingegangen.

Laufzeitmessung (*pulsed laser*)

Bei der Laufzeitmessung werden kurze Lichtimpulse ausgesandt und die Zeit t gemessen, die der Impuls vom Laserscanner zum Objekt und zurück benötigt (Sendeimpuls, Stoppimpuls).
Gemeinsam mit der Lichtgeschwindigkeit c ergibt sich daraus die Distanz D:

(1) $$D = c\,t / 2$$

Bei der Berechnung ist zu beachten, dass sich der Laserpuls mit einer etwas von c abweichenden Gruppengeschwindigkeit ausbreitet, was bei Nichtbeachtung zu einer Differenz in der Entfernung bis in den Dezimeterbereich führen kann (Wagner, Ullrich, Briese, 2003). Nach Rees (2001) beträgt die Abweichung bis zu 0,03 %, was bei einer Flughöhe von 1000 m immerhin eine Differenz von 0,3 m ausmacht. Befinden sich mehrere Objekte im Strahlengang, kann es zu Mehrfachreflexionen kommen: Trifft ein Laserpuls z. B. auf einen Baum, so wird ein Teil des Strahls von Blättern oder Ästen reflektiert. Der Rest dringt durch Lücken in der Vegetation teilweise bis zum Boden vor und wird von der Erdoberfläche zurückgeworfen. Der von der Baumkrone reflektierte Puls wird aufgrund des kürzeren Weges zuerst registriert (*first pulse,* FP), die Reflexion am Boden wird als letzter Puls (*last pulse,* LP) aufgezeichnet (Abb. 2-6).

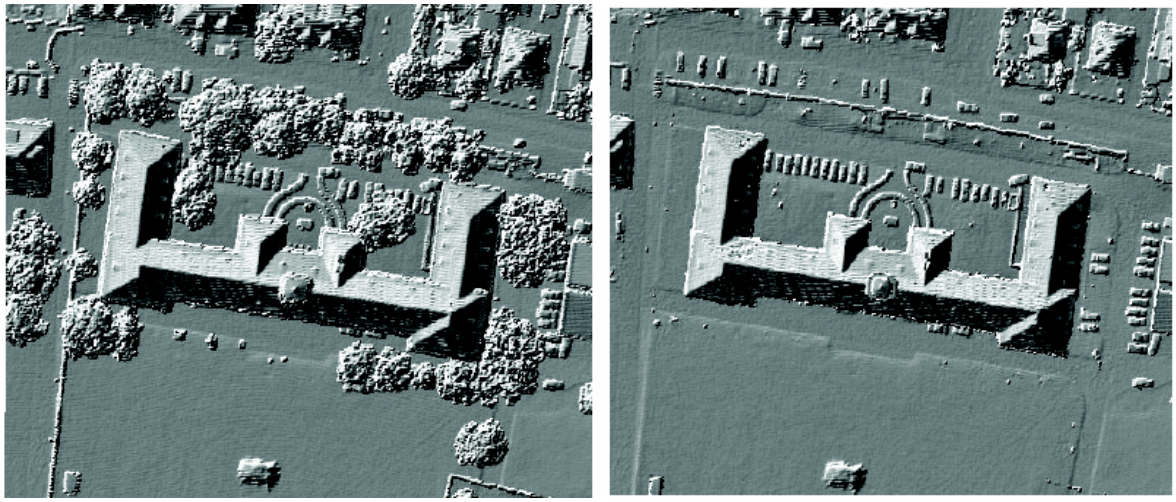

Abb. 2-6: Darstellung eines DSM aus erster (links) und letzter (rechts) erfasster Reflexion (Haala, 2005)

Somit werden etwa bei Messungen über bewaldetem Gebiet die aufgezeichneten ersten Impulse mit den Baumwipfeln assoziiert, die *last pulse* - Daten stammen mit großer Wahrscheinlichkeit vom Waldboden, sie enthalten kaum noch Vegetation.
Gepulste Laser bieten die Möglichkeit, mehrere Reflexionen des ausgesandten Signals zu registrieren. Im Gegensatz zu früheren Systemen, die nur ein Echo aufzeichnen konnten (also entweder den ersten Puls oder den letzten), sind heute die meisten Geräte in der Lage, bis zu 5 Impulse aufzuzeichnen.

Darüber hinaus lassen weitere Entwicklungen wie die Aufzeichnung der gesamten Impulsform (*full waveform capture*) oder der Intensität des reflektierten Echos weitergehende Rückschlüsse auf das aufgenommene Objekt zu.

Phasenvergleichsverfahren (*continuous wave ranging*)
Die zweite Möglichkeit zur Entfernungsbestimmung ist der Phasenvergleich zwischen ausgesandtem und empfangenem Signal. Bei diesem System der sog. *continuous wave* – Scanner wird anstelle des kurzen Pulses ein sinusförmiges intensitätsmoduliertes Messsignal ausgesendet, die Entfernung wird über den Vergleich der Phasenlage bestimmt.

2.3 Entwicklung des Laserscanning

Während der 60er und 70er Jahre demonstrierten eine Reihe von Versuchen die unterschiedlichsten Einsatzmöglichkeiten von Lasern in der Fernerkundung, wie z. B. *lunar laser ranging, satellite laser ranging, atmospheric monitoring* oder *oceanographic studies*.

In den 80er Jahren standen im zivilen Bereich in erster Linie die Laseraltimetrie (Höhenmessung) mit atmosphärischen und ozeanografischen Anwendungen im Vordergrund, eingesetzt z. B. in NASA's *Atmospheric Oceanographic Lidar* (AOL) oder im *Airborne Topographic Mapper* (ATM). Der Einsatz im militärischen Bereich galt der Aufklärung und der Ziellenksteuerung. Es dauerte aber mehr als 30 Jahre, bis Laserscanner kommerziellen Einsatz im Gebiet der flugzeuggestützten Erfassung der Topografie fanden.

Erst Mitte der 90er Jahre gab es erste kommerzielle Anbieter, die auf Kundenwunsch Laserscannerflüge zur Erfassung der Geländeoberfläche durchführten. Die seit diesem Zeitpunkt begonnene rasante Entwicklung sowohl im kommerziellen Sektor als auch seitens der Forschung wurde durch mehrere Faktoren ausschlaggebend begünstigt: So haben sich sowohl die Sensortechnologie als auch Leistung, Kapazität und Verfahren in der Datenverarbeitungskette seit den Anfängen in den 90er Jahren enorm weiterentwickelt. Dennoch sind beide Gebiete noch nicht ausgereizt.

Weitere technische Errungenschaften, die für die Entwicklung von ALS in den 90er Jahren mit eine entscheidende Rolle spielten, waren der Einsatz von GPS - und IMU - Systemen: Die exakte Positionierung mittels GPS (*Global Positioning System*) und Orientierung durch IMU bzw. INS (*Inertial Measurement Unit* bzw. *Inertial Navigation System*) erlauben – bei einer bekannten Referenzstation und genauer Kenntnis des Geoids – eine direkte Georeferenzierung der Punktdaten.

Die Wichtigkeit der präzisen Orientierung der Plattform liegt darin begründet, dass aufgrund der dynamischen Datenakquisition und der nicht exakt geradlinigen Vorwärtsbewegung des Flugzeugs jede Scanlinie ihre eigene innere Orientierung aufweist. Die Bestimmung der Flugzeugposition erfolgt über dGPS (differentielles GPS). Durch polares Anhängen der Richtungen und Schrägentfernungen werden vom on-board - Computer direkt die 3D-Koordinaten der Bodenpunkte berechnet sowie zusätzliche Informationen wie z. B. die *return number* (bei *multiple return systems*) oder die Intensität des Impulses aufgezeichnet. Die Aufgabe der exakten Georeferenzierung trägt jedoch durchaus auch Probleme in sich, so führen verschiedenste Einflüsse, wie z. B. Drifts in der INS - Orientierung, zu systematischen Fehlern.

Systeme Mitte der 90er Jahre besaßen eine Pulsrate von 2 - 5 kHz, die resultierende Punktdichte lag damit bei etwa 1 Punkt pro 10 m², aufgezeichnet werden konnte vorerst nur ein Echo. Aktuelle Geräte weisen eine Datenrate von 80 - 100 kHz auf (100 kHz entsprechen 100.000 Bodenpunkten pro Sekunde), damit wird die Generierung hochauflösender Oberflächenmodelle mit Punktabständen von deutlich unter 1 m bei einer Höhengenauigkeit von 10 - 20 cm in flachem Gelände ermöglicht (Maas, Vosselman, 2004). Für Sonderanwendungen wurden auch schon Datensätze mit mehr als 10 Punkten pro m² erzeugt (Maas, 2005).

Die Genauigkeit der aus Lidar gewonnenen Daten wird durch eine Funktion aus Flughöhe, Durchmesser des Laserstrahls und Qualität der GPS/IMU-Daten sowie durch das angewendete post-processing-Verfahren bestimmt. Die Flughöhe über Grund liegt i. a. zwischen 1000 - 2000 m, bis zu 3000 m sind möglich. Sie wird u. a. bestimmt durch die Laserleistung, der aber aufgrund der Forderung nach Augensicherheit eine Grenze gesetzt ist. Das Auflösungsvermögen ist beschränkt durch die Ausdehnung des Laserstrahls auf der Erdoberfläche: so hat bei einer Flughöhe von 1000 m der Fußpunkt (Leuchtfleck des Lasersignals am Boden) eines durch einen Öffnungswinkel von ca. 0,2 - 2 mrad gebündelten Laserstrahls einen Durchmesser von 0,2 - 2 m. Punktverteilung und Punktabstand am Boden sind eine Funktion der Flugparameter Flughöhe über Grund, Geschwindigkeit, Abstand der Fluglinien sowie der einstellbaren Systemparameter Messrate, Scanwinkel und Scanfrequenz. Ändert sich ein Parameter, verändern sich auch Punktdichte und –abstand.
Der Öffnungswinkel des Scanmechanismus kann zwischen 15° und 60° betragen, daraus folgt eine Geländestreifenbreite zwischen 500 und 2000 m. Die Wellenlänge des Lasers liegt typischerweise zwischen 0,8 – 1,55 µm (Wagner et al., 2004).

2.3.1 *Post-processing* der Daten

Während des Fluges werden nur die Rohdaten gesammelt und abgespeichert, sie beinhalten die Messwerte des Laserscanners und Zeitmarken zur Synchronisation mit den Flugzeugpositionsdaten.
Das Endprodukt einer Befliegung wird normalerweise im jeweiligen Landeskoordinatensystem geliefert. Vor der Auslieferung wird von der Firma die Verarbeitung der Daten im post-processing durchgeführt. Die Berechnung der Koordinaten erfolgt durch eine Reihe von Koordinatentransformationen. Aufgabe ist, aus den Rohdaten und den Flugzeugpositionsdaten die Koordinaten der Laserpunkte zu bestimmen.
Die erforderlichne Transformationen sind im Überblick:

- Vom Laser-Koordinatensystem
  → ins Flugzeugkoordinatensystem
  → ins lokale, astronomische Horizontsystem
- Absolute Koordinatenbestimmung im WGS 84 / Ellipsoidische Höhen
  (*World Geodetic System* 1984: erdfestes, kartesisches Koordinatensystem mit Ursprung im Massenzentrum der Erde)
- Transformation dieser Koordinaten ins System der Landesvermessung / Orthometrische Höhen
  (Gauß-Krüger-System (x,y,z), mit dem Bessel-Ellipsoid als Bezugsfläche)

Bei der Transformation ins Landeskoordinatensystem ist eine genaue Kenntnis des lokalen Geoids wegen des Übergangs von ellipsoidischen Höhen (GPS) auf orthometrische Höhen (Gebrauchshöhen) zu beachten: Das Geoid weist vor allem im Gebirge häufig starke lokale Deformationen auf. Die zumeist fehlende Kenntnis hierüber und zusätzliche eventuell vorhandene Netzspannungen im System der Landesvermessung können zu deutlichen Genauigkeitsverlusten führen. Für die Bearbeitung der Lidar-Daten gibt es jedoch noch keine standardisierten Methoden.

2.3.2 Systemkalibrierung

Um ein hochgenaues Ergebnis zu erzielen, muss das Messsystem vor und nach dem Flug kalibriert werden. Benötigt werden drei individuelle Kalibrierungen der einzelnen Messinstrumente GPS, INS und Lasersensor, sowie die gegenseitige Kalibrierung der Instrumente im Gesamtsystem. Die Systemkalibrierung kann direkt oder indirekt durchgeführt werden:

- direkte Methode: die Kalibrierung erfolgt durch direkte Messung der Kalibrierparameter
- indirekte Methode: die Parameter werden durch eine Ausgleichung über unabhängige Kontrollmessungen abgeschätzt.

Eine detaillierte Beschreibung einer Systemkalibrierung findet man bei Hug (1996) oder Schiele (2005).

2.3.3 Stand der Technik

Heute sind praktisch alle Systeme in der Lage, die Laufzeit mehrerer zurückkehrender Echos zu messen, d. h. neben der Unterscheidung zwischen *first pulse* und *last pulse* können z. T. bis zu fünf Echos aufgezeichnet werden. Hintergrund dieser Entwicklung ist der Umstand, dass die Aufzeichnung nur eines einzigen Pulses zwar für den Fall ausreichend ist, für den innerhalb der vom Laserstrahl getroffenen Fußpunktfläche nur ein Zielobjekt liegt. Befinden sich im Ausbreitungsweg des Strahls jedoch mehrere untereinander liegende Objekte, erzeugt jedes einzelne eine individuelle Reflexion. Bei nur einem aufgezeichneten Echo gehen diese Informationen verloren. Zusätzlich erlauben viele Geräte die Speicherung der Pulsintensität.

Relativ neu ist die Digitalisierung des gesamten Pulsechos (*full waveform capture*), diese erlaubt weitergehende Analysemöglichkeiten über die Verteilung der vertikalen Strukturen entlang des Laserstrahls: statt diskreter Pulse wird hier für jeden ausgesandten Laserpuls ein komplettes Intensitätsprofil des reflektierten Echos aufgezeichnet. Mit dieser Sensorform ist es möglich, Gebäudekanten und allgemein Bruchlinien abzuschätzen und zu detektieren (Abb. 2-7). Im bewaldeten Gebiet kann nicht nur die Höhe der Baumwipfel erfasst werden, sondern auch die Höhen darunter liegender Vegetationsstände sowie Höhe und Dichte der Vegetation am Boden (Hug, Ullrich, Grimm, 2004), (Abb. 2-8, 2-9).

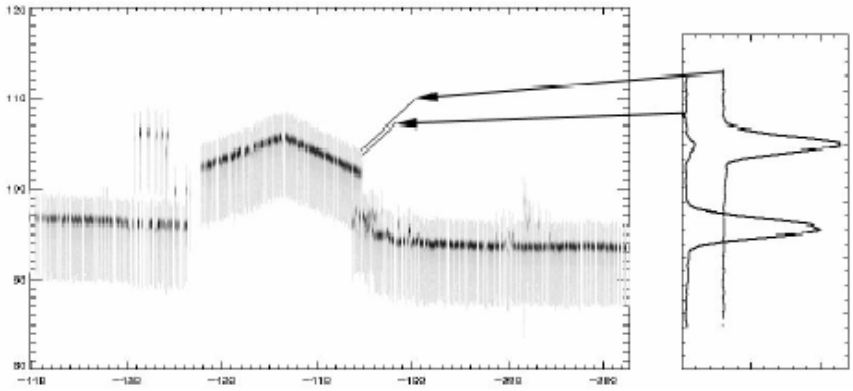

Abb. 2-7: Profil durch ein Gebäude (Hug et al., 2004)

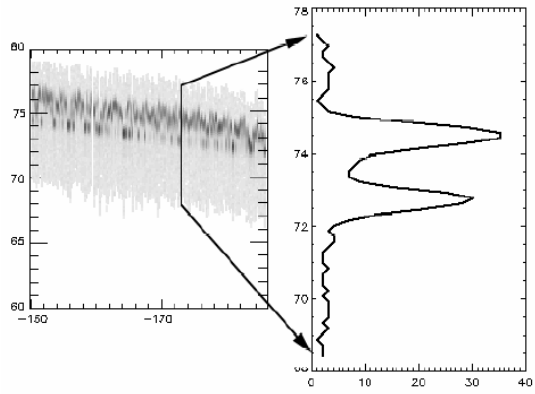

Abb. 2-8: Profil durch ein Getreidefeld, Ausschnitt (Hug et al., 2004)

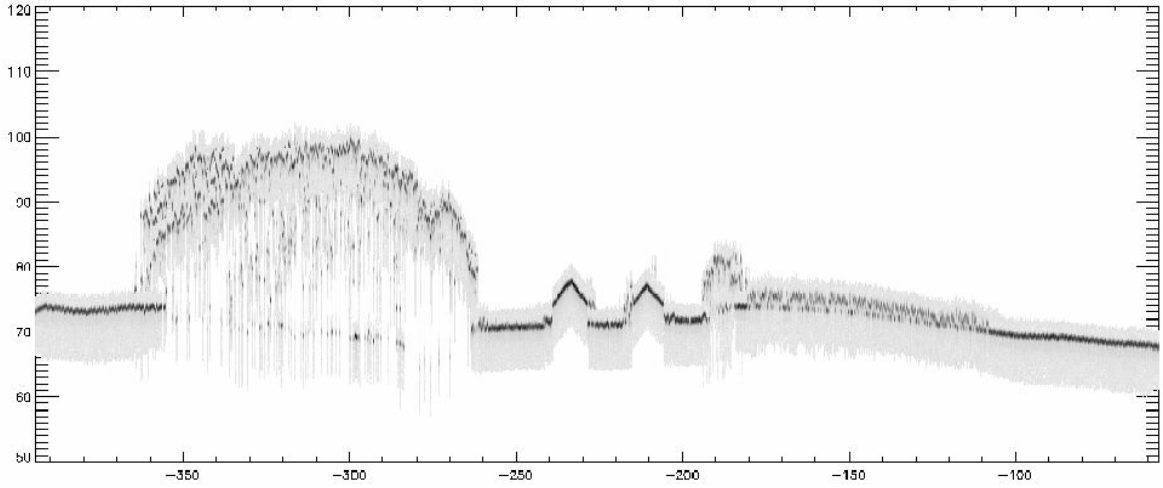

Abb. 2-9: Profil durch Wald – Gebäude – Getreidefeld (Hug et al., 2004)

Ein anderer, entgegengesetzter Trend geht in Richtung *single mode* – Signale von Lasern, deren Strahldurchmesser immer kleiner gehalten wird. Mit solchen Sensoren verringert sich die Anzahl von *multiple returns* pro ausgesendetem Impuls aufgrund der Tatsache, dass vom Laserstrahl ein kleinerer Fleck auf der Oberfläche beleuchtet wird. Damit verringert sich allerdings auch der Informationsgehalt pro Laserstrahl, eine Klassifikation dieser Daten ist dann nur unter Berücksichtigung von Nachbarechos möglich (Wagner et al., 2004).

Teilweise werden inzwischen Laserscannersysteme mit Digitalkameras auf einer Messplattform kombiniert. Somit sind auch die Luftbilder direkt georeferenziert.

Laserscanning vom Satelliten – ohne Ablenkungseinrichtung – ist bereits im Einsatz.

Diese Entwicklungen sind, neben einer weiteren Steigerung von Messfrequenz und Flughöhe, noch nicht abgeschlossen.

2.4 Genauigkeit und Auflösungsvermögen des Laserscanning

Die Genauigkeit des Verfahrens mit einem Gesamtfehler in der Höhe von 10 - 15 cm ergibt sich aus einer Reihe von Einzelfaktoren (Maas, 2003).

Die Hauptfehlerquelle liegt in der Höhenbestimmung des Flugzeuges durch dGPS (Maas, 2005).

Die zu erzielende Gesamtgenauigkeit ist u. a. abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit. Weiters steigt der Fehler mit zunehmender Geländeneigung (Briese et al., 2001). Bei relativ ebenem Gelände trägt die eigentliche Laserdistanzmessung mit nur 3 - 4 cm Höhenfehler zum Gesamtfehler bei. Werden alle systematischen Fehler eliminiert, können für den Gesamtfehler sogar nur 5 cm erreicht werden. Eine vergleichbare Höhengenauigkeit erzielt man aus Luftbildern mit einer Flughöhe über Grund von rd. 1000 - 2000 m. Hier gilt die Faustformel: Flughöhe über Grund / 10.000 (Maas, 2005).

Die räumliche Auflösung von Flugzeuglaserscannersystemen wird bestimmt durch Datenrate, Fluggeschwindigkeit und Flughöhe, Geländeneigung, Breite des Geländestreifens / gewählter Scanbreite, verwendetem Scanmechanismus und der Genauigkeit der Bestimmung der Plattformorientierung.
Anfangs wurde das Verfahren praktisch ausschließlich über die Höhengenauigkeit charakterisiert.
Mit zunehmendem räumlichen Auflösungsvermögen von Flugzeuglaserscannersystemen wird auch mehr und mehr die Lagegenauigkeit relevant. Die Lagengenauigkeit ist – im Gegensatz zur Höhengenauigkeit – fast linear von der Flughöhe über Grund abhängig. Herstellerangaben bzw. Literatur (Maas, 2003) geben die Lagegenauigkeit mit ca. 0,05 % der Flughöhe über Grund an, das entspricht 0,5 – 1 m bei einer Flughöhe von 1000 m.
Bei aktuellen Systemen liegt die Auflösung größtenteils bei 1 Punkt pro m², sie ist damit deutlich niedriger als die Auflösung von Luftbildern, welche bei vergleichbarer Flughöhe und Streifenbreite rd. 5 - 10 cm beträgt. Allerdings haben aus Stereo-Luftbildern erstellte Geländemodelle meist eine geringere räumliche Auflösung als diejenigen aus Flugzeuglaserscannerdaten.
Somit ist bei ALS die Höhengenauigkeit i. a. deutlich besser als die Lagegenauigkeit.

2.4.1 Genauigkeitsbetrachtungen zum Laserscanning und daraus abgeleiteter Produkte

Die Qualität von Laserscanneraufnahmen und daraus abgeleiteter Produkte wird von mehreren Faktoren beeinflusst:

- Zufällige und systematische Fehler: verursacht durch die einzelnen Systemkomponenten (Laserdistanzmesser, GPS, IMU) bzw. deren Kalibrierung. Diese können i. a. bei der Ausgleichung der Streifen und Fehlermodellierung behoben werden.
- Fehler im Zusammenhang mit Systemparametern wie Flughöhe, Pulsmodus, Punktdichte, maximalem Scanwinkel. Die Parameter sollten an das jeweilige Projekt / Gelände angepasst und optimiert werden. So haben z. B. Testflüge (TopoSys, 1996) gezeigt, dass sich bei einem Scanwinkel > 10° (*off-nadir*) die Menge abgeschatteter Gebiete stark erhöht, d. h. sich die Anzahl der am Boden auftreffenden Laserpunkte stark verringert, es kommt schneller zu „Datenlöchern“ im DTM. Praktische Tests zeigten auch, dass Laserscannerdaten immer wieder zu tief liegende Punkte (unterhalb der realen Geländeoberfläche) beinhalten, die noch vor der endgültigen DTM-Berechnung herausgefiltert werden sollten (Hyyppae et al., 2004)
- Fehlereinflüsse aufgrund der Charakteristika der aufgenommenen Oberfläche: Art der Bodenbedeckung (Gras, Schotter, Asphalt, Wald), Bewuchsdichte, Geländetyp, Geländeneigung (bei steilerem Gelände können Höhenfehler als Folge nicht kompensierter Lagefehler entstehen).

- Fehler, die während der Bearbeitung der Laserpunkte entstehen: Interpolationsfehler, Filterfehler, Datenglättung, etc. Sie sind abhängig vom verwendeten Algorithmus.

Auswirkungen von Fehlern der verschiedenen Systemkomponenten

Während Fehler in der Entfernungsmessung in erster Linie stochastischer Natur sind, verursachen Fehler in der Positionierung bzw. Orientierung systematische Deformationen in den Laserscannerstreifen (Maas, 2003). Diese systematischen Effekte können lokaler Natur sein, können aber genauso durch konstante Verschiebungen verursacht werden, z. B. beim Auftreten von GPS - *cycle slips* im Zuge der GPS-Messung, Neigungen oder Verwindungen des gesamten Streifens.

Fehler in der Positionsbestimmung bewirken grundsätzlich Versetzungen in den Koordinaten der Bodenpunkte – sie sind unabhängig von der Flughöhe. Die Auswirkungen von Fehlern in den Orientierungsparametern wachsen hingegen linear mit der Flughöhe, weiters nehmen sie von der Streifenmitte zum Streifenrand zu. Die Genauigkeit der Distanzmessung zeigt eine schwache Abhängigkeit von der Entfernung, während sich Fehler in der Winkelbestimmung der Ablenkeinheit des Scanners linear auf die Boden-Koordinaten übertragen. Somit ist die Lagegenauigkeit der Bodenpunkte praktisch linear abhängig von der Flughöhe, die vertikale Genauigkeit dagegen ist kaum abhängig von der Flughöhe.

Die Genauigkeitsanalyse von Laserscannerdaten

Die Genauigkeitsanalyse von Laserscannerdaten wird normalerweise über die berechneten Koordinaten der Laserpunkte im Landeskoordinatensystem vorgenommen. Die absolute Höhengenauigkeit der Laserpunkte wird dabei meist als das wichtigste Kriterium für die Genauigkeit betrachtet.

Praktische Angaben zur koordinativen Genauigkeit von Laserscannerpunkten können basieren auf

- der Einführung von Passpunkten
- der Bestimmung der Diskrepanzen von Verknüpfungspunkten im Überlappungsbereich benachbarter oder sich kreuzender Streifen.

Die Einführung einer größeren Anzahl von Passpunkten wie in der konventionellen Photogrammetrie ist mit großem Aufwand verbunden, während die zweite Methode (semi-) automatisch durchgeführt werden kann. Eine umfassende Ausführung findet sich in Schenk (2001).

Die Qualität von aus Lidar-Daten generierten 3D-Geländemodellen kann in erster Linie durch die Vollständigkeit und Korrektheit der Detektion bzw. Rekonstruktion beschrieben werden. Die Positionsgenauigkeit bzw. geometrische Genauigkeit der Rekonstruktion ergibt sich im Wesentlichen aus der Lagegenauigkeit der ALS-Daten. Diese hängt stark von der Punktdichte ab. Die Höhenkomponente ist zumeist um einiges genauer als der Grundriß (Maas, 2005). Eine bessere DTM-

Genauigkeit wird im offenen, ebenen Gelände erreicht. Genauso sind Daten, die während der laubfreien Jahreszeit aufgenommen werden, besser für die DTM-Generierung geeignet.

3. Ableitung von Oberflächenmodellen aus Lidar-Daten

Gelände- und Oberflächenmodelle aus Lidar-Daten bilden in dieser Arbeit Ausgangsprodukte in der Gebäudedetektion, etwa für die Berechnung eines normierten Oberflächenmodells nDSM, welches für die Ermittlung von Regionen über Grund verwendet wird (siehe Kapitel 3.2). Deshalb soll hier näher auf aus Laserscannerdaten bestimmte Gelände- und Oberflächenmodelle eingegangen werden.

3.1 Gegenüberstellung Lidar – Stereophotogrammetrie

Die traditionelle Methode zur Erfassung 3-dimensionaler Geländeinformation und Erzeugung von Geländemodellen ist die Stereo-Photogrammetrie. Die Rekonstruktion von Objekten im Raum aus mindestens zwei sich überlappenden Aufnahmen erfordert sowohl die Identifikation des jeweiligen Objektpunktes in beiden Bildern als auch die Kenntnis der äußeren Orientierung der Luftbilder. Das Problem der äußeren Orientierung wird entweder über Passpunkte mittels Aerotriangulation gelöst oder erfolgt direkt mittels der GPS / IMU – Aufzeichnungen. Im Zuge einer manuellen Oberflächenrekonstruktion ist der menschliche Operateur erstaunlich gut in der Lage, idente Bildpunkte aufzufinden. Der Vorgang ist aber entsprechend zeit- und kostenintensiv. Die Automatisierung zur Generierung digitaler Geländemodelle durch Stereophotogrammetrie mit Hilfe digitaler Bildzuordnung (*image matching*) ist jedoch nicht unproblematisch und nur bedingt erfolgreich (Schenk, Csatho, 2002).
Vorteile der Photogrammetrie sind neben der hohen 2-dimensionalen räumlichen Auflösung der hohe visuelle Interpretationsgehalt der Luftbilder. Die stereoskopische Auswertung liefert eine deutlich bessere Lagegenauigkeit als Höhengenauigkeit, die Erfassung von Geländekanten, Einschnitten, Abbrüchen, Gipfel- und Muldenpunkten etc. ist im Gegensatz zu aus Laserscannerdaten erstellten Geländemodellen problemlos möglich.
Als passives Verfahren ist die Luftbildphotogrammetrie abhängig von guter Beleuchtung durch die Sonne: Wolken, Schattenwurf durch Wolken, künstliche und natürliche Objekte oder das Gelände selbst erschweren oder behindern die Auswertung.

Die Rekonstruktion von Oberflächen mittels der heute zur Verfügung stehenden Methode des Laserscanning erfolgt aus einer einzigen Aufnahme weitgehend automatisiert und damit kostengünstig. Essentiell ist hier nur die genaue Kenntnis von Lage und Orientierung der Aufnahmeplattform.
ALS zeichnet sich gegenüber der Photogrammetrie durch die Anwendbarkeit in Bereichen aus, in denen photogrammetrische Messungen nicht oder nur erschwert durchführbar sind:

- In Waldgebieten, in denen keine Sicht auf die Geländeoberfläche gegeben ist:

Ein einzigartiger Vorteil von ALS ist die Fähigkeit zur teilweisen Durchdringung der Vegetation, was die Erfassung des Bodens auch in bewaldeten Gebieten möglich macht.

Je nach Waldart (Laubwald, Nadelwald) und Jahreszeit dringen 30 - 65 % des Laserpulses bis zum Waldboden durch (Hoss, 1997). Das reicht aus, um durch Filterverfahren ein DTM bestimmen zu können, jedoch nimmt die Genauigkeit des Geländemodells mit zunehmender Vegetationsdichte aufgrund der geringer werdenden Anzahl von Laserimpulsen, die den Boden erreichen, ab. Bei niedriger Vegetation (< 1,5 m) erhält man immer nur die Vegetationsoberfläche, auch wenn ein Teil des Laserstrahls bis zum Boden vordringt – aufeinander folgende detektierte Impulse müssen nämlich einen gewissen Mindestabstand aufweisen (Kraus, 2005).

- In Gebieten, wo wegen Mangel an Textur keine Stereomessung möglich oder sehr erschwert ist (z. B. über Gletschergebieten, Schnee- oder Sandflächen)

Schwächen von ALS im Gegensatz zur Photogrammetrie sind die geringere räumliche Auflösung von rd. 0,5 - 1 m in der Lage (abhängig von der Punktdichte) und der fehlende visuelle Interpretationsgehalt. Es gibt keine direkte Information über Geländekanten, Bruchkanten werden aufgrund der quasi-zufälligen Verteilung der Bodenpunkte nur unzureichend dargestellt. Die Ergebnisse der Filterung der Daten für die DTM-Erzeugung sind je nach Geländetyp nicht immer perfekt, sie verlangen teilweise eine interaktive Nachbearbeitung – wobei aber dieser Aufwand nur einen Bruchteil dessen der stereoskopischen Auswertung von Luftbildern ausmacht. Mit zunehmender Punktdichte verbessert sich dieser Umstand natürlich, jedoch ist zur weiteren Steigerung der Qualität der Geländemodelle eine Rekonstruktion der Geländekanten notwendig.

Die Zuverlässigkeit der automatischen Auswertung stereoskopischer Luftbilder durch Bildzuordnungsverfahren ist deutlich geringer als die der aus Laserscannerdaten abgeleiteten Geländemodelle, ein höherer Nachbearbeitungsaufwand ist erforderlich. Die Automatisierung der Auswertung von ALS-Daten hat vor allem mit zwei Problemen zu kämpfen (Pfeifer, 2003): Bei fehlerhafter Erfassung des Flugpfades mit GPS und IMU entstehen systematische Fehler, die man z. B. im Überlappungsbereich benachbarter Streifen erkennen kann. Einen weiteren Beitrag leisten Fehler in der Kalibrierung des Entfernungsmessers (LRF, *laser range finder*), des Scanners sowie in der gegenseitigen Orientierung aller Komponenten.

Um das Potential des Laserscanning ausnützen zu können, sind qualifizierte Methoden zur Filterung der Laserdaten in Bodenpunkte – Nicht-Bodenpunkte einzusetzen. In der Praxis ist die Ableitung der Geländemodelle oft nicht so weit automatisiert wie es möglich und wünschenswert wäre.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass beide Verfahren ihre einzigartigen Vorzüge, aber auch Nachteile bei der Rekonstruktion der Topografie an den Tag legen. Die teilweise Unzulänglichkeit der einen

Methode lässt sich mit dem Vorteil der anderen kompensieren. Somit ergänzen sich Photogrammetrie und Laserscanning, eine Fusion beider Datensätze ist naheliegend.
Entsprechende Entwicklungen im Bereich der Sensorik tragen diesem Umstand Rechnung. Zunehmend werden hochauflösende digitale Kameras in Laserscannersystemen integriert. Die automatische Georeferenzierung durch GPS / IMU ermöglicht eine einfache Kombination und gemeinsame Nutzung von 3-dimensionaler Objektinformation aus Laserdaten mit der höheren geometrischen und spektralen Auflösung und der Texturinformation der Bilddaten.

3.2 Begriffsdefinitionen digitaler Modelle

Aus den gemessenen Rohdaten werden nach mehreren Verarbeitungsschritten verschiedene Modelle, die die Topografie beschreiben, abgeleitet. Zum Teil sind diese Modelle nur ein Zwischenprodukt auf dem Weg zu weiteren Anwendungen, wie z. B. der Gebäudedetektion. Dieses Kapitel soll einen Überblick über die gebräuchlichsten Begriffe geben.

● **DSM / DOM** (*digital surface model* / digitales Oberflächenmodell):
Dies ist die Fläche, die sich aus den vom Laserscanner registrierten Punkten mit der maximalen Höhe berechnet. Sie beschreibt die Erdoberfläche einschließlich Vegetation, Gebäuden und sonstigen Objekten. Im offenen Gelände ist das DSM gleich dem DTM (siehe unten), im Fall einer Verbauung mit Häusern verläuft die Fläche entlang der Dachflächen, bei Bäumen entlang der Baumkronen – einschließlich einer gewissen Generalisierung aufgrund der Größe des Lasersignals am Boden und der Punktdichte. Auch z. B. Stromleitungen und sogar Vögel im Ausbreitungsweg des Laserstrahls können ein Echo hervorrufen.

● **DEM / DHM** (*digital elevation model* / digitales Höhenmodell):
Das DEM ist die Menge der Höhenwerte regelmäßig oder unregelmäßig verteilter Geländepunkte (Stützpunkte), die die Höhenstruktur des Geländes als eine Funktion der Lage repräsentieren. Das Höhenmodell enthält keine Vegetation, Gebäude, etc.
Die Datenstruktur kann in Form eines regelmäßigen quadratischen Rasters (Gitterhöhenmodell) oder in Form eines TIN (*triangulated irregular network* – Dreiecksvermaschung) gegeben sein. Durch die eindeutige Zuordnung genau eines Höhenwertes zu jedem Punkt der Ebene besteht keine Mehrdeutigkeit in der Höhe, man spricht deshalb von einem 2,5D-Modell.

● **DTM / DGM** (*digital terrain model* / digitales Geländemodell):
Das DTM beschreibt – so wie ein DEM – die Höhe der Erdoberfläche. Allerdings ist der Begriff spezifischer, da explizit festgelegt wird, welche Höhen – nämlich die Geländehöhen – modelliert

werden. Ein DTM enthält auch (im Unterschied zum DEM) Geländekanten und Bruchlinien. Entsprechend sind die verwendeten Datenstrukturen ein hybrides Raster (Gitter mit zusätzlichen Linien) und eine Triangulierung. Ein Nachteil der Triangulierung ist, dass zufällige Messfehler direkt ins Geländemodell übernommen werden und durch die Punktanordnung lange, schmale Dreiecke entstehen können, die das Gelände schlecht beschreiben (Pfeifer, 2003).

● **nDSM** (*normalised digital surface model* / normiertes Oberflächenmodell):
Das nDSM ist das Differenzmodell zwischen DSM und DTM, es berechnet sich aus:

(2) **nDSM = DSM minus DTM**

Mit diesem Modell wird der Einfluss der Topografie ausgeschaltet. Alle erfassten 3D-Objekte (Häuser, Bäume, z. T. auch Fahrzeuge, etc.) werden mit ihrer lokalen Höhe über einer Referenzfläche mit dem Wert z = 0 dargestellt.

● **CHM** (*canopy height model* / Kronenmodell):
Das Kronenmodell findet Verwendung in forstwirtschaftlichen Aufgabenstellungen wie z. B. der Baumhöhenbestimmung. Es entspricht dem nDSM und berechnet sich ebenso wie das nDSM aus der Differenz zwischen DSM und DTM.

3.3 Filterung

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten sind keine Rohdaten, sondern durch Filterung bzw. Interpolation vorverarbeitete Daten. Aus diesem Grund soll im Folgenden kurz auf die Besonderheiten der Filterung eingegangen werden. Bei der Filterung der Laserdaten handelt es sich um Methoden, die anhand der Höhenverteilung innerhalb eines gewissen Fensters die Laserdaten der Erdoberfläche (Bodenpunkte) oder aber Objekten auf der Oberfläche (Nicht-Bodenpunkte, das sind Punkte auf Gebäuden, Vegetation, Brücken, etc.) zuordnen. Grundlegende Annahme aller Verfahren zur Ableitung eines Geländemodells aus Laserscanneraufnahmen ist der Umstand, dass in den Daten sowohl Objekt- als auch Bodenpunkte vorliegen.

3.3.1 Überblick über bestehende Ansätze zur DTM-Berechnung

- **Morphologische Filterung**

Morphologische Filter (Formfilter) arbeiten mit einem Strukturelement, das die Geländehöhenunterschiede in Abhängigkeit von der Entfernung beschreibt. Je größer die horizontale Entfernung, umso größer darf der Höhenunterschied zwischen den Bodenpunkten sein. Das Strukturelement kann über Annahmen über die Geländeneigung (z. B. max. 30 %) oder mit Hilfe von Trainingsdatensätzen für einen bestimmten Geländetyp bestimmt werden. Für die Filterung wird das Strukturelement vertikal von unterhalb der Punktmenge nach oben verschoben. Dazu wird es planimetrisch auf jedem Punkt zentriert und wandert nach oben, bis es an einem Punkt innerhalb des Umkreises „hängen bleibt" und die Verschiebung gestoppt wird. Ist dieser Punkt nicht das Zentrum, also der Punkt, auf dem das Strukturelement zentriert wurde, so ist der untersuchte Punkt kein Geländepunkt. Auf diese Weise wird die gesamte Punktwolke klassifiziert.

- **Progressive TIN-Verdichtung**

Der erste Schritt ist die Bildung eines TIN (*Triangulated Irregular* Network, Dreiecksvermaschung) auf Basis weniger, sicherer Bodenpunkte. Diese Bodenpunkte erhält man durch Einteilung des gesamten Gebietes in große Bereiche, in jedem dieser Bereiche wird der niedrigste Punkt ausgewählt, diese Punkte werden zu einem Dreiecksnetz verbunden. Für jedes Dreieck wird aus den innerhalb liegenden Punkten ein weiterer Bodenpunkt gesucht. Dazu werden der Reihe nach die Abstände der Punkte zu den Dreieckspunkten ermittelt sowie die Winkel der Verbindungen zu den Eckpunkten. Liegen diese Werte unter bestimmten Schwellen, so wird der Punkt als Bodenpunkt akzeptiert. Auf diese Weise wird das Dreiecksnetz schrittweise verdichtet.

- **Robuste Interpolation**

Zunächst wird aus der Punktwolke mittels linearer Prädiktion, siehe z. B. (Kraus, 2000), eine approximierende Oberfläche berechnet. Dabei wird die Geländehöhe nach Abspaltung eines Trends als stochastischer Prozess angenommen. Der wichtigste Parameter zur Bestimmung von Interpolationswerten aus den reduzierten Höhen (z_i) ist die Kovarianzfunktion, die den distanzabhängigen Einfluss der reduzierten Höhen aufeinander wiedergibt. Sie kann empirisch aus dem jeweiligen Datensatz bestimmt werden und besitzt meist die Form einer Glockenkurve. Die Kovarianzfunktion bewirkt, dass sehr nahe Werte einen großen, weiter entfernte Werte einen geringeren Einfluss auf den Interpolationspunkt haben. Bei der robusten Interpolation wird die ursprüngliche Punktwolke mit der approximierenden Oberfläche verglichen. Punkten, die unterhalb oder im Bereich dieser Fläche liegen, wird ein hohes Gewicht zugewiesen, weil es sich dabei vermutlich um Bodenpunkte handelt. Sich oberhalb befindliche Punkte stellen meist Objektpunkte dar und werden gering gewichtet. Unter Verwendung der Gewichte wird wiederum eine approximierende

Oberfläche berechnet, die sich den Bodenpunkten nun besser anpasst. Daraufhin wird die Oberfläche wiederum mit der ursprünglichen Punktwolke verglichen, die Punkte werden neu gewichtet. Dieser Prozess wird iterativ durchgeführt, bis ein akzeptables Ergebnis erzielt wird.
Eine Voraussetzung für die robuste Interpolation ist eine ausreichende Durchmischung von Boden- und Nicht-Bodenpunkten. In dicht bebautem Gebiet, wo viele Punkte auf Hausdächern liegen, ist dies nicht der Fall.

Eine Erweiterung obiger Methode ist die **hierarchische robuste Filterung**. Diese Methode ist in der Software SCOP++ (Inpho, Deutschland und IPF, TU Wien) implementiert (Briese, Pfeifer, Dorninger, 2002). Robuste Verfahren sind unempfindlich gegenüber groben Fehlern, was bei der Methode der kleinsten Quadrate nicht gegeben ist. Der hierarchische Ansatz arbeitet mit Datenpyramiden. Die verschiedenen Niveaus der Pyramiden stellen die Daten in verschiedener Auflösung (Generalisierung) dar. Ermöglicht wird damit eine Modellbildung vom Groben ins Feine. Dieser Prozess kann folgendermaßen beschrieben werden:

1. Ausdünnen der Daten: ein Datensatz mit grober Auflösung wird erstellt
2. Berechnung eines DTM aus den ausgedünnten Daten mit Robuster Filterung
3. Vergleich des berechneten DTM mit dem Originaldatensatz: Originalpunkte innerhalb eines bestimmten Toleranzbandes werden für die weitere Modellierung akzeptiert

- **Vergleich der Filtermethoden**

Die morphologische Filterung und die progressive TIN-Verdichtung sind Methoden, die Annahmen über das Gelände verwenden (in Form des Strukturelements bzw. anhand von Kriterien für die Dreiecksverdichtung). Solche Annahmen sind auch in der robusten Interpolation enthalten (Kovarianzfunktion), zusätzlich wird hier aber durch die Gewichtsfunktion für die Verbesserungen auch Information über die Verteilung der Nicht-Bodenpunkte eingebracht. Entsprechend gibt es auch Filtermethoden, die in erster Linie die vertikale Verteilung der Boden- und Hochpunkte berücksichtigen und nur wenig Geländeinformation verwenden. In vielen Methoden kann eine implizite Annahme von horizontalem Gelände gefunden werden. Die Methoden der TIN-Verdichtung erfassen den Trend des Geländes deutlich besser, die robuste Filterung modelliert das Gelände als eine Fläche bereits explizit. Ein Vergleich einiger Filtermethoden mit Testdatensätzen wird in (Sithole, Vosselman, 2003) beschrieben.

- **Beispiele für Probleme bei der Filterung**

- Große Datenlücken nach der Filterung können für Interpolationsprobleme sorgen. Datenlücken können z. B. bei Wasserflächen, großflächigen Industriegebäuden oder dichtem Wald entstehen
- Die korrekte Filterung von lokalen Höhensprüngen, wie z. B. Felsabbrüchen in Waldgebieten oder stark zerklüftetem Terrain, ist schwierig. Es gibt jedoch Ansätze, die geomorphologisch

relevante Strukturen im DTM modellieren (Kraus und Pfeifer, 2001). Voraussetzung dafür ist, dass die Lage dieser Strukturen genähert bekannt ist.

- Die Filterung von z. B. Brückenbauwerken erfolgt z. T. unvollständig und inhomogen.

- **Das Softwarepaket SCOP++**

Die Berechnung und Klassifizierung der in dieser Arbeit verwendeten Gelände- bzw. Oberflächenmodelle erfolgte mit der am IPF entwickelten und im Softwarepaket SCOP++ implementierten hierarchischen robusten Interpolation. Siehe auch (Briese et al., 2002).

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

4. Anwendungsgebiete von Laserscannerdaten

Die Entwicklungen im flugzeuggetragenen Laserscanning ermöglichten die Erschließung neuer Marktsegmente für die Photogrammetrie. Neben der „Standardanwendung“, der Generierung von hochwertigen 3D-Gelände – und Oberflächenmodellen, sind dies u. a. folgende Anwendungsgebiete:

- (automatische) Generierung von 3D-Gebäudemodellen, z. B. als Bestandteil von 3D-Stadtmodellen oder Topografischen Informationssystemen

- Werkzeug in der Kartennachführung (*map update*)

- Erfassung von Überschwemmungsgebieten, Hochwasserschutz: Hochgenaue digitale Geländemodelle sind als Grundlage für hydraulische Ermittlungen überflutungsgefährdeter Bereiche und Risikoanalysen unerlässlich: Erstellung von Planungsgrundlagen für den Katastrophenschutz, Erstellung von Hochwassergefahrenkarten, Bestimmung von Überflutungsgebieten, etc.

- Forstwirtschaft / Forstinventur: Bestimmung charakteristischer Parameter wie Baumhöhen, Wachstum oder Biomasse (siehe Kapitel 6.2), (Abb. 4-1).

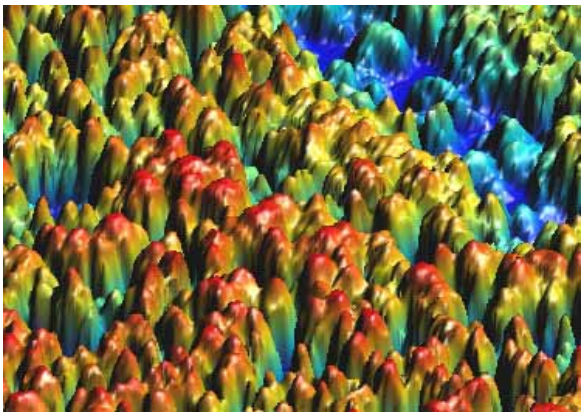

Abb. 4-1: Perspektive eines Kronenmodells (TopoSys)

- Überwachung von Hochspannungsleitungen und Trassen (*corridor mapping*): Dabei geht es um die Akquisition von Daten entlang von korridorförmigen Objekten wie beispielsweise Bahntrassen, Straßen oder Hochspannungsleitungen. Aufgrund der schmalen Streifenbreite können hier kompakte Systeme mit geringer Laserleistung in niedriger Flughöhe im Helikopter eingesetzt werden (Maas, 2005).

- Aufnahme von Gletschern und polaren Eiskappen - in Gebieten, wo wegen Mangel an Textur in den Luftbildern keine Stereomessung vorgenommen werden kann oder sehr schwierig ist.

- Aufnahme von Küstengebieten, Küstenschutz (d. h. in Gebieten, wo eine Aerotriangulation nur schwer durchführbar ist).

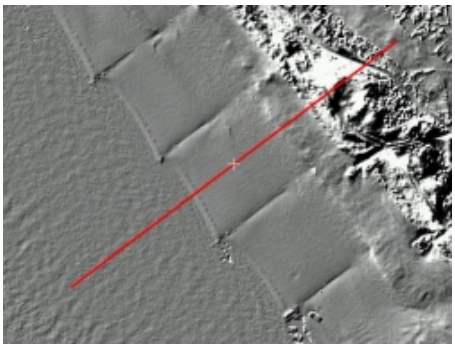

Abb. 4-2: Reliefbild Küstenabschnitt Niederlande © Aerodata Internat. Surveys, Belgien

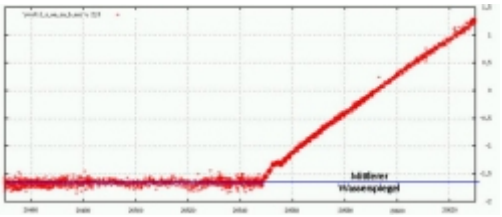

Abb. 4-3: Profilschnitt am Wasser-Land-Übergang (TopoSys)

Die Bestimmung der Wasser-Land-Grenze ist aufgrund der unterschiedlichen Texturen von Wasser und Bodenoberfläche möglich (Abb. 4-2, 4-3). Mit Hilfe der Laserdaten können raue Wasseroberflächen von glatten Sandflächen präzise abgegrenzt werden (TopoSys, 2006).

- Archäologie: Das Aufspüren und Erfassen historischer Fundstätten ist Grundlage aller archäologischer Forschung. Die Dokumentation von Ausgrabungen und Denkmälern ist eine wichtige, mit herkömmlicher Feldarbeit sehr zeitintensive Tätigkeit. Flugzeug-Laserscanning hat im Vergleich zu anderen Messverfahren den Vorteil der schnellen und großräumigen Erfassung archäologisch interessanter Stätten mit hoher Genauigkeit. Auch kleinste Geländeerhöhungen und Strukturen, die vom Boden aus nicht direkt erkennbar sind, werden erfasst und lassen sich in 3D-Darstellungen und Reliefbildern visualisieren (Abb. 4-4).

Abb. 4-4: Farbkodiertes Höhenmodell Römisches Legionslager Carnuntum, Österreich (TopoSys) © Wasserstraßendirektion Wien, Österreich

- Naturschutz: Bestandsaufnahme schützenswerter Gebiete, Dokumentation von Veränderungen – auch in schwer zugänglichen Bereichen (Moore,…)

- *dasymetric mapping*:

  Demografische Daten sind eine wichtige Grundlage für verschiedene Planungszwecke, Geomarketing etc. Besonders im Katastrophenmanagement (Hochwasser, Erdbeben) spielt das Wissen über die genaue Bevölkerungsverteilung eine entscheidende Rolle.

  Das Problem bei derartigen Zähldaten ist, dass zumeist viel zu großflächige und heterogene Erhebungseinheiten erhältlich sind. Zum Teil vermitteln auch widersprüchliche Grenzen einen falschen Eindruck von der tatsächlichen räumlichen Bevölkerungsverteilung. Dasymetrische Methoden versuchen diese Daten zu verfeinern und in kleinere, homogene Gebiete aufzuschlüsseln (Abb. 4-5).

  Erreicht werden kann diese realistischere Repräsentation durch die Integration von Fernerkundungs- und Laserscannerdaten: aus den Luft- bzw. Satellitenbildern lässt sich die Landnutzung ableiten, die Lidardaten ermöglichen eine einfache Gebäudedetektion bzw. zusätzlich eine Bestimmung der Gebäudehöhen, aus denen sich Stockwerkszahlen ableiten lassen, welche wiederum eine Abschätzung der Bewohnerzahlen ermöglichen.

  Das Ergebnis beim *dasymetric mapping* ist somit eine verfeinerte Modellierung der tatsächlich besiedelten Gebiete (Hofstee, Islam, 2004), (Weichselbaum et al., 2005).

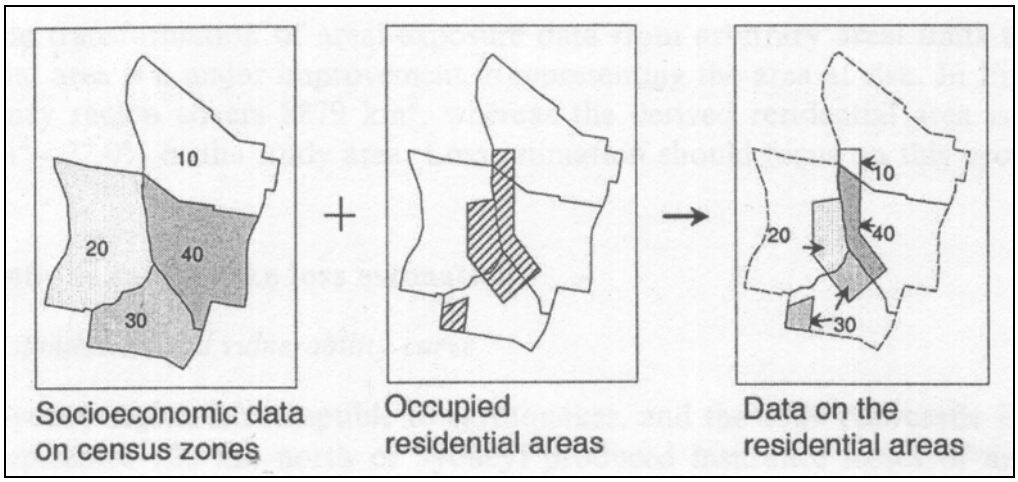

Abb. 4-5: Prinzip des *dasymetric mapping* (Chen et al., 2004)

4.1 Erstellung von (einfachen) Oberflächenmodellen und Geländemodellen

- **Oberflächenmodelle / DSMs**

Oberflächenmodelle beschreiben neben der Geometrie des Geländes auch die darauf befindlichen Objekte wie Bäume, Gebäude und sonstige natürliche und anthropogene Objekte. Somit enthält das DSM implizit auch Informationen über die lokalen Höhen von Objekten über der Geländeoberfläche. Bei der Erstellung der verschiedenen Oberflächenmodelle spielt der Messmodus eine Rolle: Je nach verwendetem Modus (*first pulse, last pulse*) erhält man entsprechend eine Fläche, die entweder den Baumkronen oder dem Boden näher ist. Speziell für die Datenerfassung in Bereichen mit Vegetation kann zusätzliche Information in Form des ersten und letzten gemessenen Impulses genutzt werden: In den *first pulse* – Daten sind Bäume und Büsche enthalten, in den *last pulse* – Daten kommen sie praktisch nicht mehr vor.

Für ein einfaches Oberflächenmodell oder ein Baumkronenmodell zur Darstellung der Kronenoberfläche werden die mit *first pulse* - registrierten Daten herangezogen. Für Modelle im Stadtgebiet lassen sich z. B. mittels Triangulierung oder Flächeninterpolation der *first pulse* – Originaldaten einfache Dachflächenmodelle beschreiben. Das Haus wird als Objekt behandelt, die Dachfläche nicht detaillierter analysiert. Einzelstehende Objekte wie Bäume, Büsche, Autos, Straßenlaternen etc. werden, je nach Punktdichte, von einem oder mehreren Punkten erfasst, bei geringer Dichte unter Umständen aber auch gar nicht (Abb. 4-6).

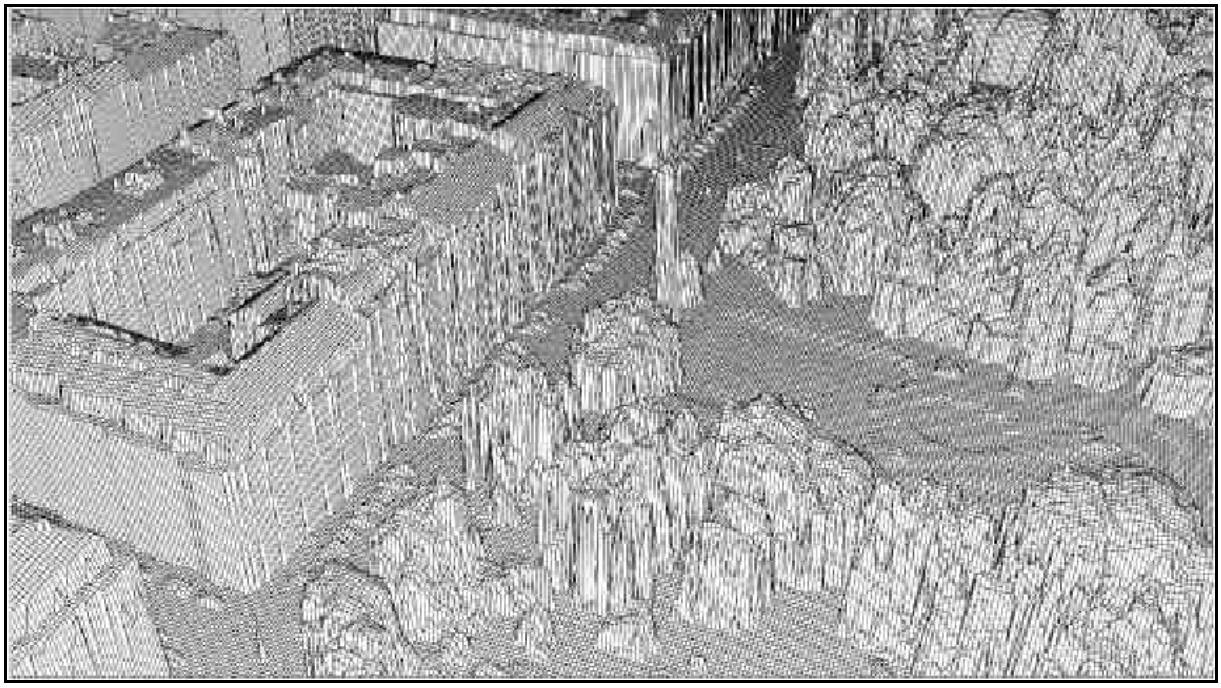

Abb. 4-6: Perspektive eines Oberflächenmodells mit einem 0.5 m – Raster (Briese et al., 2001)

Ist die Punktdichte einer Laserbefliegung ausreichend hoch, lassen sich auch viel detailliertere Modelle ableiten, wie z. B. Einzelbaummodelle oder Stadtmodelle, bei denen die Dächer aus einzelnen ebenen Flächen zusammengesetzt werden. Welche Flächen nun genau die Oberflächenmodelle repräsentieren, hängt neben dem Messmodus auch vom Zeitpunkt der Befliegung ab: Vegetationszustand, Laubdichte bzw. im Winter das Fehlen von Laub, Reifegrad von Getreidefeldern etc. verändern sowohl die *first* – als auch die *last pulse* – Daten.

- **Geländemodelle (DTMs)**

ALS war ursprünglich ein neues Verfahren zur Generierung räumlich hochauflösender digitaler Oberflächen- und Geländemodelle, es bot die einzigartige Möglichkeit der Erstellung von DTMs in bewaldeten Gebieten. Als Durchdringungsrate wird in Waldgebieten und Vegetationsbeständen das Verhältnis zwischen der Punktzahl auf dem Boden und der Gesamtzahl der gemessenen Punkte bezeichnet. Sie ist abhängig von der Flughöhe, dem Neigungswinkel, der Vegetationsdichte, der Jahreszeit, dem Vegetationstyp etc. Empirische Untersuchungen haben Durchdringungsraten zwischen 31 % und 64 % ergeben (Kraus et al., 1997). Die gemessene 3D-Punktwolke enthält vorerst alle Punkte, die auf und über der aufgenommenen Oberfläche liegen. Für die DTM-Erzeugung sind nur die Bodenpunkte relevant, die auf Objekten liegenden Punkte (Nicht-Bodenpunkte) müssen über einen Filterprozess von den Bodenpunkten getrennt werden (Abb. 4-7).

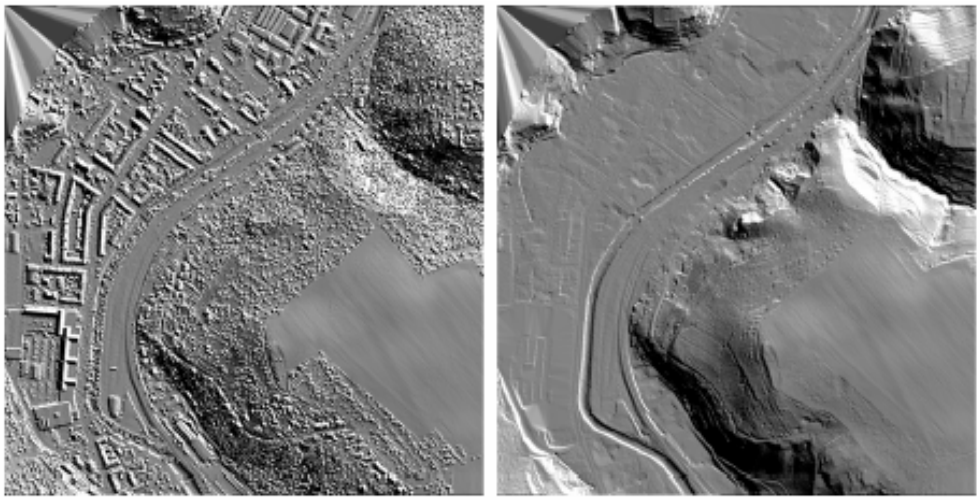

Abb. 4-7: Laserscannerdaten vor und nach der Filterung (Maas, 2005)
© Landestalsperrenverband Sachsen

4.2 Anwendungen in der Forstwirtschaft

Eine große Rolle spielt hier das Kronenmodell (CHM, *canopy height model*), das sich durch Subtraktion des DTM der *last pulse* – Echos vom entsprechenden Kronen – DSM der *first pulse* – Reflexionen an den Baumwipfeln berechnet (Hyyppae et al., 2004).

Die Realität entspricht allerdings nicht immer der idealisierten Vorstellung: Fehler im DTM / DSM übertragen sich unmittelbar auf die Baumhöhen. Je nach Baumart und Kronendichte dringt ein größerer oder kleinerer Teil der Laserpulse bis zum Boden durch. Zusätzlich gibt es am Stamm und unterhalb der Baumkrone Reflexionen, die herausgefiltert werden müssen, aber das wiederum unter der Annahme von Vorwissen über Geländeform und Geländeneigung.
Eine weitere Einschränkung ist die, dass das Verhältnis zwischen mittlerem Punktabstand (rd. 1 m) und Durchmesser des Laserpulses am Boden (rd. 25 cm) bewirkt, dass nicht immer der höchste Punkt der Krone getroffen wird, und sich somit tendenziell zu niedrige Baumhöhen ergeben.

Über forstwirtschaftliche Berechnungsmodelle lassen sich aus solchen Baumhöhendaten, kombiniert mit Wissen über Alter und Art der Bestände, das Holzvolumen und die Biomasse des gesamten Standes bestimmen. Darüber hinaus sind Abschätzungen und Prognosen über Wachstum und Zunahme des Holzvolumens sowie die Überwachung von Schlägerungen durch Befliegungen in regelmäßigen Zeitabständen möglich. Besonderes Interesse gilt der Wirksamkeit von Forstbeständen als CO_2-Speicher.

4.3 Detektion und Modellierung von 3D-Gebäudemodellen

ALS ist eine wertvolle Datenquelle für die Detektion und Modellierung von 3D-Gebäudemodellen, z. B. als Bestandteil von 3D-Stadtmodellen. Gebäudemodelle sind ein wesentlicher Aspekt von Stadtmodellen. Unter einem 3D-Stadtmodell versteht man i. a. das Modell von Gebäuden eines besiedelten Gebietes. Zur Stadtlandschaft gehören neben den Gebäuden auch die Verkehrswege, die Vegetation, Infrastruktureinrichtungen usw.

Das Interesse an Stadtmodellen ist in den letzten Jahren stark gestiegen, sie sind ein wichtiges und attraktives Produkt von Photogrammetrie und Fernerkundung geworden. Die primäre Verwendung von ALS-Daten zur Gebäudeextraktion (deren ursprüngliche Anwendung hauptsächlich im Bereich der Modellierung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen für die Planung von Mobilfunknetzen gesehen wurde), ist seit einigen Jahren Gegenstand intensiver Forschung. Der Vorteil von Laserscanning liegt im hohen potentiellen Automatisierungsgrad, rein photogrammetrische Verfahren sind zu wenig automatisierbar.

Weitere Aufgabenstellungen und Applikationen im Zusammenhang mit der Detektion und Modellierung von Gebäuden sind u. a.:

- Erfassung des besiedelten Raumes, Beurteilung von Veränderungen
- Bestandsaufnahme von versiegelten / nicht versiegelten Flächen

- Schallausbreitung, Lärmschutz
- Kataster
- Optimierung von Rettungseinsätzen
- Modellierung und Vorhersage von Naturereignissen
- Umweltschutz, Planung, Überwachung
- 3D – Fahrzeugnavigation
- VR – Modelle, Visualisierungen für touristische Zwecke

Die allgemeine Entwicklung geht in Richtung einer mobilen, ortsbezogenen Verfügbarkeit räumlicher Informationen für jedermann, sog. „*location based services*“ und „*augmented reality*“. Bereits heute sind viele dieser Möglichkeiten ansatzweise realisiert oder absehbar. Aufgrund des damit in naher Zukunft entstehenden breiten Marktes ist es eine dringliche Aufgabe, die benötigten Daten zu erfassen und zeitnah fortzuführen. Dies ist wirtschaftlich nur durch weitgehend automatisierte Verfahren zu leisten (Brenner, 2002).

Aufgabe der Forschung im Zusammenhang mit Stadtmodellen ist die Ausarbeitung geeigneter Erfassungsmethoden und Modellierungsverfahren. Halbautomatische Verfahren sind heute bereits im Einsatz, allerdings ist bei komplexen Siedlungsstrukturen sehr viel manueller Aufwand nötig. Der Grund liegt vor allem in der geringen Zuverlässigkeit der Ergebnisse, sobald die Szene komplex ist bzw. ein einigermaßen hoher Detaillierungsgrad gefordert ist (Jansa, Stanek, 2003). Für weiterführende Informationen wird u. a. auf (Hu, You, Neumann, Park, 2004) verwiesen.

4.3.1 Erfassungstechniken und -Verfahren

Gebäudemodelle können durch unterschiedliche Erfassungstechniken und Verfahren gewonnen und modelliert werden. Prinzipiell kann man bei der Datenerfassung unterscheiden zwischen (Brenner, 2002)

- terrestrischer Datenerfassung
- luft- oder satellitengestützter Datenerfassung
- Ableitung aus bestehenden Geoinformationsquellen

Für die Gebäudedetektion und -auswertung kommen verschiedenste Ansätze bzw. Kombinationen zur Anwendung:

- photogrammetrische Auswertung von Stereobildern, z. B. (Suveg, Vosselman, 2004)
- Kombination von Lidar mit terrestrischen Methoden, z. B. (Brenner, Dold, Jülge, 2003)

● Verwendung von GIS-Daten: bestehende Geodaten können zur Ableitung von Gebäudemodellen herangezogen werden, wie etwa zur Bildung 3-dimensionaler Körper aus Grundrissen in Verbindung mit Höhen oder Stockwerksangaben, wenn die Anforderungen an die Detaillierung etc. gering sind.
● Methoden, die auf der Basis von ALS arbeiten: mit oder ohne Einbeziehung zusätzlicher Datenquellen wie Luftbilder, Satellitenaufnahmen oder eine Verknüpfung mit bestehenden GIS-Daten.

● Gebäudedetektion aus Lidar-Daten

Im Laufe der letzten Jahre wurden eine Reihe von Methoden zur (automatischen) Detektion und Erzeugung von Geländemodellen aus hochauflösenden ALS-Daten entwickelt. Ein Teil der Verfahren verwendet die „rohe" Punktwolke, wodurch Interpolationseffekte vermieden werden, ein anderer Teil basiert auf der Interpolation der Originaldaten auf einen regelmäßigen Raster, meist mit dem Ziel der Nutzung bestehender Bildverarbeitungsprogramme. Durch die Interpolation kann jedoch wertvolle Information verloren gehen.

Der Arbeitsablauf im Zuge der Gebäudedetektion kann im Groben folgendermaßen aussehen:
Um den Einfluss der Topografie auszuschalten, wird zunächst aus DSM und DTM durch Differenzbildung ein normiertes Oberflächenmodell (nDSM) berechnet. Es stellt sämtliche auf dem Gelände befindliche 3D-Objekte mit ihren lokalen Höhen über einer Referenzfläche mit Höhe z = 0 dar. Gelegentlich können im nDSM noch Geländeteile enthalten sein, die bei der DTM-Erzeugung nur unzureichend modelliert worden sind, wie etwa scharfe Geländekanten oder -abbrüche, Brückenbauwerke, grobe Steine, etc. Eine Analyse der Höhen der im nDSM enthaltnenen Objekte mittels eines Schwellenwertes (*height threshold,* z. B. 2,5 m) erlaubt sehr einfach eine erste Trennung des Datensatzes in Bodenpunkte und Hochpunkte, die sich aus Gebäuden bzw. Vegetation zusammensetzen. Der für die Gebäudedetektion notwendige nächste Schritt ist die Trennung der Hochpunkte in Gebäude und Vegetation, um so die potentiellen Gebäudekandidaten zu erhalten. Die detektierten Gebäude können anschließend in einer sog. „*building mask*" ausgewiesen werden. Diese enthält die detektierten Gebäudeflächen, sowohl in Form einzelstehender Gebäude oder auch in Form ganzer Häuserblocks im Stadtgebiet.

● Gebäudedetektion aus Lidar-Daten & Luftbildern

Die Laserscannerdaten ermöglichen zunächst eine einfache Lokalisierung der Gebäude. Die hochauflösenden Luftbilder / Orthophotos stellen Farb- und Texturinformationen zur Verfügung, die in den Lidar-Daten nicht enthalten sind. Zusätzlich liefern sie weitere Möglichkeiten der Merkmalsbeschreibung zur Trennung der verschiedenen Objektklassen.
Nach der initialen Detektion der potentiellen Gebäudeflächen (*building regions*) bietet das Luftbild ein weiteres Genauigkeits- und Vollständigkeitspotential zur Ergänzung oder Verbesserung der

Dachflächen, wo Lidar aufgrund der zu geringen Punktdichte keine vergleichbaren exakten Umrisse liefern kann. Wesentliche Strukturen, wie z. B. Gebäudeumrisse, sind in den Luftbildern gut ersichtlich, sie lassen sich im Zuge einer Gebäuderekonstruktion und Visualisierung zur Verbesserung einsetzen.

Im Zuge einer visuellen Beurteilung des Interpretationsergebnisses lassen sich Fehler der Lidar-Modelle auffinden, indem die detektierten Gebäude bzw. die Gebäudeumrisse auf die Bilder projiziert werden. Die Kombination von ALS-Daten mit Luftbildern kann somit einerseits helfen, den Automatisierungsgrad der Auswertung zu erhöhen, andererseits das in den hochauflösenden Bildern enthaltene Detaillierungs- und Genauigkeitspotential nutzen. Wichtig ist die Georeferenzierung der verschiedenen Datenquellen. Auch ist es von Vorteil, wenn die Daten möglichst zum gleichen Zeitpunkt aufgenommen worden sind.

● Gebäudedetektion aus Lidar- & GIS-Daten

Die Kombination von Laserscanning mit bestehenden GIS-Daten ist ein weit verbreiteter Ansatz. Aus den GIS-Daten wird zumeist der Grundriß der Gebäude verwendet – die Grundrisspläne bieten genaue Gebäudeumrisse. Bei der Nutzung eines Grundrissplans ist die Automatisierung weit fortgeschritten, sofern einfache Siedlungsstrukturen vorliegen (d. h. Einzelbauten, einfache Dachlandschaften, wenig Vegetation) (Jansa, Stanek, 2003).

4.3.2 Rekonstruktion und Modellierung

Die Weiterführung einer Gebäudedetektion wären die geometrische Rekonstruktion und die Modellierung der Gebäude. Für eine Gebäudemodellierung rein aus Laserscannerdaten gibt es zwei Ansätze, die ohne zusätzliche Informationen auskommen, sie liefern eine vollständige 3D-Beschreibung:

- ***model – based reconstruction / parametric building models***

  Hier wird versucht, ein synthetisches Gebäudemodell durch eine kleinere Anzahl variabler Parameter bestmöglich in die Punktwolke einzupassen. Die Modelle basieren auf einer Anzahl fix vorgegebener Gebäudekategorien. Die Gebäudemodelle, die erzeugt werden können, haben nur einfache Formen.

- ***data – driven reconstruction / non - parametric building models***

  Es wird hierbei versucht, in der Punktwolke einzelne Dachflächen zu detektieren, abzugrenzen und zu gruppieren, um daraus komplette 3D-Modelle abzuleiten. Es gibt keine geometrischen Einschränkungen (Hofmann, 2004), (Crosilla et al., 2005).

Die Darstellung exakter Gebäudekanten bzw. Details der Dachlandschaft ausschließlich aus Laserscannerdaten ist mit der üblichen Punktdichte von rd. 1 Punkt pro m² nicht zufrieden stellend möglich.

4.3.3 EuroSDR Comparison - Studie zur Genauigkeit von 3D-Stadtmodellen

Ziel dieser Studie, beschrieben in (Kaartinen et al., 2005), waren die Evaluierung von Qualität, Genauigkeit und Machbarkeit sowie ökonomische Aspekte einer

- semi-automatischen Gebäudeextraktion, basierend auf photogrammetrischen Techniken (Stereophotogrammetrie)
- semi-automatischen und automatischen Gebäudeextraktion auf der Grundlage von Laserscannerdaten
- semi-automatischen und automatischen Gebäudeextraktion, basierend auf der Integration von Laserscannerdaten und Luftbildern

Den Teilnehmern standen drei Testgebiete (Stadt - Wohngebiet mit wenigen Bäumen - bewegtes Gelände mit viel Vegetation und verschiedenartiger Bebauung) in und um Helsinki zur Verfügung. Die Daten umfassten:

- Luftbilder (Stereopaar) inkl. Informationen zur Kalibrierung, Orientierung etc.
- Laserscannerdaten
- Katasterdaten – Gebäudeumrisse

Die Testgebiete wurden mit verschiedenen Laserscanner-Systemen und unterschiedlicher Punktdichte beflogen (Tabelle 4-1, 4-2).

	Espoonlahti	Hermanni	Senaatti
Acquisition	14. May 2003	June 2002	14. June 2000
Scanner	TopoSys II	TopEye	TopoSys I
Flight altitude	400 m	200 m	800 m
PRF	83 000 Hz	7 000 Hz	83 000 Hz
Scann. angles	± 7.15 °	± 20 °	± 7.1 °
Point density	10-20 per m^2	7-9 per m^2	1.6 per m^2
Swath width	100 m	Ab. 130 m	Ab. 200m
Mode	First pulse	2 pulses	First Pulse

Tabelle 4-1: Laserscandaten (Kaartinen et al., 2005)

	Espoonlahti	Hermanni	Senaatti
Date	26. June 2003	4. May 2001	24. April 2002
Camera	RC-30	RC-30	RC-30
Lens	15/4 UAG-S, no 13355	15/4 UAG-S, no 13260	15/4 UAG-S, no 13260
Calib. date	22. Nov. 2002	18. Jan. 2000	14. April 2002
Altit., scale	860 m, 1:5300	670 m, 1:4000	660 m, 1:4000
Pixel size	14 microns	15 microns	14 microns

Tabelle 4-2: Verwendete Luftbilder (Kaartinen et al., 2005)

Die Teilnehmer wurden gebeten, 3D-Stadtmodelle in Vektorform zu erzeugen. Die Methode bzw. Kombination der zur Verfügung gestellten Daten war freigestellt. Der Schwerpunkt des Projekts lag auf dem Vergleich der Genauigkeiten der verschiedenen Methoden. Referenzdaten wurden tachymetrisch bestimmt (Hausecken, Dachkanten…).

Participant	Used data			Level of automation
	Laser data	Aerial images	Ground plan	
Cybercity		100		low
Hamburg		100		low
Stuttgart		100		low-high
IGN	50	50		medium
ICC laser+aerial	80	20		low
ICC laser	100			low
Nebel+Partner	90	10		high
FOI	100			high
FOI outlines	100		X	high
C+B Technik	100		X	high
Delft	100		X	medium
Aalborg	100		X	high
Dresden	100		X	high

Tabelle 4-3: Zusammenstellung der Daten und Automatisierungsgrad (Kaartinen et al., 2005)

Ergebnisse

Zum Vergleich der Ergebnisse muss angemerkt werden, dass neben den unterschiedlichen Methoden auch die Erfahrung des Operateurs bzw. die Vollständigkeit der eingesetzten Prozedur eine Rolle spielten. Von Universitäten entwickelte Verfahren waren eher Demonstrationen der Technologie als fertig ausgereifte Produktlösungen.

Bei der Auswertung zeigte sich, dass photogrammetrische Methoden grundsätzlich besser für die Bestimmung von Gebäudeumrissen geeignet sind, während Laserscanning das geeignetere Verfahren zur Bestimmung von Gebäudehöhen ist. Hauptursachen für die z. T. erheblichen Unterschiede in der Lagegenauigkeit bei der Gebäudeextraktion aus Laserdaten waren die unterschiedliche Punktdichte, Komplexität der Szene und Überdeckung durch Bäume. Bei der Bestimmung der Gebäudehöhen stieg die Genauigkeit linear mit zunehmender Punktdichte (Abb. 4-8).

Der Grad der Automatisierung variierte signifikant zwischen den unterschiedlichen Methoden (Tabelle 4-3). Die potentielle Automatisierungsfreundlichkeit der Laserscannerdaten bestätigte sich. Einige der Modelle waren weitgehend automatisch erstellt worden, der höhere Automatisierungsgrad beeinflusste jedoch die (Lage-) Genauigkeit. Während die erreichte Genauigkeit bei Methoden mit niedrigem Automatisierungsgrad zwischen 20 - 30 cm lag, betrug die Genauigkeit bei hoher Automatisierung 60 bis 100 cm (Abb. 4-9).

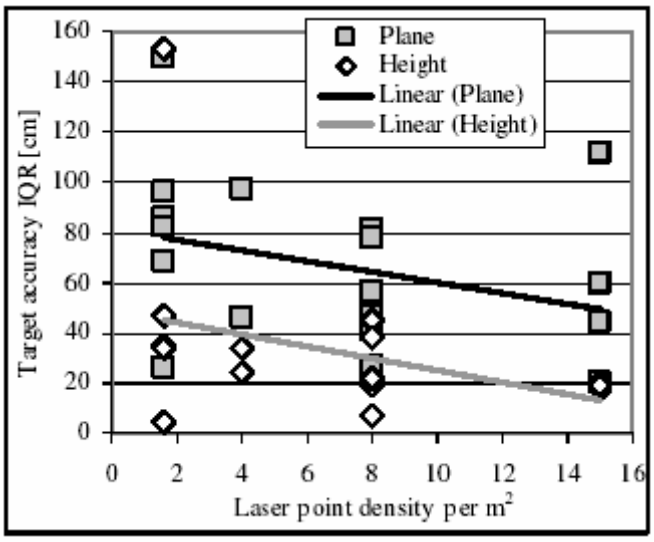

Abb. 4-8: Durchschnittliche Genauigkeit vs. Punktdichte (Kaartinen et al., 2005)

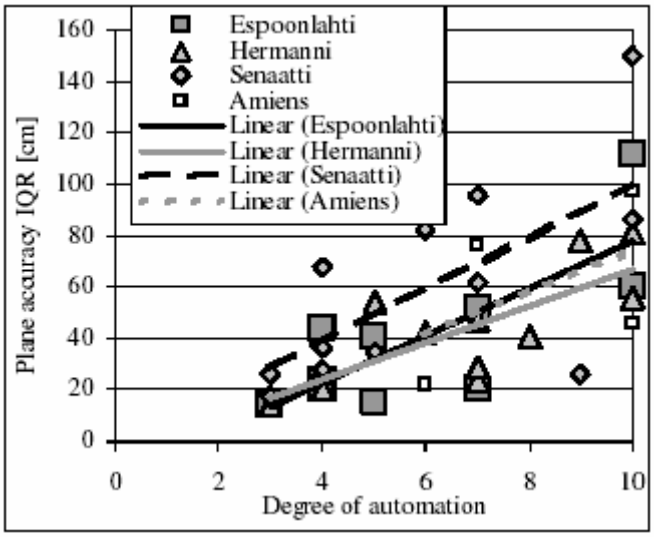

Abb. 4-9: Automatisierungsgrad vs. Lagengenauigkeit (Kaartinen et al., 2005)

Die Höhengenauigkeit scheint unabhängig vom Grad der Automatisierung zu sein, sie folgte genau der Punktdichte. Zusammenfassend wurde in der Studie bestätigt, dass die Qualität der Gebäudeextraktion aus Laserdaten durch den Einsatz hochauflösender Luftbilder oder bestehende Katasterinformationen verbessert werden kann.

5. Bildanalyse

5.1 Klassifikation

Bei der Interpretation und Analyse von digitalen Fernerkundungsdaten geht es in erster Linie darum, raumbezogene Informationen zu gewinnen, die später in thematische Kartenwerke überführt oder mit anderen Geodaten verknüpft werden.

Unter Klassifikation versteht man den Prozess der Zuweisung von Klassen zu Objekten aufgrund verschiedener Objektmerkmale. Die zu klassifizierenden Objekte können einzelne Pixel oder durch eine Segmentierung erzeugte Bildobjekte sein. Eine Objektklasse stellt eine vom Interpreten definierte Gruppe von Geo-Objekten dar, welche für die Zielsetzung der Analyse relevant sind (Gebäude, Wald, Gewässer, Straßen, etc.). Die Güte einer Klassifikation hängt wesentlich davon ab, wie eindeutig die Signatur der jeweiligen Objektklasse ist bzw. mit welchem Typ von Klassifikator gearbeitet wird. Je eindeutiger die Lage einer Pixelgruppe einer Objektklasse zugeordnet werden kann (z. B. anhand von Trainingsgebieten), desto besser sind die Klassifikationsmöglichkeiten. Je größer die Schnittmenge im Merkmalsraum (*feature space*) ist, desto weniger eindeutig ist die Klassenzuweisung. Es wird also deutlich, dass nur solche Parameterkombinationen günstig sind, die hinsichtlich der auszuweisenden Objektklassen eine ausreichende Differenzierung ermöglichen.

Hinsichtlich der Klassifikationsverfahren kann man unterscheiden zwischen

- pixelbasierten Verfahren
- objektorientierten Verfahren

5.1.1 Pixelbasierte Verfahren

Pixelbasierte Verfahren klassifizieren die einzelnen Pixel unabhängig von ihrer Nachbarschaft. Basis für die Klassifikation sind die Grauwerte der Pixel. Es gibt zwei verschiedene Arten pixelbasierter Verfahren:

- überwachte Klassifikation (*supervised classification*)
- unüberwachte Klassifikation (*unsupervised classification*)

● Überwachte Verfahren

Im ersten Schritt wird eine Anzahl repräsentativer Trainingsgebiete für verschiedene zu definierende Klassen ausgewiesen. Diese Auswahl der Trainingsgebiete erfordert den Einsatz eines Operators und setzt eine Menge an Erfahrung und Wissen voraus, da die Qualität der Trainingsgebiete direkt das

Ergebnis der Klassifikation bestimmt. Im nächsten Schritt wird jedes Pixel aus dem Datensatz einer der vorher definierten Klassen zugewiesen. Dieser Klassifikationsschritt kann automatisch ausgeführt werden. Für die Zuweisung gibt es eine Reihe von Ansätzen, beispielsweise

- *Maximum Likelihood*
- *Minimum Distance* (= *Nearest Neighbor*)
- Parallelepiped – Verfahren (auch Quader- oder Box – Klassifikation)
- Mahalanobis – *Distance*
- Hierarchische Klassifikation

Die **hierarchische Klassifikation** nimmt eine Sonderrolle ein, da sie sich grundlegend von den anderen überwachten Verfahren unterscheidet: Die Zuordnung der Pixel zu den Klassen erfolgt nicht über einen einmaligen Vorgang, vielmehr wird das endgültige Ergebnis über eine Folge von Iterationen erreicht. Die Zuteilung erfolgt entweder durch eine schrittweise Verfeinerung (*top-down*) bzw. durch eine Agglomeration (*bottom-up*) der Klassen (Abb. 5-1).

Das Verfahren ist sehr flexibel, allerdings erfordert die Aufschlüsselung in viele Klassenebenen ein hohes Maß an Übersicht und Systematik. Ein großer Vorteil ist, dass für jeden einzelnen Zuweisungsschritt eine zielgerichtete individuelle Kanal- und Merkmalskombination möglich ist. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass eine einmal durchgeführte Entscheidung (Teilung, Zusammenfassung) nicht wieder zugunsten einer besseren Einteilung rückgängig gemacht werden kann.

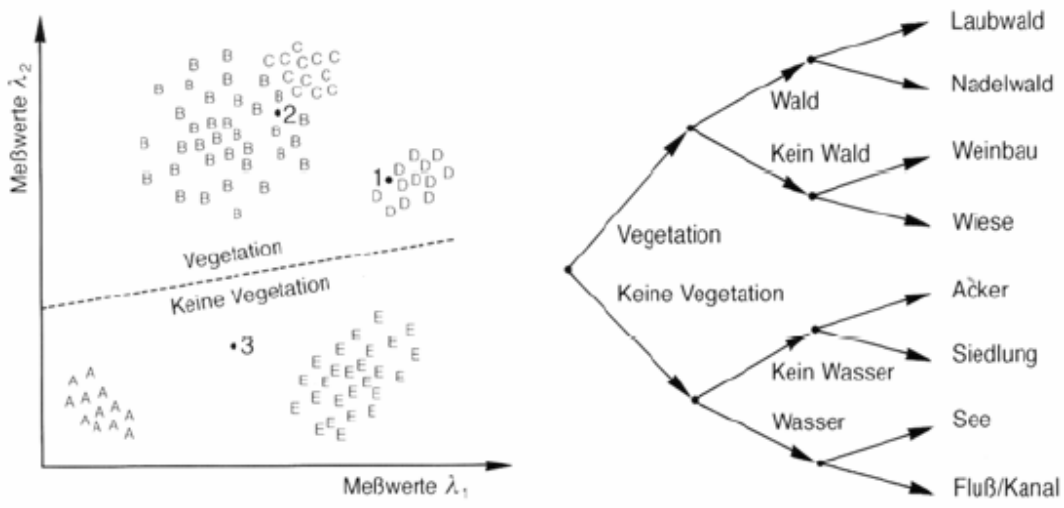

Abb. 5-1: Hierarchische Klassifizierung (nach Albertz, 1991)

● Unüberwachte Verfahren

Die Gesamtheit der Pixel wird in eine Anzahl von Klassen ähnlicher spektraler Eigenschaften unterteilt – ohne irgendein Vorwissen. Es handelt sich um rein statistische Klassen, ein Bezug zu realen Objekten ist a priori nicht notwendig bzw. nicht gegeben, deshalb benötigt man auch keine

Trainingsgebiete. Im Grunde genommen funktioniert die unüberwachte Klassifikation genau umgekehrt wie die überwachte: zuerst werden die Pixel zu spektralen Klassen zusammengefasst, anschließend wird versucht, die Klassen zuzuweisen.

5.1.2 Der objektorientierte Ansatz

Dieser Klassifikationsansatz setzt eine Segmentierung des Datensatzes voraus, d. h. die Gruppierung benachbarter Pixel zu bedeutungsvollen Gebieten (Bildobjekten, Segmenten). Wichtige semantische Informationen können nicht durch einzelne Pixel ausgedrückt werden, wohl aber durch diese bedeutungsvollen Objekte und ihre gegenseitigen Beziehungen (eine wichtige Rolle kann beispielsweise der Kontext spielen: eine grüne Fläche inmitten eines dicht bebauten Gebietes ist ein Park). Bei dieser Methode werden nicht die einzelnen Pixel klassifiziert, sondern die im Segmentierungsschritt erzeugten Bildobjekte, zusätzliche Merkmale wie z. B. Formparameter, Textur oder Nachbarschaftsbeziehungen werden berücksichtigt:

- Objektmerkmale: inkludieren Farbe, Textur, Form, Fläche, Maßstab
- Klassenbezogene Merkmale: involvieren Beziehungen zu benachbarten Objekten
- Verhältnisse können mit einbezogen werden

5.2 Segmentierung

Segmentierungsverfahren zur Bildanalyse existieren seit rd. 30 Jahren. Grundlage aller Verfahren ist dabei die Annahme wahrscheinlicher Korrelationen zwischen benachbarten Pixeln. Segmentierung bedeutet das Gruppieren benachbarter Pixel eines Datensatzes in Regionen (Segmente), basierend auf Ähnlichkeitskriterien. Ergebnis einer Segmentierung ist ein Regionenbild. Ziel der Segmentierung ist die Unterteilung eines Bildes in zusammengehörige homogene Gebiete, d. h. eine Zerlegung in semantische Einheiten, also in Strukturen, denen eine Bedeutung zugeordnet werden kann. Träger der Bedeutung sind hier die aus der Segmentierung hervorgegangenen Bildobjekte, und nicht nur mehr die einzelnen Pixel. Somit wird u. a. ein Eindruck vom räumlichen Kontext der Pixel gewonnen.
Trotz früher Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet (z. B. Kettig und Landgrebe, 1976) hat sich die Bildsegmentierung erst später innerhalb der Fernerkundung zu etablieren begonnen. Insbesondere durch die steigende geometrische Auflösung der Bilddaten gewinnen derartige Methoden heute zunehmend an Bedeutung, denn pixel-basierte Verfahren stoßen bei hochauflösenden Bilddaten an ihre Grenzen (Neubert, Meinel, 2003).

Zusammenhang zwischen Segmentierung und Klassifikation

Die Forderung, dass die Segmente reale Objekte darstellen sollen, führt zu einem grundlegenden Problem der Segmentierung: Die bedeutungsvolle Darstellung der Segmente setzt ein gewisses Vorwissen um die jeweilige Klasse voraus. Die Klassenzugehörigkeit wird aber erst bei der nachfolgenden Klassifikation zugewiesen. Diese wechselseitige Abhängigkeit Segmentierung – Klassifizierung kann berücksichtigt werden, indem eine iterative Vorgehensweise angewendet wird (Schneider, 2002). Die Qualität einer Klassifizierung hängt sehr stark vom Ergebnis und der Güte der Segmentierung ab.

Kriterien für eine Segmentbildung sind folgende:

- spektrale und / oder texturale Homogenität der Pixel (global, oder innerhalb eines Segments)
- spektrale und / oder texturale Unähnlichkeit der Pixel benachbarter Segmente
- eine einfache Form der Segmentgrenze
- spezielles thematisches Wissen

5.2.1 Segmentierungsverfahren

Segmentierungsverfahren lassen sich grob in folgende Gruppen unterteilen, wobei nicht immer eine klare Abgrenzung möglich ist:

→ regionenbasiert (*region- based segmentation*)

→ kantenbasiert (*edge-based segmentation*)

→ wissensbasiert (*knowledge- based segmentation*)

- ***region-based segmentation***

Grundprinzip ist die Aufteilung des Bildes in Regionen maximaler Homogenität.

Die Homogenitätskriterien können sich auf verschiedene Parameter beziehen: Grauwert, Farbe, Textur, Form etc. Angestrebt wird Homogenität im Inneren des Segments, also der Pixel untereinander.

Regionenbasierte Ansätze haben sich für die Auswertung hochauflösender Fernerkungdungsdaten als sehr brauchbar erwiesen. In diesem Zusammenhang muss besonderer Wert auf die Segmentierung der multi-sensoralen und multi-skaligen Eingabedaten gelegt werden, sowohl im Hinblick auf die geometrische und semantische Robustheit der Ergebnisse, als auch auf den Grad der Automatisierung bzw. der Transparenz der Algorithmen (Schiewe, Tufte, Ehlers, 2001).

Verschiedene Ansätze stehen dafür zur Verfügung:

- *region growing* (Regionenexpansion)
- *region merging, region splitting*

Region growing ist ein „*bottom-up*“ Algorithmus. Die Gruppierung wird ausgehend von einem oder mehreren Startpixeln als „*seed points*“ gestartet. Alle Nachbarpunkte des Saatpunktes werden auf ihre Ähnlichkeit zum Saatpunkt überprüft. Liegt die Ähnlichkeit eines Nachbarpixels innerhalb eines Toleranzbereiches, d. h. ist das Homogenitätskriterium erfüllt, und gehört es nicht zu einer anderen Region, wird es zum Segment hinzugefügt usw. Die Gruppierung wird abgebrochen, wenn keine Änderungen mehr auftreten. Unterschiedliche Startpunkte können unterschiedliche Ergebnisse liefern. Entscheidend für gute Ergebnisse ist die richtige Wahl des Homogenitätskriteriums.
Beim *region merging* bildet beim Start jedes Pixel eine eigene Region. Benachbarte Pixel / Regionen werden in der Folge verbunden, wenn sie dasselbe Homogenitätskriterium erfüllen.
Die Methode des r*egion merging,* basierend auf dem Kriterium einer minimalen Heterogenität der Segmente und gewichtet nach der Segmentgröße, wird näher beschrieben in (Baatz, Schäpe, 2000).
Das r*egion splitting* geht, umgekehrt wie das *region merging*, vom ganzen Bild als eine Region aus, es wird im Folgenden in immer kleinere Gebiete geteilt.

- ***edge-based segmentation***

Im Gegensatz zur *region-based segmentation* ist hier die Inhomogenität an den Rändern der Segmente entscheidend. Diese Verfahren beginnen mit der Suche nach Gradienten als Stellen von Diskontinuitäten im Bild mit der Annahme, dass sich an solchen Stellen die Grenzen von Segmenten befinden. Kanten im Bild sind durch starke Grauwertsprünge gekennzeichnet. Für diesen Suchvorgang stehen verschiedenste Kantendetektoren (*edge detectors, gradient operators*) zur Verfügung, wie z. B. der Laplace - Operator oder der Sobel - Operator. Nach erfolgter Detektion werden die Kanten gruppiert und damit ein Netzwerk von Grenzen erzeugt. Die Forderung nach einer einfachen Gestalt der Segmentgrenzen lässt sich leicht erfüllen. Ein Nachteil rein kantenbasierter Segmentierungsverfahren ist, dass die Homogenität der Segmente nicht automatisch garantiert ist.
Es existieren verschiedenste Kombinationen regionenbasierter und kantenbasierter Konzepte für die Segmentierung. Die verschiedenen Ansätze liefern unterschiedliche Ergebnisse in der Darstellung der Segmentgrenzen (Schneider, 2002).

- ***knowledge-based approach***

Wissensbasierte Verfahren zur Segmentierung versuchen Zusatzwissen, gewonnen aus Trainingsgebieten oder anderen bereits existierenden Quellen, in den Segmentierungsprozess einfließen zu lassen. Auch wird versucht, das menschliche Interpretations- und Urteilsvermögen zu simulieren.

5.2.2 Vergleichsstudie Segmentierungssoftware

Neubert und Meinel (2003) haben verschiedene Segmentierungsprogramme für hochauflösende Fernerkundungsdaten verglichen. Ein Teil der Softwarepakete ist kommerziell erhältlich, ein Teil der Algorithmen wurde von Forschungseinrichtungen oder Universitäten entwickelt. Der entscheidende Faktor bei der Anwendung von Segmentierungsprogrammen ist die erreichte Qualität der Segmentierung. Mit ihr wird unmittelbar die Qualität der anschließenden Klassifikation bestimmt. Es stellten sich bei diesem Vergleich z. T. sehr unterschiedliche Charakteristika und Ergebnisse heraus.

Datengrundlage

Verwendet wurden multispektrale, *pan-sharpened* Ikonos-Daten. Die beiden Testgebiete erstreckten sich über eine Fläche von rd. 2 x 2 km². Szene 1 umfasste ländliches, Szene 2 städtisches Gebiet. Die Segmentierung zielte auf die Extraktion relevanter Landnutzungsklassen ab. Geometrische Segmenteigenschaften standen im Fokus der quantitativen Abschätzung. Die Beurteilung der Qualität erfolgte allgemein visuell bzw. detailliert unter Verwendung interpretierter Referenzgebiete.

Folgende Programme wurden verglichen

- *eCognition 3.0* (Definiens Imaging GmbH, München)
- *SPRING 4.0* (National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brasilia)
- *Data Dissection Tools* (INCITE, Stirling University, UK)
- *Image Segmentation* for Erdas Imagine (USDA Forest Service, Remote Sensing Applications Center, Salt Lake City, USA)
- *CAESAR 3.1* (N.A. Software Ltd., Liverpool, UK)
- *Info PACK 1.0* (InfoSAR Ltd., Liverpool, UK)
- *Minimum Entropy Approach to Adaptive Image Polygonization* (Universität Bonn)

Für die Beurteilung der Segmentierungsqualität erfolgte zum Ersten eine allgemeine visuelle Bewertung des Ergebnisses. Zum Einsatz kommende Kriterien waren die Abgrenzung zwischen den unterschiedlichen Landnutzungsklassen, die Segmentierung linearer Objekte, das Auftreten fehlerbehafteter Segmente sowie eine Beschreibung des Gesamteindrucks der Segmentierung.

Weiters wurde ein detaillierter visueller und geometrischer Vergleich mit eindeutig zuordenbaren Referenzflächen durchgeführt. Die 20 Referenzflächen unterschieden sich in Lage, Form, Fläche Textur, Kontrast, Landnutzungsart etc. Für diesen Vergleich wurden alle Ergebnisse in *shape files* im Vektorformat umgewandelt, wobei nur die Programme *eCognition* sowie *Image Segmentation* in der Lage waren, selber die Vektorfiles zu erzeugen. Beim geometrischen Vergleich wurden neben den Formfaktoren auch die Anzahl der gebildeten Segmente bzw. Teilsegmente pro Referenzfläche bewertet. Als Teilsegment galten alle Polygone, die mit mindestens 50 % innerhalb des Referenzobjekts lagen.

Ergebnisse

Außer beim Programm *InfoPACK* wurden sämtliche Segmentierungen auf unterschiedlichen Ebenen ausgeführt – wechselnde Parametereinstellungen lieferten unterschiedliche Segmentgrößen bzw. Ergebnisse. Die Algorithmen reagierten oft sensibel auf kleine Änderungen in den Segmentierungsparametern oder in der Reihenfolge bei hierarchischen Ansätzen. Der Nutzer ist mit einem hohen Grad an Freiheiten konfrontiert, diese sollten sich aber eher auf ein Minimum beschränken: Das Ergebnis wird nämlich in hohem Maße von Subjektivität bestimmt, wenn die Auswahl der Parameter nach dem *trial-and-error*- Prinzip erfolgt.

eCognition 3.0

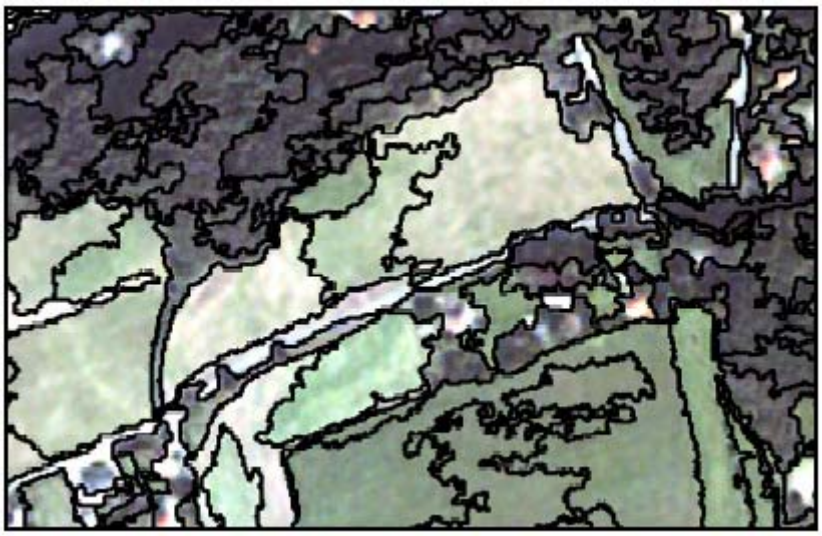

Abb. 5-2: Segmentierungsergebnis eCognition (Neubert und Meinel, 2003)

Die Ergebnisse der Segmentierung waren von guter Qualität. Gelegentlich wurden sehr unregelmäßige oder ausgefranste Polygone erzeugt. In Gebieten mit geringem Kontrast kam es zu fehlerhaften Segmenten. Große Flächen wurden manchmal willkürlich zerteilt (Abb. 5-2).

Insgesamt lieferte *eCognition* Ergebnisse mit der geringsten Übersegmentierung und gemeinsam mit *SPRING* die beste Gesamtqualität von allen getesteten Programmen.

SPRING 4.0

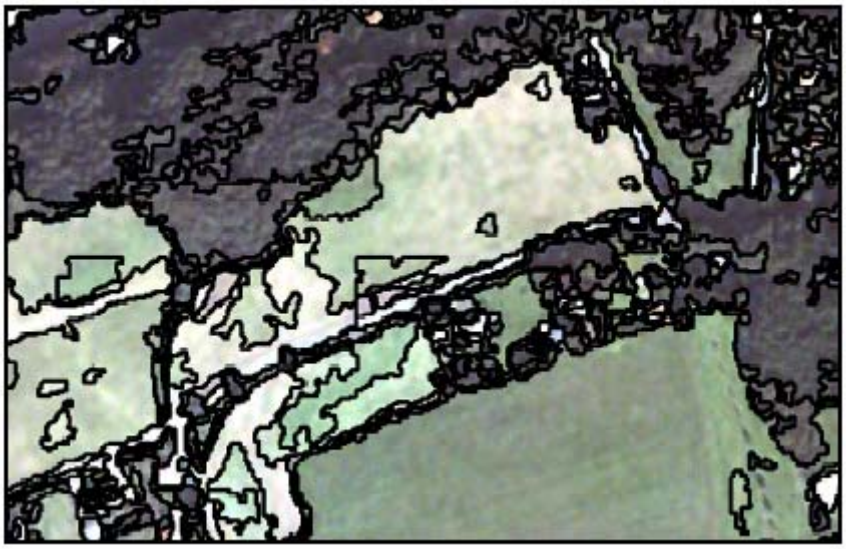

Abb. 5-3: Segmentierungsergebnis SPRING 4.0 (Neubert und Meinel, 2003)

Das Programm lieferte einen ansprechenden Gesamteindruck. Homogene Gebiete wurden gut nachgebildet, aber auch gerne übersegmentiert. Stark texturierte Flächen wie z. B. Wald wurden dagegen häufig untersegmentiert dargestellt. Gelegentlich kamen Segmentierungsfehler vor (Abb. 5-3).

Data Dissection Tools

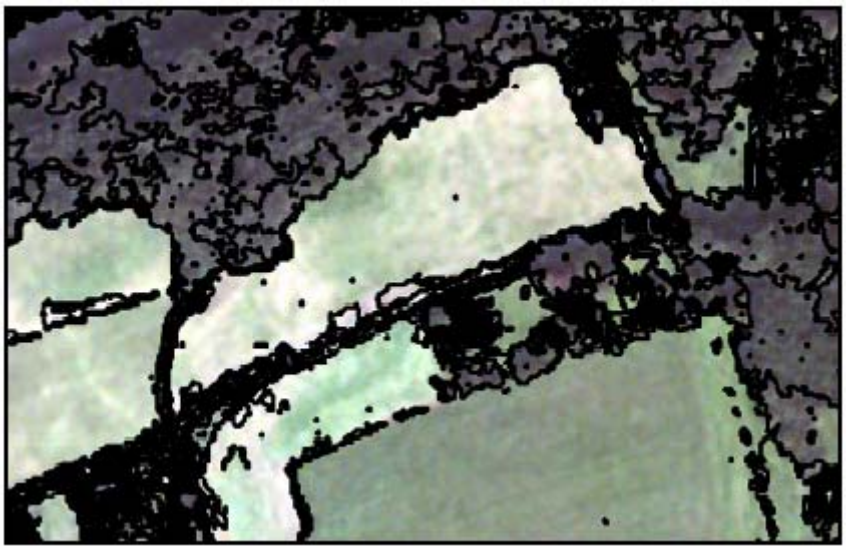

Abb. 5-4: Segmentierungsergebnis Data Dissection Tools (Neubert und Meinel, 2003)

Die Ergebnisse waren nur z. T. zufrieden stellend. Das Programm tendierte teilweise zu starker Übersegmentierung, aus der sich eine Vielzahl kleiner Segmente ergab. In Gebieten mit geringem Kontrast war die Darstellung ausgesprochen fehlerbehaftet. Homogene Gebiete wie Felder, Wiesen oder Wasserflächen wurden dagegen sehr gut nachgebildet, nur sehr ausgedehnte Flächen wurden manchmal willkürlich zerteilt (Abb. 5-4).

Image Segmentation

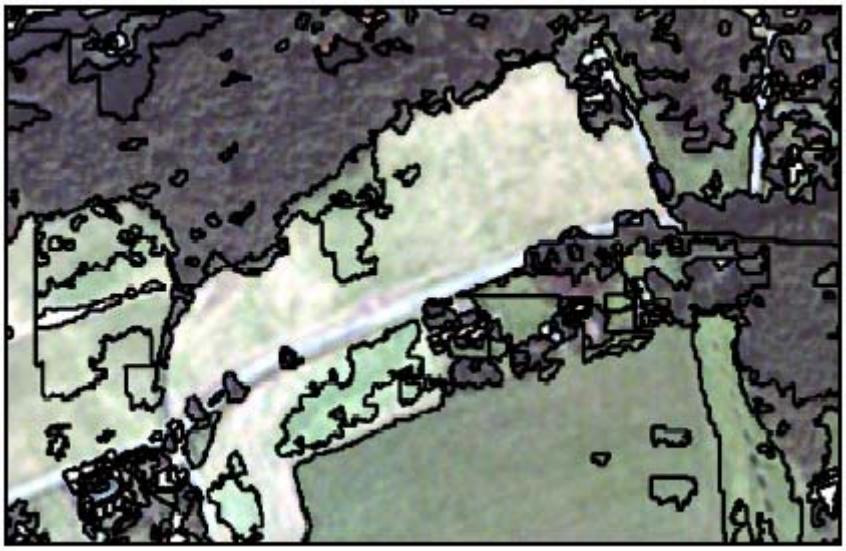

Abb. 5-5: Segmentierungsergebnis Image Segmentation (Neubert und Meinel, 2003)

Innerhalb desselben Versuches führte dieser Algorithmus sowohl zu Über- als auch zu Untersegmentierungen. Grenzen zwischen unterschiedlichen Landnutzungsarten mit ausreichendem Kontrast wurden korrekt nachgebildet. Gebiete mit geringem Kontrast wurden häufig nicht segmentiert, speziell die Abgrenzung zwischen Feldern und Wiesen war ein Problem.
Waldgebiete wurden als große Konglomerate, linienhafte Elemente nur unzureichend dargestellt, in sich homogene Objekte wurden häufig zerteilt (Abb. 5-5).

CAESAR 3.1

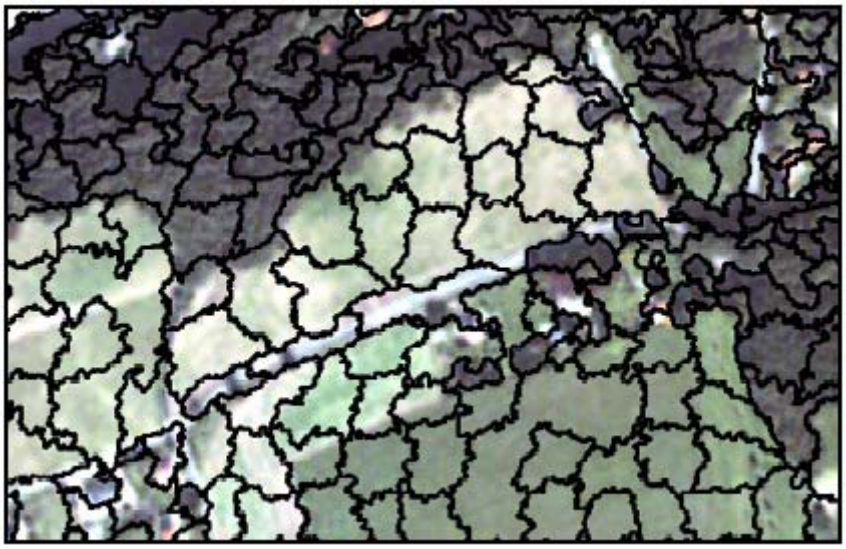

Abb. 5-6: Segmentierungsergebnis CAESAR 3.1 (Neubert und Meinel, 2003)

CAESAR wurde eigentlich für Radardaten entwickelt. Die Segmentierung führte hier zu Ergebnissen, die nicht sinnvoll weiterverwendet werden konnten. Die erzeugten Segmente waren allesamt kompakt und von ähnlicher Größe, die Vorgabe anderer Segmentierungsparameter führte lediglich zu

veränderten durchschnittlichen Segmentgrößen. Kleine Strukturen und vor allem linienhafte Elemente wurden falsch segmentiert, Grenzen mit geringem Kontrast schlecht dargestellt (Abb. 5-6).

InfoPACK 1.0

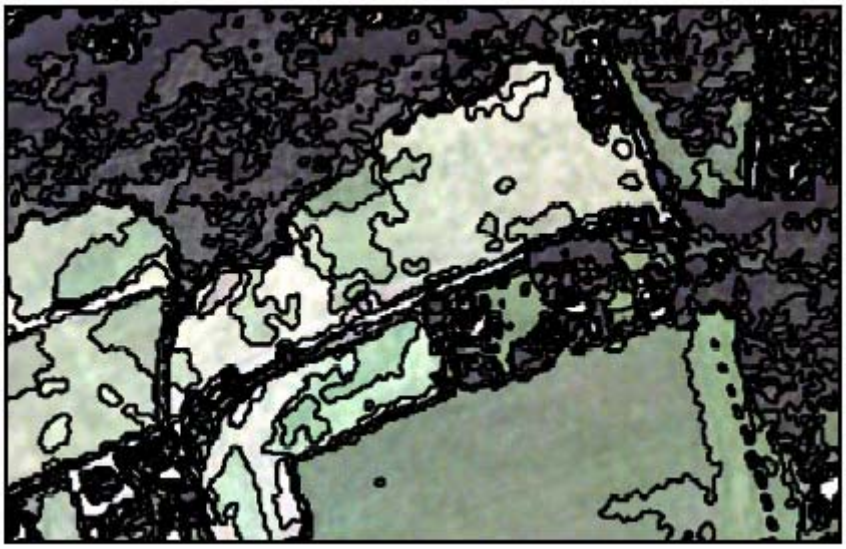

Abb. 5-7: Segmentierungsergebnis InfoPACK 1.0 (Neubert und Meinel, 2003)

Diese Software ist die Weiterführung von *CAESAR*.. Fast alle Objekte wurden zufrieden stellend nachgebildet, jedoch neigt der Algorithmus stark zu Übersegmentierungen. Homogene Gebiete waren davon weniger stark betroffen, sehr stark ausgeprägt war dieses Verhalten speziell im Wald und im bebauten Gelände. An den Übergängen unterschiedlicher Landnutzungsklassen entsand häufig eine starke „Naht“. So wie auch *eCognition* beinhaltet diese Software zusätzliche Werkzeuge für eine anschließende Klassifizierung (Abb. 5-7).

Minimum Entropy Approach

Abb. 5-8: Segmentierungsergebnis Minimum Entropy Approach (Neubert und Meinel, 2003)

Die geradlinige Abgrenzung von Feldern oder Straßen wurde gut nachgebildet, komplexe Objektgrenzen, wie sie z. B. an Waldrändern vorkommen, wurden aufgrund des verwendeten Triangulierungs-Algorithmus oft ungenau und zu geradlinig dargestellt. Großflächige homogene Gebiete wurden häufig zerstückelt (Abb. 5-8).

5.3 Objektorientierte Bildanalyse mit eCognition

Neue, hochauflösende Fernerkundungsdaten bedingen Probleme hinsichtlich der zu bearbeitenden Datenmengen sowie des Detailgehaltes der Daten an sich. Die herkömmlichen, pixelbasierten Klassifikationsansätze stoßen dabei zunehmend an ihre Grenzen. Der Bedarf an neuen Klassifikationsmethoden wächst, da die Entwicklung der Sensoren auf eine immer bessere geometrische Auflösung ausgerichtet ist. Um diese neuen Herausforderungen zu bewältigen, sind Ansätze erforderlich, die nicht alleine den Grauwert in Betracht ziehen, sondern auch Merkmale wie Nachbarschaftsbeziehungen, Objektform etc. (Neubert, Meinel, 2002). eCognition bietet momentan als einzige kommerzielle Software die Möglichkeit, unterschiedlichste Datensätze objektorientiert zu analysieren und auszuwerten.

5.3.1 Der Segmentierungsalgorithmus

Der erste Bearbeitungsschritt ist die Segmentierung der Bilddaten in homogene Gebiete. Dabei können Datensätze unterschiedlicher Herkunft und unterschiedlicher Auflösung verwendet werden. Diese sog. „*multiresolution segmentation*“ ist wesentlicher Bestandteil von eCognition, der Segmentierungsalgorithmus basiert auf einer *bottom-up region-merging* – Technik. Gesteuert wird die Segmentierung mit den vorzugebenden Parametern *scale, color und shape* als Homogenitätskriterien. Dabei wird, beginnend auf Pixelebene, jedes Pixel mit dem Nachbarpixel gruppiert, welches die größte Ähnlichkeit aufweist. In den darauf folgenden Schritten werden unter Berücksichtigung obiger Homogenitätskriterien immer größere Pixelgruppen gebildet, bis der Grenzwert für die Heterogenität erreicht ist. Ausgedrückt wird der Grenzwert durch den *scale parameter* – er ist das vom Nutzer definierte Abbruchskriterium (Hofmann, Maas, Schulze, 2002). Auf diese Weise entsteht in mehreren (möglichen) Segmentierungsebenen ein hierarchisches Netzwerk von Bildelementen (Abb. 5-9). Die durch die Segmentierung erzeugten Bildobjekte enthalten wesentlich mehr Informationen als einzelne Pixel: neben den spektralen Eigenschaften lassen sich zusätzliche Form- und Textureigenschaften sowie Nachbarschaftskriterien zwischen den Objekten ableiten. Die Extraktion von bedeutungsvollen Objekten hängt wesentlich vom Maßstab ab, mit dem das Problem betrachtet und gelöst werden soll. Unterschiedliche Problemstellungen verlangen nach unterschiedlichen Maßstäben.

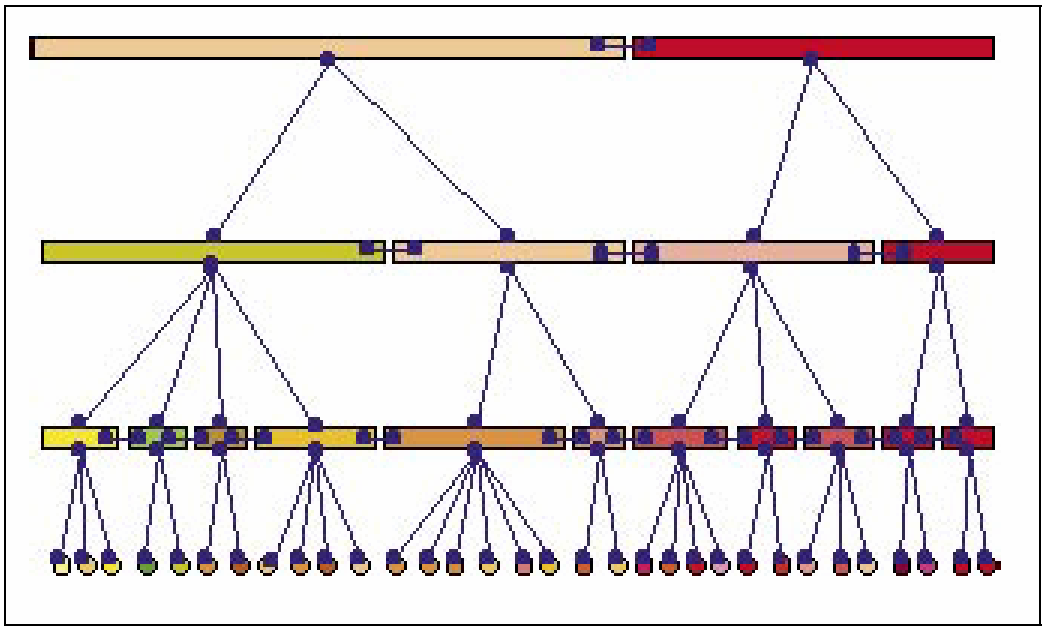

Abb. 5-9: Hierarchische Gliederung der Segmentierung in eCognition (eCognition Userguide)

Zur geometrischen Auflösung der Datensätze ist zu sagen, dass die Segmentierungs- bzw. Klassifikationsgenauigkeit nicht zwingend mit ebendieser steigen muss. Eine höhere Auflösung bedeutet auch ein größeres Maß an Heterogenität im Bild. Es werden mehr Einzelheiten sichtbar, als für die Objektdetektion und Ausweisung eigentlich nötig wären. Das Resultat sind dann sehr viele, kleine Segmente. Die gewünschte klare Abgrenzung der gesuchten Objekte von ihrer Umgebung ist dann unter Umständen nicht mehr so klar gegeben (Abb. 5-10).

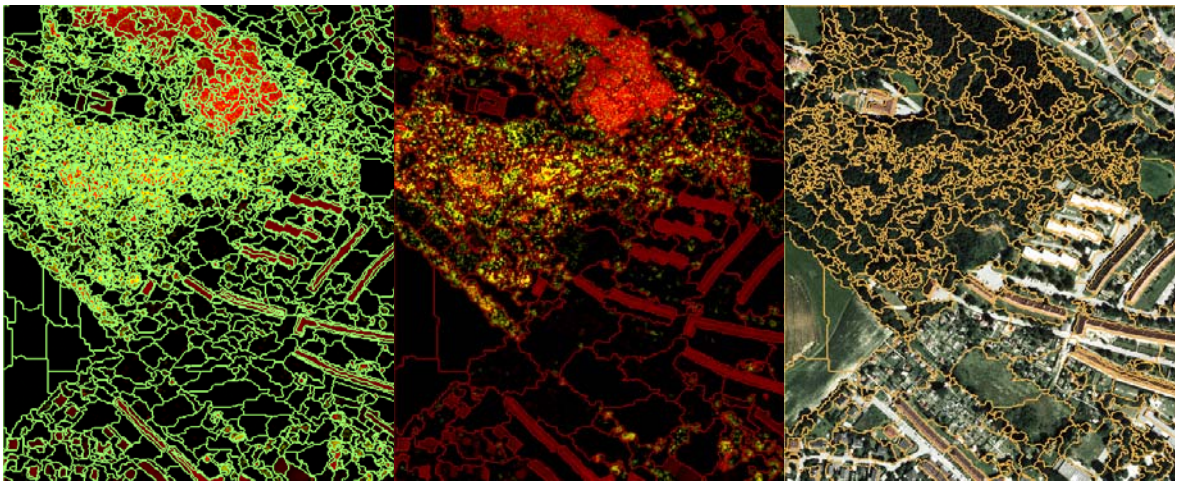

Abb. 5-10: Segmentierung nDSM: scale 10 – scale 25 – scale 25 mit unterlegtem Orthophoto

Bei einer optimalen Segmentierung grenzen sich die gesuchten Objekte möglichst deutlich von ihrer Umgebung ab und sind in sich homogen. Die Objekte sollten von möglichst genau einem Segment erfasst sein, keine anderen Klassen sollten im erzeugten Bildobjekt mit einbezogen werden.

Eine Ursache für schlechtere Segmentierungsergebnisse etwa im Fall einer Gebäudedetektion aus Laserscannerdaten kann z. B. die Problematik einer scharfen Trennung zwischen Gebäuden und angrenzenden Bäumen sein. Durch deren Ähnlichkeit in der Höhe und dem somit nicht vorhandenen markanten Höhenunterschied werden Gebäude und Vegetation gerne im selben Polygon eingeschlossen. Dasselbe Problem findet sich in bergigem Gebiet, wo bei in den Hang gebauten Häusern oft kaum ein Höhenunterschied zur Umgebung auszumachen ist.

5.3.2 Klassifikation in eCognition

Für die anschließende Klassifikation stellt eCognition zwei Arten von Klassifikatoren zur Verfügung:

- *Nearest Neighbor* – Klassifikation, mit manuell festzulegenden Trainingsgebieten
- *Rule- based classification* (regelbasierte Klassifikation), sie beruht auf den Regeln der Fuzzy Logic

Die Grundlage der *rule-based classification* bildet ein zu entwickelndes hierarchisches Regelwerk, das die Bedingungen für die Klassifikation enthält. Neben den spektralen Eigenschaften sind zusätzliche Nachbarschaftsbeziehungen, Relationen zu Sub-, Super- und Nachbarobjekten sowie weitere Segmenteigenschaften als Klassenmerkmale nutzbar:

- *object features* (Objektmerkmale)
- *class- related features* (klassenbezogene Merkmale)
- *terms* (Bedingungen)

Mit Hilfe dieser Merkmalsgruppen lässt sich ein semantisches Netz aufbauen, das aufgrund von Expertenwissen die Bildobjekte beschreibt und miteinander verknüpft. Zur Festlegung der Merkmale steht dem Benutzer der „*feature view*“ zur Verfügung. Mit diesem Werkzeug lassen sich sämtliche vom Programm zur Verfügung gestellte Merkmale sowie zusätzliche benutzerdefinierte „*customized features*“ auf ihre Verwendbarkeit für eine Trennung von Objektklassen darstellen.
Die Klassenbeschreibung erfolgt auf mehreren Ebenen, für jede Klasse lassen sich individuelle Regeln anwenden. Es besteht nicht die Einschränkung, mit einem einzigen Satz von Regeln die Gesamtszene klassifizieren zu müssen. Die Anzahl der möglichen Klassen (samt Sub- und Superklassen) ist bei der objektorientierten Analyse theoretisch unbegrenzt.
Da eCognition eine sehr große Anzahl von Merkmalsbeschreibungen zulässt, können bei entsprechendem Wissen die einzelnen Klassen theoretisch klar voneinander getrennt werden. Jedoch muss bei der Erstellung des Algorithmus ein Kompromiss gefunden werden zwischen sehr spezifischen, ausgefeilten Regeln zur Klassenbeschreibung einerseits, und einfacheren, dafür

allgemeiner gültigen Regeln andererseits. Die Übertragung von Klassifikationsregeln auf andere Studiengebiete wird schwieriger mit steigender Komplexität der Szene bzw. des erstellten Algorithmus.

6. Datengrundlage

6.1 Untersuchungsgebiet

Das Gebiet Haselgraben schließt an das nördliche Linz an und erstreckt sich über eine Gesamtfläche von ca. 13 km². Der südliche Teil ist durch vorwiegend städtische Bebauung geprägt: städtische Wohnbebauung, Gewerbe- und Industriegebäude, Wohn- und Einzelhaussiedlungen, Kleingartenanlagen. Gegen Norden geht die Charakteristik in ländliches, hügeliges Gelände mit größeren Wiesen- und Waldflächen und nur wenig Besiedelung über. Innerhalb der Gesamtszene Haselgraben wurden zwei Teilgebiete für die Validierung und Beurteilung der Ergebnisse der Gebäudedetektion ausgewählt (Abb. 6-1).

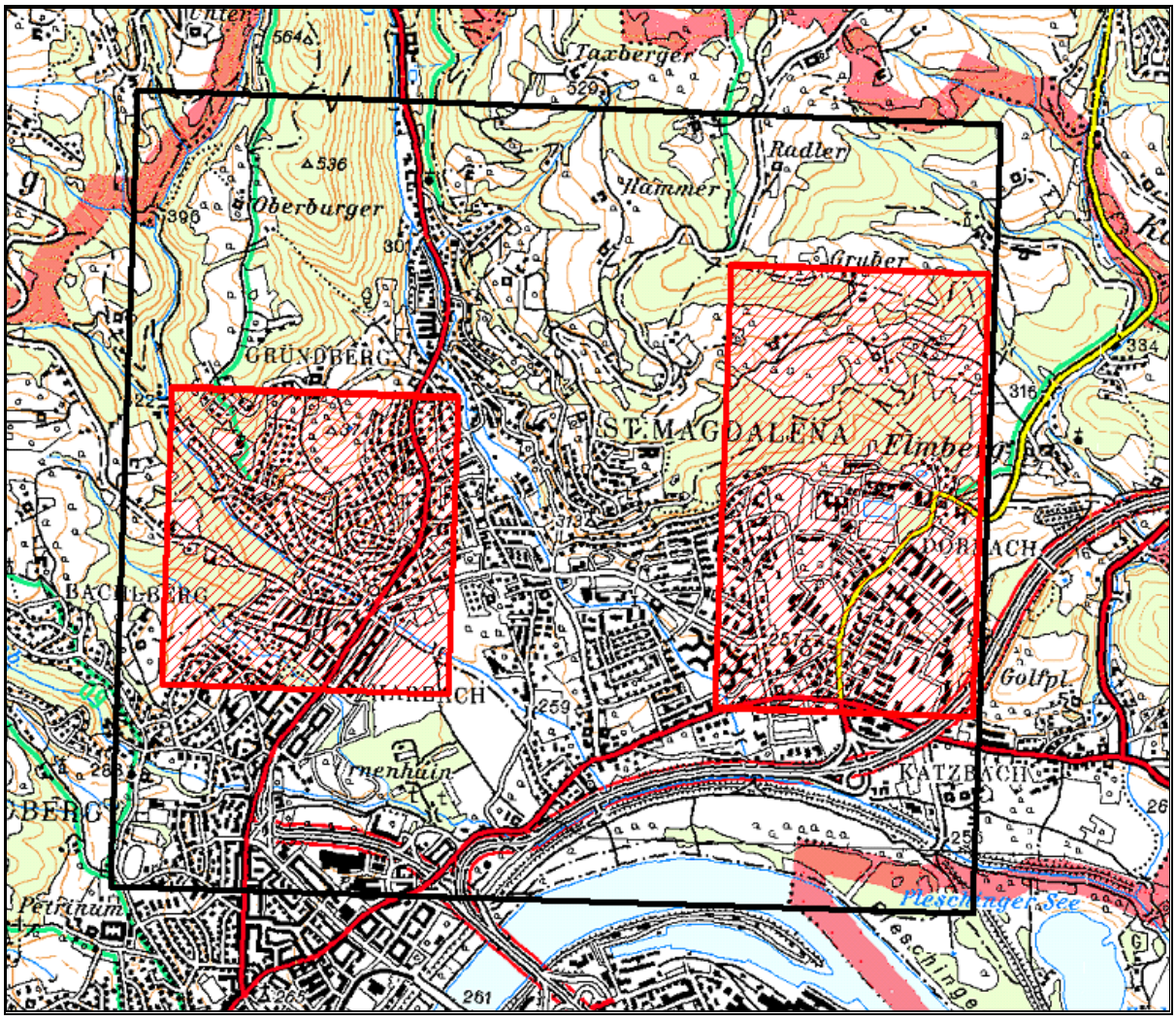

Abb. 6-1: Topografische Karte des Gebiets Haselgraben mit den zwei Teilgebieten

- Teilgebiet 1 (links) mit einer Fläche von 1,6 km² setzt sich aus größtenteils städtischen Siedlungsbauten, Einzelhaus- und Kleingartenanlagen zusammen. .
- Teilgebiet 2 (rechts) mit einer Fläche von 2,2 km² weist neben dem Stadtgebiet zur Hälfte ländliche Strukturen mit gemischter Bedeckung durch Felder und Wald sowie einzelne Höfe auf.

6.2 Daten

Für die Gebäudedetektion wurden einerseits nur die Laserscannerdaten eingesetzt, andererseits Kombinationen mit hochauflösenden Farborthophotos bzw. Ikonos-Satellitendaten verwendet. Sämtliche in der Arbeit verwendete Daten liegen georeferenziert vor.

6.2.1 Laserdaten

Die Befliegung des Gebiets Haselgraben erfolgte 2003 im Auftrag der Abteilung Geoinformation und Liegenschaft des Landes Oberösterreich durch die Firma TopScan (Tabelle 6-1). Registriert wurden sowohl erstes als auch letztes Echo sowie die Intensität des empfangenen Signals. In der vorliegenden Arbeit zur Gebäudedetektion werden jedoch nur die FP- und LP-Daten verwendet. Die mengenmäßige Aufteilung der Messpunkte im Untersuchungsgebiet beträgt 73.742.034 FP- und 67.621.755 LP-registrierte Echos. Mit einer gelieferten Fläche von 70 km² ergibt sich daraus eine mittlere Punktdichte von 1 Punkt pro m².

Gebiet	Haselgraben
Abstand der Flugachsen	350 m
mittlere Flughöhe über Grund	1000 m
Fluggeschwindigkeit	65 m/s
Laser-Messrate	25000 Hz
Scanfrequenz	23 Hz
Scanwinkel	20°
Streifenbreite	725 m
Streifenüberlappung	375 m

Tabelle 6-1: Flug- und Systemparameter (TopScan, Projektbericht Oberösterreich)

6.2.2 Orthophotos

Die vom Land Oberösterreich zur Verfügung gestellten digitalen Farborthophotos stammen aus der oberösterreichischen Gesamtbefliegung im Jahr 2001 durch das BEV, die Bodenauflösung der Bilder beträgt 25 cm.

Die Orthophotos werden sowohl für einen Teil der Bildanalyse, als auch zur anschließenden Genauigkeitsüberprüfung der Klassifikationsergebnisse verwendet.

6.2.3 Multispektrale Ikonos-Szene

Die Firma *Space Imaging Europe* empfängt die Ikonos - Daten für Mitteleuropa. Sie werden im Wesentlichen nur auf Bestellung aufgenommen. Die Repetitionsrate des Satelliten beträgt 140 Tage, kann jedoch durch den möglichen Sensorschwenk bis zu 26° auf ca. einen Tage verkürzt werden, was allerdings mit Qualitätseinbußen verbunden ist. Aufzeichnungen im visuellen Spektralbereich hängen entscheidend von den atmosphärischen Aufnahmebedingungen. Standardmäßig müssen bis zu 20 % Bewölkungsgrad akzeptiert werden. Eine Szenengröße umfasst eine Fläche von rd. 11 x 11 km².
Bei der verwendeten Ikonos - Satellitenbildszene handelt es sich um Bilddaten im PSM (*pan sharpened multispectral*) - Modus. Die Multispektralkanäle (4 m Auflösung) werden über das Prinzip der *Image Fusion* mit dem panchromatischen Kanal (1 m Auflösung) geschärft. Finanziert wurde die Szene vom „Austrian Space Program“ im Zuge des Projekts „Austrian Settlement and Alpine Environment Cluster for GMES“ (ASAP-PR-003/04).

6.3 Aufbereitung der Laserdaten

6.3.1 Vorbereitende Schritte

Die in Form einer Punktwolke gelieferten Höhendaten (Format .xyz) wurden vor der weiteren Verwendung im Programmpaket SCOP++ zu Höhenmodellen mit einer regelmäßigen Rasterweite von 1 x 1 m² interpoliert:

DSM: Aus den *first pulse* - Daten wurde mittels „*moving planes*“ ein Oberflächenmodell bestimmt. Ebenso wurde aus den *last pulse* - Daten ein Oberflächenmodell erstellt, welches später für die Berechnung des „Texturmodells“ (Diff FP/LP) benötigt wird (Abb. 6-2).

DTM: Das Geländemodell wurde mit der Hierarchischen Robusten Interpolation (siehe Kapitel 3.3.1) berechnet (Abb. 6-3).

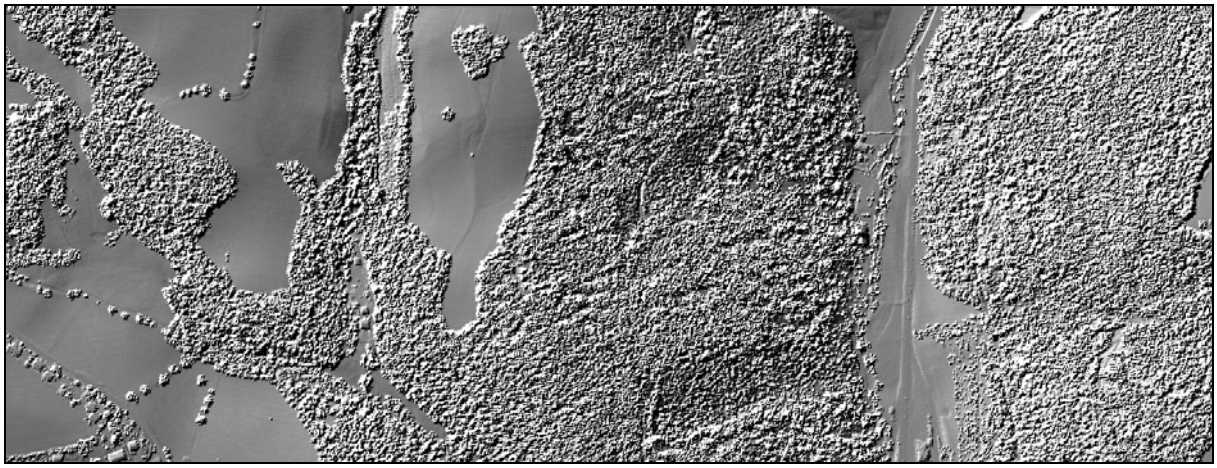

Abb. 6-2: Ausschnitt aus dem DSM des Gebiets Haselgraben

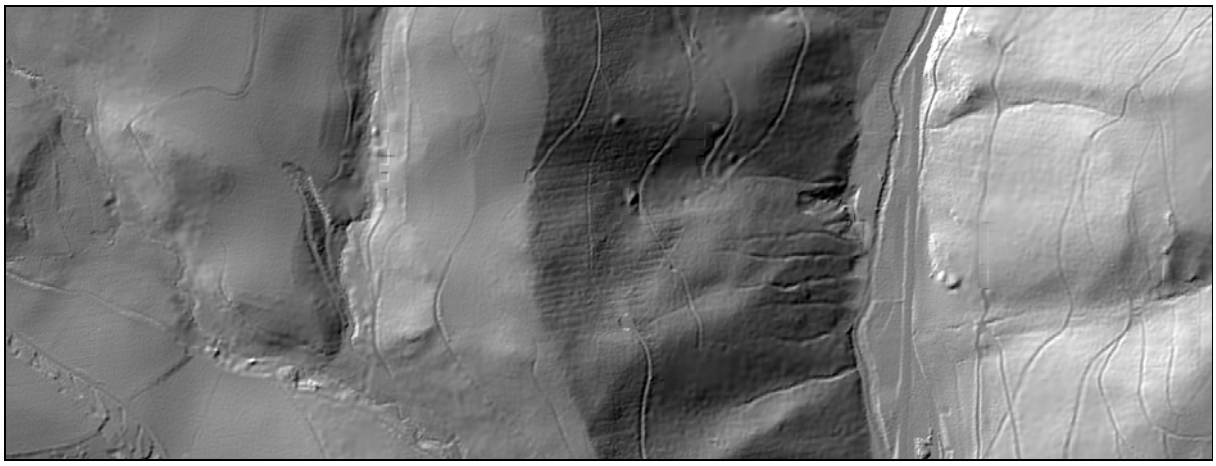

Abb. 6-3: Ausschnitt aus dem DTM des Gebiets Haselgraben

nDSM, (Diff FP/LP): die Berechnung des normierten Oberflächenmodells nDSM durch Subtraktion des DTM vom DSM und die Bestimmung des Differenzmodells (Diff FP/LP) aus dem *first pulse*-DSM minus *last pulse*-DSM erfolgte ebenfalls in SCOP++.
Bei der Differenzbildung kam es vereinzelt zu negativen Höhenwerten, diese mussten vor der weiteren Verwendung in eCognition entfernt, d. h. auf z = 0 gesetzt werden. Diese Korrektur wurde in ERDAS Imaging durchgeführt.

6.3.2 Das normierte Oberflächenmodell (nDSM)

Das nDSM bildet die Basis für sämtliche in dieser Arbeit verwendeten Ansätze zur Gebäudedetektion. Durch die Normierung des Oberflächenmodells auf Grundhöhe ist es möglich, die erhöhten Regionen im Datensatz unabhängig von der Geländemorphologie zu extrahieren. Die Detektion von 3D-Objekten geschieht mittels eines Höhenschwellwertes (z. B. > 2,5m). Innerhalb der so gefundenen erhöhten Segmente werden anschließend objektspezifische Merkmale gesucht, die im darauf

folgenden Klassifikationsprozess zur Unterscheidung der gesuchten Gebäude von der Vegetation verwendet werden können.
Je nach Geländetyp und Filtermethode können im nDSM noch zusätzliche Geländeobjekte, wie z. B. grobe Felsen, Geländekanten oder Artefakte wie Brückenbauwerke, enthalten sein. Sie wurden bei der DTM-Erstellung nicht hinreichend modelliert. Weiters können bei der DTM-Berechnung im Fall von Wasserflächen, ausgedehnten Gebäudefläche oder ähnlichem sog. Datenlöcher entstehen. Dieses Phänomen ist ebenfalls auf den verwendeten Interpolationsalgorithmus bzw. die Fenstergröße zurückzuführen. Derartige Fehler setzen sich natürlich im nDSM fort.

6.3.3 Die Differenz aus *first*- und *last pulse*-Daten

Die Differenz aus erster und letzter Reflexion (Diff FP/LP) gibt Auskunft über die „Rauhigkeit" der Oberfläche und ist somit als Texturmaß ein Indikator für Vegetation. Als Merkmal für die Klassifikation zeigt (Diff FP/LP) folgende Charakteristik: Dächer bestehen in der Regel aus glatten festen Oberflächen, so dass – abhängig von der Neigung des Daches – keine oder nur geringe Differenzen zwischen erstem und letztem Echo zu beobachten sind. Im Gegensatz dazu treten bei Vegetation, die für einen Teil des Laserstrahls durchlässig ist, deutlich größere Differenzen auf. Dieses Verhalten lässt sich zur Trennung von Vegetation und Gebäuden nutzen. Zu beachten ist, dass entlang von Dachkanten z. T. ebenfalls große Differenzen zu beobachten sein können: einige FP-Reflexionen repräsentieren noch die Dachfläche, während die LP-Echos der entsprechenden Laserpulse bereits von Reflexion am Boden stammen. Grundsätzlich kann man aber davon ausgehen, dass *first pulse*- und *last pulse*-Daten bei glatten Oberflächen annähernd gleich sind und damit der Wert von (Diff FP/LP) gegen Null geht. Arefi, Hahn, Lindenberger (2003) verwenden eine normierte Form, die „*normalized Difference*" (ND). ND wird von den Autoren als Äquivalent zum NDVI bezeichnet und berechnet sich folgendermaßen:

(3) $$\mathbf{ND = (FP - LP) / (FP + LP)}$$

7. Gebäudedetektion

7.1 Überblick über bestehende Ansätze zur Gebäudeextraktion

Es existieren verschiedenste Ansätze zur Gebäudedetektion sowie zur Gebäuderekonstruktion und -modellierung aus Laserscannerdaten, z. T. unter Zuhilfenahme von 2D-Grundrissdaten, Katasterinformation, hochauflösenden Luftbildern oder Multispektraldaten. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick gegeben werden.

Rottensteiner (2005):
Diese Arbeit behandelt die automatische Ableitung von 3D-Gebäudemodellen aus Laserscannerdaten und Luftbildern. Der Arbeitsablauf umfasst zwei Schritte: die Detektion von Gebäuden und deren geometrische Rekonstruktion durch Polyedermodelle. Zur Gebäudedetektion wurde ein Verfahren zur Fusion von Laserscannerdaten und multispektralen Bildern auf Basis der Theorie von Dempster-Shafer entwickelt. Dabei handelt es sich um einen Klassifizierungsprozess, zu dem die Lidardaten die Höhe von Objekten über dem Gelände über die Differenz zwischen FP und LP sowie die Oberflächenrauhigkeit beitragen. Die multispektralen Bilder dienen mit dem NDVI zur Trennung der Vegetation von anderen Objekten. Gebäude mit einer Fläche > 120 m² konnten sehr verlässlich detektiert werden, wobei sich die Qualität der Ergebnisse mit abnehmender Gebäudefläche stark reduziert.

Arefi, Hahn, Lindenberger (2003):
Das vorgestellte Verfahren behandelt in zwei getrennten Ansätzen Gebäude- und Baumdetektion aus Laserscannerdaten mit einer Punktdichte von rd. 1 Punkt pro m². Aus den zur Verfügung stehenden FP- und LP-Daten wird für die Baumdetektion ein *normalized difference image* (siehe Kapitel 6.3.3) als gerastertes Höhenbild abgeleitet. Eingangsdaten für die Gebäudedetektion sind ein Oberflächenmodell aus den LP-Daten, ein kantenverstärktes Bild sowie ein Gradientenbild: In den LP-Daten ist die Vegetation weniger stark ausgeprägt vorhanden; Dächer zeigen eine mehr oder weniger konstante Oberflächenorientierung, d. h. die Gradienten der Dachflächen sind an diesen Stellen relativ homogen.

Tovari, Vögtle (2004):
Die Autoren verwenden einen objektorientierten Ansatz. Die Eingangsdaten FP, LP und Intensität werden auf ein regelmäßiges Raster interpoliert und ein nDSM aus der Differenz LP-DSM minus DTM berechnet, auf welchem die anschließende Segmentierung basiert. Der Nachteil des aus einem LP-DSM berechneten nDSM ist, dass hier aufgrund der Dateneigenschaften nur ein Teil der in

Wirklichkeit vorhandenen Vegetation enthalten ist und somit nicht segmentiert und klassifiziert werden kann. Als Lösung werden zuerst die Gebäude klassifiziert. In einem zweiten Prozess werden die detektierten Gebäude in einem „herkömmlichen“ nDSM maskiert und diese erhöhten Regionen damit ausgeschlossen. Anschließend werden die übrig gebliebenen Regionen als Vegetation klassifiziert.

Für die Trennung Vegetation - Gebäude werden folgende Merkmale verwendet:

- Gradienten an den Segmentgrenzen
- Höhentextur und Differenz zwischen erstem und letztem Puls
- Form und Größe der Segmente für eine Trennung in natürliche respektive künstliche Objekte
- Intensität des rückkehrenden Echos, diese hängt stark von der Charakteristik der reflektierenden Oberfläche ab

Ruijin Ma (2005):

In dieser Methode zur Gebäudedetektion werden ebenfalls nur Laserdaten verwendet. Erhöhte Objekte wie Bäume oder Häuser werden über einen Höhenschwellwert im nDSM vom Boden getrennt: alles, was höher 3 m liegt, wird einer Klasse „Vegetation oder Gebäude“ (*elevated)* zugewiesen, alles unter 3 m wird nicht weiter bearbeitet.

Von Gebäuden wird angenommen, dass sie ebene Flächen aufweisen, was bei Bäumen nicht der Fall ist. Schon während der DTM-Erzeugung waren diese *planar surfaces* extrahiert worden, im Zuge der Gebäudedetektion werden sie mit den *elevated*-Daten verschnitten. Auf diese Weise werden Gebäuderegionen detektiert. Um kleine, verstreute, vermeintliche „Häuser“ zu vermeiden, wird eine Mindestfläche für Gebäude eingeführt.

Jansa, Stanek (2003):

In diesem Ansatz werden Laserscannerdaten und Luftbilder kombiniert.

Nach Erzeugung von je einem gerasterten Oberflächen- und Geländemodell aus den ALS-Daten erfolgt die Detektion von sog. Gebäuderegionen (*building regions*) über eine Analyse des nDSM. Die Verknüpfung mit dem Bildmaterial dient einer anschließenden genauen Dachflächen- bzw. Gebäudeabgrenzung.

Vögtle, Steinle (2000):

In diesem Ansatz wird eine Detektion und Modellierung von Gebäuden in städtischem Gebiet mittels einer Kombination von ALS-Daten und CIR-Orthophotos vorgestellt. Von den Laserdaten wird die Höheninformation aus dem nDSM eingesetzt, die Luftbilder liefern den NDVI. Die Strategie ist eine schrittweise Elimination von Gebieten und Objekten, die keine Gebäude repräsentieren. Vegetation wird über den NDVI identifiziert, mittels Binärisierung wird eine „Vegetationsmaske“ erstellt. Diese Maske wird dem nDSM überlagert. Auf diese Weise bleiben im nDSM nur mehr potentielle

Gebäuderegionen übrig, die anschließend auf ihre Form und Größe überprüft werden, um noch eventuelle Artefakte aufzuspüren und zu entfernen.

Matikainen et al. (2003):

In dieser Studie wird in einem objektorientierten Ansatz die Anwendbarkeit und Automatisierbarkeit von Laserscannerdaten für die Aktualisierung und Detektion von Veränderungen in großmaßstäbigen Karten von urbanen Gebieten untersucht.

Die Punktdichte liegt mit 2-3 Punkten pro m² etwas höher als im sonst verwendeten Schnitt von 1 Punkt pro m². Aus den FP- und LP-Daten werden ein DSM und ein DTM berechnet und auf einen Raster von 0,6 m interpoliert, ebenso die Intensitäten. Für Vergleichszwecke stehen zwei digitale Karten, die die Lage der Gebäude des Studiengebiets beinhalten, zur Verfügung.

Nach der Segmentierung des DSM erfolgt eine erste Trennung in die Klassen *„building or tree“* und *„ground“* über die Berechnung der Differenz der mittleren Höhe des Segments im DSM respektive DTM: Ist diese Differenz > 2,5 m, wird das Segment als *„building or tree“* klassifiziert. Die Trennung von Gebäuden und Vegetation erfolgt sodann über folgende Merkmale:

- *GLCM homogeneity* der Höhe (Texturmaß).
- *GLCM homogeneity* der Intensität.
  Beide *GLCM's* sind für Gebäudesegmente für gewöhnlich höher als für Vegetationssegmente.
- Durchschnittliche Länge der Kanten der *„shape polygons“*.
  Diese ist typischerweise bei Gebäuden größer als bei Vegetation, d. h. für Gebäude werden regelmäßiger geformte Segmente angenommen.

Mit dem Ergebnis der Gebäudedetektion wird anschließend die *change detection* durchgeführt.

7.2 Segmentierung der Laserdaten

Der erste Schritt im Zuge einer objektorientierten Klassifikation in eCognition ist die Segmentierung der Daten. Der Prozess der Segmentierung kann – speziell wenn die Daten hochauflösende Orthophotos beinhalten – sehr zeitaufwendig sein. Deshalb ist es empfehlenswert, die Bestimmung der passenden Parameter und Einstellungen vorerst an kleineren Subsets zu testen.
Da es für die Segmentierungsparameter keine fixen oder empfohlenen Einstellungen gibt, ist es vor allem zu Beginn der Arbeiten mit neuen Datensätzen erforderlich, verschiedene Werte sowohl für den *scale parameter* als auch für die Verhältnisse von *color* und *shape* durchzuprobieren, bis ein visuell subjektiv zufrieden stellendes Segmentierungsergebnis gefunden ist.
Man kann allerdings z. B. im Fall von Laserscannerdaten für das Setzen des Parameters *color* folgende Überlegung anstellen, wenn das Objekt „Gebäude“ das wesentliche Element ist: Gebäude können in den Höhendaten visuell am besten durch eine hellere Farbe (Höhe) von ihrer Umgebung unterschieden werden. Damit ist das Gewicht für den Farbwert (*color*) deutlich größer zu setzen als das Gewicht für die Form (*shape*). Der Formparameter *shape* trägt aufgrund der z. T. unregelmäßigen Formen der zu extrahierenden Objekte – was u. a. an Auflösung und Eigenschaften der Lidar-Daten liegt – kaum zu einer allgemeinen Verbesserung bei. Somit werden die besten Segmentierungsergebnisse bei Laserdaten erreicht, wenn die Gewichtung größtenteils auf dem Parameter *color* liegt.
Auch das Definieren des *scale parameter*, der als Abbruchkriterium die Größe der Segmente bestimmt, ist keine einfache Aufgabe. Wegen des streng hierarchischen Aufbaus werden durch das Schaffen der ersten Segmentierungsebene sämtliche weitere Ebenen bzw. Segmentgrenzen mit beeinflusst, da die Segmentgrenzen verschiedener Ebenen deckungsgleich bleiben.
Damit ist das richtige Erstellen und Definieren (das betrifft sowohl obige Einstellungen als auch die Reihenfolge) der Segmentierungsebenen ein entscheidender Schritt im Aufbau der objektorientierten Gebäudedetektion. Es muss der passende Detaillierungsgrad getroffen werden, um dann aus den Segmenten die „*objects of interest*“ extrahieren zu können.

Die Segmentierung wird am nDSM ausgeführt und erfolgt in zwei Ebenen:
Die erste Ebene (*level 1*) dient der Generierung relativ feiner Segmente, sie wird nicht klassifiziert. Aufbauend auf dieser ersten Segmentierungsebene wird eine zweite, darüber liegende Ebene (*level 2*) segmentiert. Sämtliche weitere Segmentierungsebenen werden nach erfolgter erster Klassifikation durch eine sog. „*classification-based segmentation*“ gebildet. Bei diesem Vorgang werden nach Definition entsprechender *structure groups* sämtliche benachbarte Bildobjekte, die derselben Objektklasse angehören, zu einem einzigen, größeren Segment zusammengefasst. Auf diese Weise entsteht ein neuer *level*, für den wiederum passende Klassifikationsregeln erstellt werden müssen.

Die Erfahrung mit den segmentierten Daten zeigt, dass die Ergebnisse nicht immer die Erwartungen erfüllen: Ursache sind die z. T. in den Laserdaten zu wenig markant ausgeprägten Übergänge zwischen den gesuchten Objekten und ihrer Umgebung, wie es beispielsweise zwischen Häusern und nahe stehenden Bäumen der Fall ist.
Die Eigenschaften der Laserdaten bzw. die der Segmentierungsergebnisse sind weiters ein Grund dafür, dass Gebäudepolygone keine markanten rechtwinkeligen Kanten aufweisen. Somit können theoretisch hilfreiche Formparameter (z. B. die Anzahl der Kanten auf Basis von *polygon shapes*) nicht sinnvoll für die Klassifizierung verwendet werden.

7.3 Klassifikation der Laserdaten

Im Anschluss an die Segmentierung wird eine Klassifikation der gebildeten Segmente durchgeführt. Grundgerüst der Klassifikation in eCognition ist die Klassenhierarchie (*class hierarchy*). Die Klassenbeschreibungen für die *class hierarchy* werden wissensbasiert erstellt, die erstellten Regeln werden beim Klassifikationsprozess auf jedes Segment angewendet. Das Bildobjekt wird der Klasse zugeordnet, deren Regel am meisten zutrifft. eCognition unterscheidet drei Gruppen mit insgesamt über 70 Merkmalen, die zur Klassifikation herangezogen werden können. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, selbst Merkmale zu definieren (*customized features*), so z. B. den NDVI. Die Merkmale können vererbt werden, oder sie lassen sich durch logische Operationen verknüpfen. Auf diese Weise lassen sich sehr komplexe Regelsätze formulieren.

Das Wissen zur Klassifikation der Bildobjekte wird auf drei Arten beschrieben:

- *Inheritance:* Klassenbeschreibungen der „Elternklassen“ (*parent classes*) werden an die „Kinderklassen“ (*child classes*) vererbt.
- *Groups:* die Bildung von *groups* ermöglicht die Kombination verschiedener Klassen zu einer gemeinsamen, übergeordneten semantischen Klasse.
- *Structure:* hier werden Klassen für eine *classification-based segmentation* zusammengefasst.

Das Hauptproblem im Zusammenhang mit der Gebäudedetektion ist die Trennung von Gebäuden und Vegetation innerhalb der erhöhten Regionen. Zur Unterscheidung und Klassifikation der relevanten Klassen sind innerhalb der segmentierten Bildobjekte geeignete spezifische Objektmerkmale zu extrahieren. Es gilt möglichst einfache, allgemein gültige Regeln für die Identifikation der Gebäudepolygone zu finden.
Die meisten Ansätze zur Gebäudedetektion funktionieren zufrieden stellend bei freistehenden Häusern. Sind mehrere Gebäude in Form einzelner Häuserblocks direkt benachbart, lässt sich nur der Block darstellen. Eine separate Behandlung von einzelnen Häusern stellt ein Problem dar.

Städtisches Gebiet verlangt z. T. nach anderen Regeln als ländliches: Die verschiedenen Arten und Formen von Gebäuden, das Vorhandensein von Vegetation in unmittelbarer Nachbarschaft der Gebäude etc. differieren stark und sind bei der Erstellung der Klassifikationsregeln zu beachten. Im ländlichen Gebiet ist der Algorithmus tendenziell weniger komplex als in städtischem.
Allgemein ist bei der Erstellung der Klassifikationsalgorithmen zu bedenken, dass die Übertragung auf andere Gebiete mit steigender Komplexität des Algorithmus schwieriger wird, da sich die Anpassungen einzelner Schwellwerte unübersichtlicher und mühsamer zu gestalten beginnt.

Nun wird auf den ersten Schritt der Detektion von Gebäuden bzw. allgemein erhöhter Regionen eingegangen. Im nDSM treten die erhöhten Regionen deutlich durch eine entsprechend hellere Farbe hervor (Abb. 7-1).

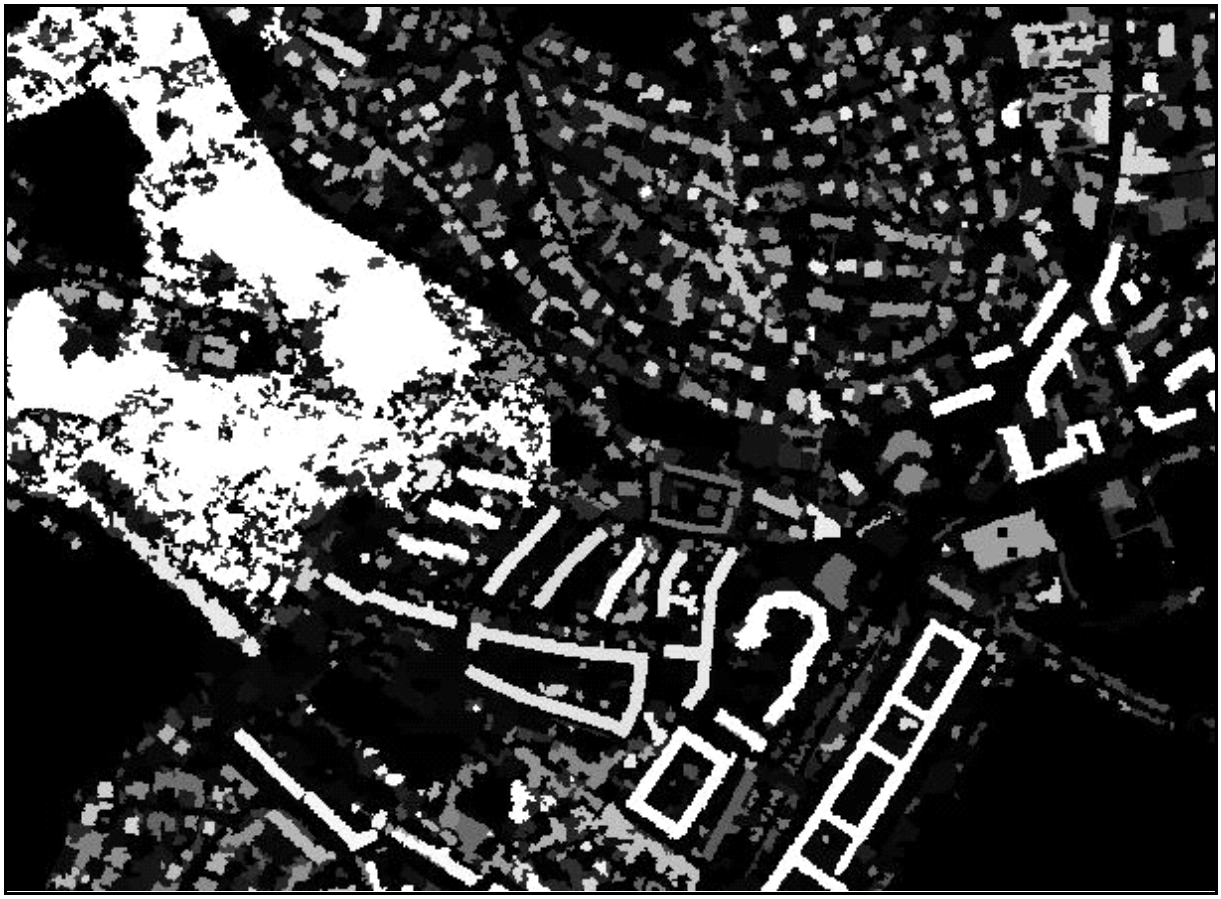

Abb. 7-1: Ausschnitt aus einem nDSM in eCognition

Die zwei maßgeblichen Klassen erhöhter Objekte im städtischen wie auch im ländlichen Gebiet sind „Gebäude“ und „Vegetation“ (in Form einzeln stehender Bäume, Hecken, Baumgruppen oder ganzer Waldflächen). Es kann also vereinfachend davon ausgegangen werden, dass die erhöhten Segmente, die als „*elevated*“ klassifiziert werden, einer dieser beiden Objektklassen angehören (Abb. 7-2). Die Gebäudedetektion reduziert sich somit auf eine Trennung der erhöhten Regionen „*elevated*“ in die Klassen „Gebäude“ und „Vegetation“. Nicht erhöhte Regionen bilden die Klasse „*ground*“.

Abb. 7-2: Ergebnis einer ersten Klassifikation: ***ground,*** ***elevated***

7.3.1 Beschreibung der verwendeten Merkmale

Gebäudetypische Attribute

Zur Extraktion der Gebäudeumrisse lassen sich folgende gebäudetypische Attribute benutzen:

- Gebäude weisen zum umgebenden Terrain eine gewisse Mindesthöhe auf.
  Mittels einer Schwellwertoperation auf das nDSM können erhöhte Segmente leicht identifiziert werden. Zu beachten ist hier, dass weder DSM noch DTM in ihrer Generierung fehlerfrei sind!
- Gebäude unterscheiden sich in ihrer Textur von Vegetation:
  Die Verwendung der Differenz zwischen erstem und letztem Puls (Diff FP/LP) als Texturmerkmal eignet sich gut für eine Trennung der beiden Klassen.
- Stehen zusätzlich Luftbilder zur Verfügung, so unterscheiden sich Gebäude in ihrer spektralen Zusammensetzung des reflektierten Lichtes von Vegetation:
  Aus CIR-Bildern bzw. unter Zuhilfenahme des NIR-Kanals bei multispektralen Satellitenbildern lässt sich Vegetation über den NDVI ermitteln. Unterschiedliche (Dach-)Materialien können aber den NDVI beeinflussen, eine fehlerhafte Erfassung ist möglich.

Verwendete Merkmale in der vorliegenden Arbeit

Folgende Merkmale werden in der vorliegenden Arbeit zur Aufstellung der Klassifikationsregeln eingesetzt:

- Höheninformation (nDSM) (Abb. 7-3 links)
- Texturinformation (Diff FP/LP) (Abb. 7-3 rechts)
- Spektrale Informationen (*mean , stddev, ratio,* NDVI, etc.)
- Nachbarschaftsbeziehungen, Beziehungen zu Subobjekten
- Formmerkmale (Längen-/Breitenverhältnis, Mindestfläche)

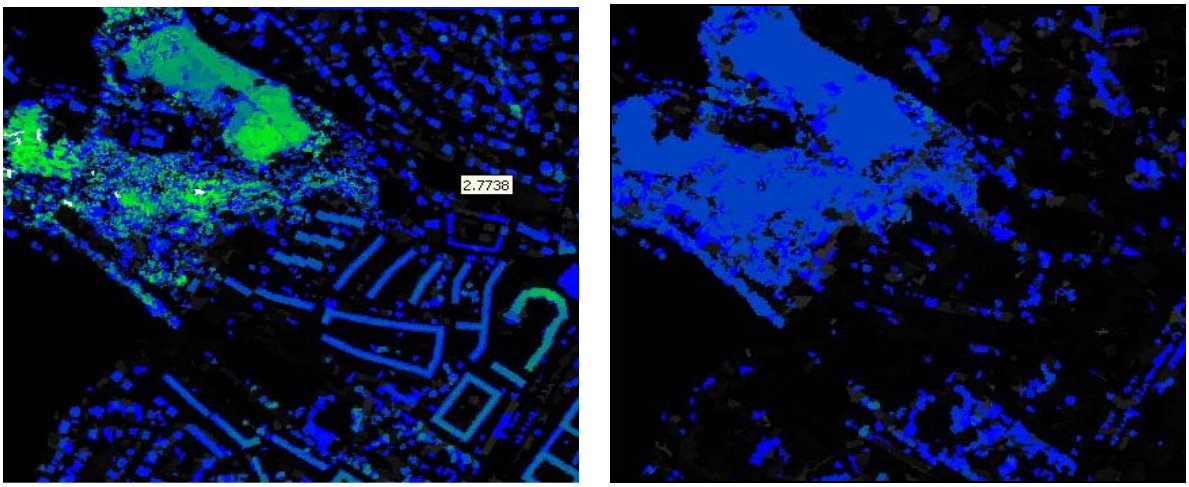

Abb. 7-3: Ausschnitte aus dem *feature view:* nDSM (links) und (Diff FP/LP) (rechts)

Der NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

Der NDVI ist ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal für die Trennung von Vegetation und sonstigen Objekten (Abb. 7-4). Durch die Blattpigmente gesunder, grüner Vegetation wird das Licht im sichtbaren Bereich des Spektrums stark absorbiert, die Vegetation erscheint dunkel. Im NIR-Bereich gibt es keine starke Absorption, hier streut gesunde Vegetation das Licht sehr gut, sie erscheint hell.

Eine starke Änderung wird durch Differenzbildung zweier Kanäle ermittelt: hohe Reflektanz im NIR, niedrige im sichtbaren Bereich (meist wird der rote Kanal verwendet, hier gibt es ein Absorptionsmaximum). Durch Ratiobildung wird der NDVI normiert und folgendermaßen berechnet:

(4) $$NDVI = (NIR - rot) / (NIR + rot)$$

Der Index bewegt sich in einem Wertebereich von [-1, +1]. Bei aktiven, grünen Pflanzen resultiert ein Wert > 0. Erfolgreich angewendet werden kann der NDVI allerdings nur bei ausreichend dichtem Bewuchs. Wird die Vegetation lichter, mischt sich die spektrale Signatur von Vegetation und Hintergrund.

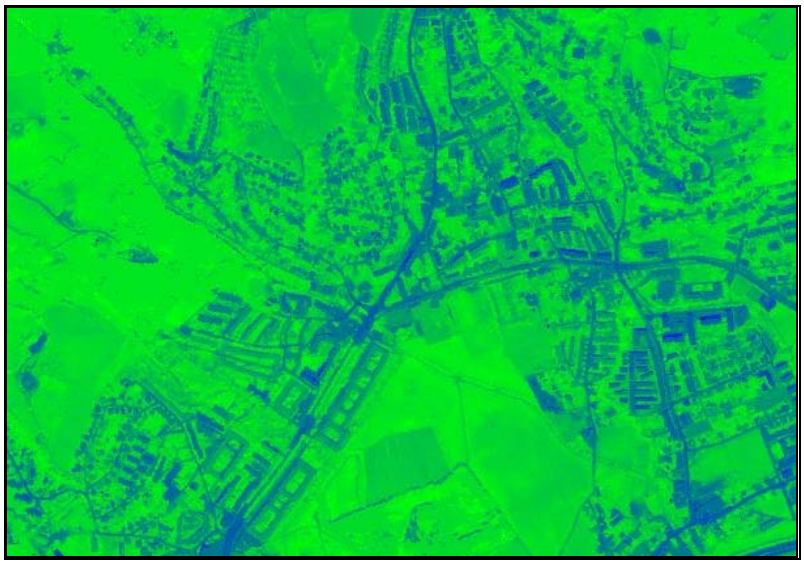

Abb. 7-4: Ausschnitt aus dem *feature view:* NDVI

Längen/Breitenverhältnis

Mit der Einführung eines Längen/Breitenverhältnisses als Unterscheidungsmerkmal wird versucht, lange, schmale Segmente auszuschließen, wie sie etwa bei Hecken auftreten. Jedoch lässt sich kein allgemein gültiger Schwellwert angeben, denn gelegentlich trifft man auch auf Gebäudepolygone, die ein ähnliches Verhältnis von Länge zu Breite aufweisen. Diese Gebäude würden dann fälschlicherweise der Klasse „Vegetation“ zugewiesen werden.

Genauere Formmerkmale (z. B. Rechtwinkeligkeit, Anzahl der Kanten oder Verhältnis von Fläche zu Umfang) sind aufgrund der unregelmäßigen Objektgrenzen nicht allgemein anwendbar. Zurückzuführen ist der Umstand, dass Gebäudepolygone keine markanten (rechtwinkeligen) Kanten haben, sowohl auf die Eigenschaften der Laserdaten als auch auf den Vorgang der Segmentbildung.

8. Ergebnisse

8.1 Darstellung der Gebäudedetektion

Die Ergebnisse der Gebäudedetektion aus Laserscannerdaten (Abb. 8-1) bzw. aus der Kombination von Laserdaten mit anderen Datensätzen (Abb. 8-2) werden anhand von Teilgebiet 2 dargestellt.

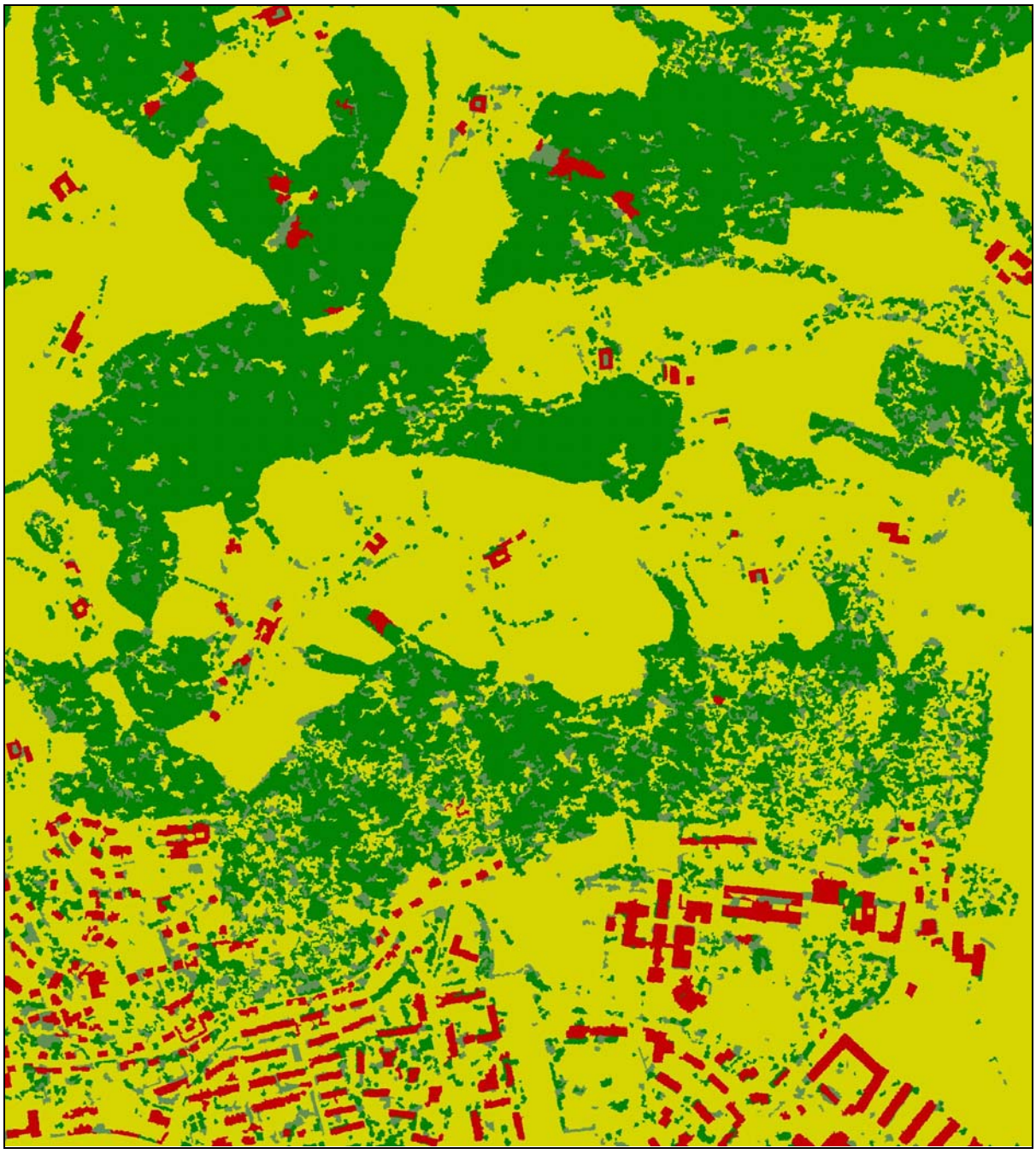

Abb. 8-1: Ergebnis der Gebäudedetektion: NUR Lidar

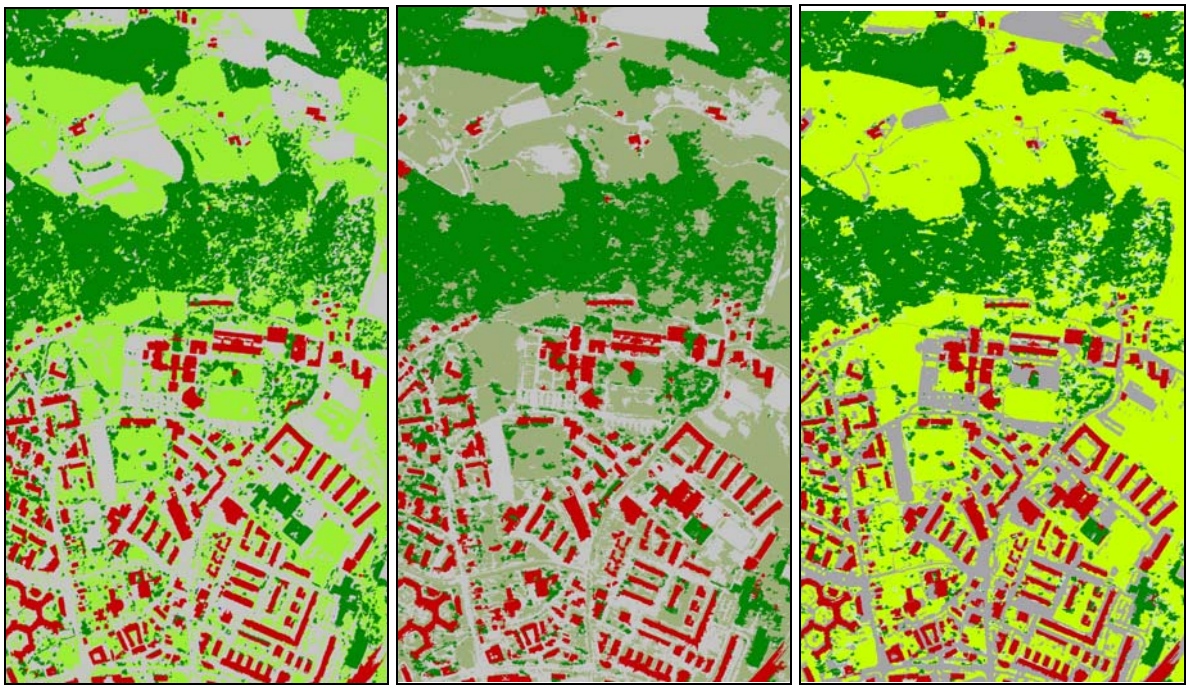

Abb. 8-2: Ergebnis der Gebäudedetektion:
Lidar + Orthophoto (links), Lidar + Ikonos (Mitte), Lidar + Ikonos/NDVI (rechts)

8.2 Diskussion

Die Ergebnisse der Gebäudedetektion sind durchwegs zufrieden stellend, wie auch anhand der Validierungsergebnisse zu sehen ist (siehe Kapitel 9.2). Zur Validierung ist anzumerken, dass weder Form noch Fläche der Gebäudesegmente in Betracht gezogen wurden. Weiters wurden die Segmente keinerlei Art von Glättung unterzogen. Ein Gebäudepolygon galt als korrekt detektiert, sobald sich an dieser Stelle bei der Überlagerung mit dem Orthophoto ein Haus befand. Der Überdeckungsgrad war kein Kriterium. Somit galt ein Gebäude auch dann als detektiert, wenn nur ein Teil der Dachfläche vom exportierten *shape* überdeckt war, oder umgekehrt ein angrenzender Baum im Gebäudepolygon mit eingeschlossen war. Genau hierin liegt auch der Nachteil des objektorientierten Ansatzes: Die Ergebnisse einer Segmentierung sind nie zu 100 % fehlerfrei. Werden z. B. Gebäude und angrenzende Vegetation in einem Segment zusammengefasst (entweder bei den Segmentierungen an sich, oder später bei einer *classification-based segmentation*), setzt sich dieser Fehler natürlich fort.

Die vorliegende Punktdichte der Laserdaten von 1 Punkt pro m² erwies sich als ausreichend für die Gebäudedetektion. Für eine weitergehende Modellierung wäre diese Auflösung allerdings zu gering. Die Ikonos-Daten mit einer Bodenauflösung von 1 m sind den Orthophotos mit deren geometrischer Auflösung von 0,25 m natürlich unterlegen. Deutlich zu erkennen ist die geringere Auflösung beim Einsatz für visuelle Vergleichszwecke, z. B. bei der Erstellung der Algorithmen. Auch für Validierungsaufgaben sind die Orthophotos deutlich besser geeignet. Die Satellitendaten mit dem zusätzlichen Kanal im nahen Infrarot bieten wiederum den Vorteil, dass der NDVI zur Trennung von

Vegetation und Gebäuden eingesetzt werden kann (siehe Kapitel 7.3.1): Der NDVI erwies sich innerhalb der spektralen Informationen als ein sehr gut geeignetes Merkmal für die Unterscheidung zwischen Vegetation und Gebäuden. Hinsichtlich der zu verarbeitenden Datenmengen verursachten die Orthophotos unverhältnismäßig lange Rechenzeiten, vor allem bei der Segmentierung. So sehr die höhere geometrische Auflösung für visuelle Zwecke von Vorteil ist, verursacht sie doch nicht die erhofften nennenswerten Verbesserungen bei der Gebäudedetektion an sich. Vielmehr resultieren daraus z. T. noch mehr zerfranste Segmentumrisse.

Die große Bandbreite an möglichen Erscheinungsformen der einzelnen Objekte muss bei der Erstellung der Regelwerke zur Klassifizierung berücksichtigt werden. Die einzelnen Objekte müssen durch entsprechende Wahl der Parameter möglichst flexibel beschrieben werden.
Der Algorithmus für die Gebäudedetektion aus Lidardaten in Kombination mit Orthophotos lässt sich nicht unmittelbar auf Lidardaten kombiniert mit Ikonos-Satellitenaufnahmen übertragen. Die Auswahl der spektralen Merkmale bzw. die Werte der einzelnen Parameter müssen angepasst werden.

Beschreibung ausgewählter Probleme

- Fehlklassifikation von Gebäuden aufgrund stark variierender Höhen einzelner Dachflächen:
  Große Höhenunterschiede innerhalb eines Segments äußern sich in einer großen Differenz zwischen erstem und letztem Puls (Diff FP/LP). Eine große Differenz ist aber für gewöhnlich ein Indiz für Vegetation (siehe Kapitel 6.3.3). Ohne zusätzliche spektrale Information lässt sich diese (wenn vielleicht sogar offensichtliche) Fehlzuweisung nicht korrigieren, sofern der Algorithmus allgemein gehalten werden soll (Abb. 8-3).

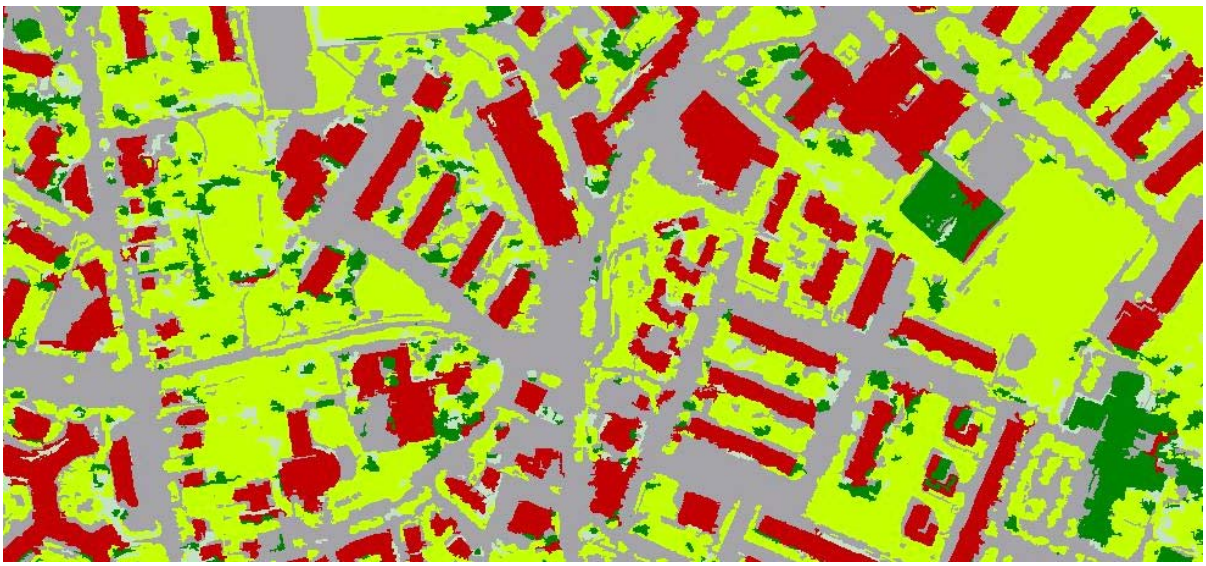

Abb. 8-3: Fehlklassifikation von Gebäuden mit stark variierenden Höhen in den Dachebenen

- Ein ähnliches Verhalten ist an Gebäudekanten zu beobachten: Aufgrund der Eigenschaften der Laserdaten können entlang von Dachkanten z. T. ebenfalls große Differenzen auftreten. Einige FP-Reflexionen repräsentieren noch die Dachfläche, während die LP-Echos der entsprechenden Laserpulse bereits von Reflexion am Boden stammen (Abb. 8-4).

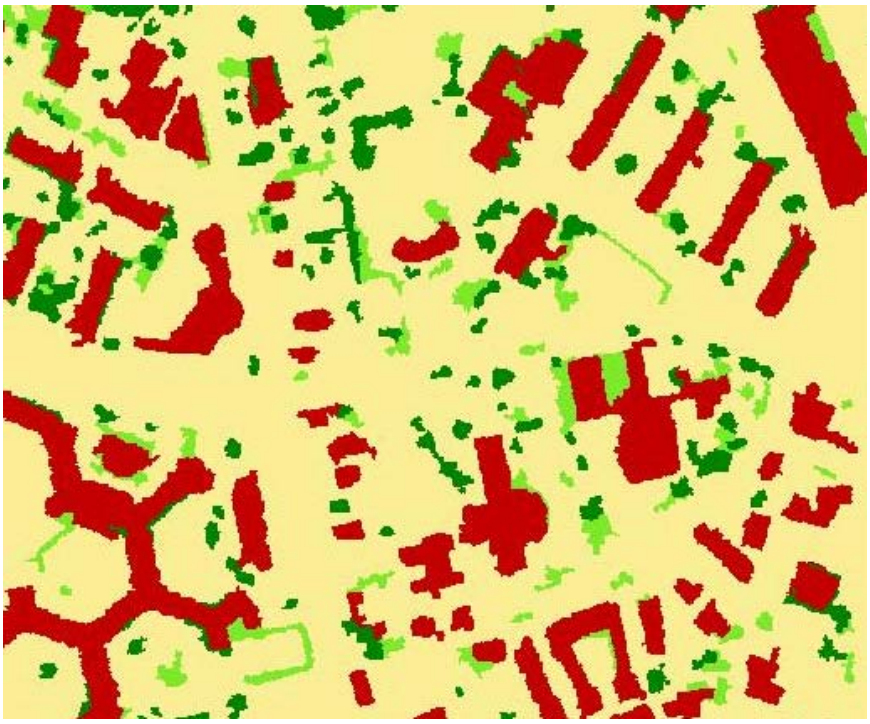

Abb. 8-4: Gebäudekanten

- Ähnlich schwierig ist die Trennung flächenmäßig kleiner Gebäude von einzelstehenden Bäumen oder kleinen Baumgruppen (z. B. bei Kleingartensiedlungen innerhalb einer städtischen Szene): Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung können die beiden Objektklassen ähnliche Werte für den Mittelwert des Merkmals (Diff FP/LP) im jeweils betrachteten Segment aufweisen. Setzt man den Wert hoch an, werden zu viele Bäume der Gebäudeklasse zugewiesen, wählt man einen tendenziell zu niedrigen Wert, werden umgekehrt Gebäude fälschlich als Vegetation klassifiziert. Auch hier kann man versuchen, mit spektraler Information eine teilweise Verbesserung zu erreichen.

  Eine Möglichkeit, diesem Problem zu begegnen, ist die Einführung einer Mindestfläche für Gebäude (z. B. 100 m²), denn es gilt: je kleiner ein Gebäude ist, desto schwieriger ist es zu detektieren bzw. korrekt zu klassifizieren. Gebäude mit einer Fläche > 100 m² können mit steigender Zuverlässigkeit von Vegetation unterschieden werden. Mit abnehmender Gebäudefläche wird die Trennung zusehends schwieriger, die korrekte Unterscheidung von kleineren Baumgruppen ist oftmals nicht möglich, auch nicht unter Verwendung zusätzlicher spektraler Merkmale. Der große Nachteil bei der Einführung einer Mindestfläche für Gebäude

ist, dass sämtliche Gebäude unterhalb dieser Grenze von der Detektion ausgeschlossen und als Vegetation klassifiziert werden (Abb. 8-5).

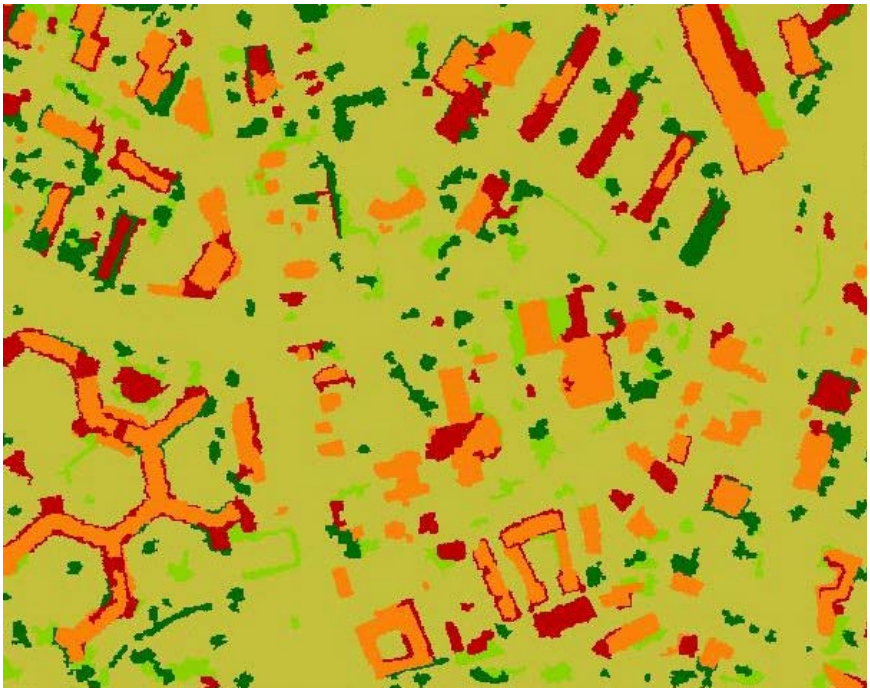

Abb. 8-5: „Gebäude“ vor Einführung einer Mindestfläche

8.3 Gegenüberstellung mit dem Ergebnis nach der Dempster-Shafer-Methode

Da vom vorliegenden Untersuchungsgebiet zusätzlich die Ergebnisse einer Gebäudedetektion nach der Theorie von Dempster-Shafer (Rottensteiner et al., 2004) zur Verfügung standen, wurde ein kurzer visueller Vergleich durch Überlagerung der detektierten Gebäudeumrisse vorgenommen (Abb. 8-6). Bei der Methode nach Dempster-Shafer werden tendenziell zu viele Gebäude detektiert, damit werden also (bewusst) Typ2 – Fehler (siehe Kapitel 9.1) in Kauf genommen. Die Gebäudeumrisse erfahren im Zuge der Detektion eine Glättung, dadurch wird eine ansprechendere Form der Umrisse erzielt (Abb. 8-7).

Abb. 8-6: Überlagerung der Gebäudeumrisse: eCognition (gelb) vs. Dempster-Shafer (violett)

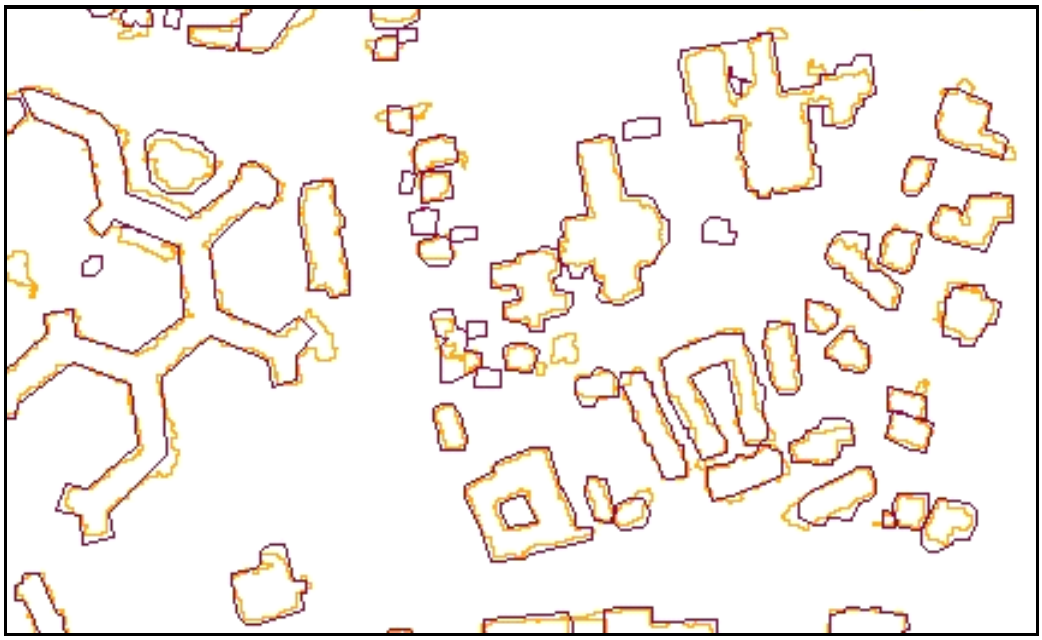

Abb. 8-7: Form der detektierten Gebäudeumrisse: eCognition (gelb) vs. Dempster-Shafer (violett)

9. Validierung

9.1 Beurteilung und Qualitätskontrolle

Die Unsicherheiten eines Modells hängen i. a. von mehreren einzelnen, an der Berechnung beteiligten Faktoren bzw. Verfahren ab:

- Datenquelle, Auflösung (*input data*)
- versteckte Annahmen hinter der Datenakquisition und Modellierung (Fehler im DSM, DTM,…)
- verwendeter Algorithmus; Approximations- und Interpolationseffekte
- Komplexität der Szene

Aktive Sensoren sind zwar robust, trotzdem können aufgrund von Materialeigenschaften der gescannten Oberfläche (z. B. bei sehr dunklen oder stark spiegelnden Flächen) Datenlöcher entstehen. Sofern es möglich ist, werden diese fehlenden Daten interpoliert. Ist das Ausmaß des Datenlochs zu groß oder wird eine unpassende Interpolationsmethode angewendet, entsteht eine fehlerhafte 3D-Rekonstruktion der Oberfläche (Hu, You, Neumann, 2003).
Die Beurteilung der Ergebnisse einer automatischen Bildinterpretation ist ein fundamentales Erfordernis. Die Grundvoraussetzung für jede Form von quantitativer Genauigkeitsanalyse in der Klassifikation ist die Verfügbarkeit von Kontrollgebieten, deren Klassenzugehörigkeit zu 100 % bekannt sein muss. Diese Forderung ist jedoch meist nur eingeschränkt gültig, da derartige zuverlässige Referenzdaten (*ground truth*) oft nicht zur Verfügung stehen. Eine Genauigkeitsanalyse mit Hilfe pixel-basierter Statistiken ist beim objektorientierten Ansatz nicht möglich. In diesem Fall müssen aus dem Klassifikationsergebnis exportierte Polygone (*object shapes)* mit Referenzdaten verglichen werden.

Es gibt verschiedene Genauigkeitsaspekte:

- thematische Genauigkeit (richtige Zuordnung bzw. Trennung der einzelnen Klassen)
- Positionsgenauigkeit (geometrische Genauigkeit)
- räumliche und inhaltliche Vollständigkeit (*completeness*)

Zur Bewertung des Interpretationsergebnisses existieren verschiedene Methoden, beispielsweise

- qualitativ: visueller Vergleich
- quantitativ: Kappa-Index

Für den Zweck der Evaluierung einer Gebäudedetektion, bei der das Hauptinteresse dem Aspekt der Vollständigkeit bzw. der thematischen Genauigkeit gilt, werden in vielen Ansätzen Indikatoren wie der

● Typ 1 – Fehler (ungerechtfertigte Untersagung, d. h. das Bildobjekt wurde nicht als Gebäude klassifiziert, obwohl es in Wirklichkeit ein Gebäude ist) und der

● Typ 2 – Fehler (ungerechtfertigte Genehmigung, d. h. das Objekt wurde als Gebäude klassifiziert, in Wirklichkeit handelt es sich aber nicht um ein Gebäude) verwendet (Schuster, Weidner, 2003).

Die Güte einer Klassifikation wird empirisch mittels einer Gegenüberstellung der klassifizierten Objekte mit Referenzdaten in einer sog. Konfusionsmatrix (oder Fehlermatrix) ermittelt. Die Spalten repräsentieren die Referenzdaten, die Zeilen das Ergebnis der Klassifikation (Abb. 9-1).

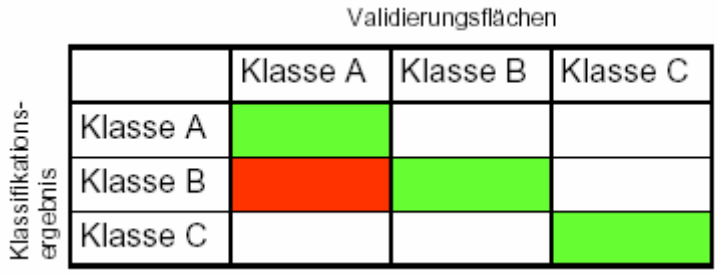

Abb. 9-1: Prinzip der Konfusionsmatrix

Verschiedenste Versuche wurden unternommen, die Informationen, die in der Konfusionsmatrix stecken, durch einen einzigen Zahlenwert wiederzugeben. In diesem Zusammenhang wurde der Kappa-Index entwickelt. Er ist ein Maß für die Gesamtgenauigkeit einer Klassifikation und berechnet sich aus allen Werten der Konfusionsmatrix.

Weitere Genauigkeitsmaße sind folgende:

● *User's Accuracy*, sie beschreibt die Fehler aus der Sicht des Kartenbenutzers: Zu wie viel Prozent wurden die Objekte richtig klassifiziert?

● *Producer's Accuracy*, sie dokumentiert Fehler aus der Sicht des Kartenherstellers: Gehören die klassifizierten Daten auch wirklich der korrekten Klasse an?

● *Overall Accuracy*, sie ist ein Maß für die Gesamtgenauigkeit der Klassifikation.

Die verschiedenen Genauigkeitsmaße berechnen sich wie folgt:

(5) ***User's Accuracy*** **= (korrekt klassifiziert * 100) / Summe Klassifizierung**

(6) ***Producer's Accuracy*** **= (korrekt klassifiziert * 100) / Summe Referenz**

(7) ***Overall Accuracy*** **= (korrekt klassifiziert * 100) / Gesamtsumme**

Die Definitionen für C*ompleteness*, C*orrectness* und *Quality* in (Heipke et al., 1997) lassen sich problemlos für die Gebäudedetektion übernehmen:

(8) $$\textbf{\textit{Completeness}} = TP / TP + FN$$

(9) $$\textbf{\textit{Correctness}} = TP / TP + FP$$

(10) $$\textbf{\textit{Quality}} = TP / TP + FP + FN$$

Folgende Abkürzungen gelten:
TP (*true positive*): Gebäude wurde klassifiziert, ist auch vorhanden
FN (*false negative*): Gebäude wurde nicht klassifiziert, obwohl in Wirklichkeit vorhanden
FP (*false positive*): Gebäude wurde klassifiziert, ist in Wirklichkeit aber nicht vorhanden

Die zuverlässigste Kontrollmöglichkeit erhält man durch Überlagerung der klassifizierten Gebäudeumrisse mit Referenzdaten einer manuellen Digitalisierung. Stehen aktuelle Katasterdaten zur Verfügung, lassen sich die *shapes* aus der Gebäudedetektion auf einfache Weise mit den Gebäudegrundrissen überlagern und verifizieren.
Eine weitergehende Qualitätsanalyse ohne Vorhandensein von Referenzdaten lässt sich z. B. auch durch Projektion der detektierten Gebäudeumrisse auf hochauflösende Luftbilder durchführen.
Zur Kontrolle des Klassifikationsergebnisses ohne Überlagerung mangels digitalisierter Daten lassen sich Orthophotos oder Satellitenaufnahmen für einen visuellen Soll – Ist – Vergleich nutzen.

9.2 Validierung der beiden Teilgebiete

In der Folge wird die Güte der Klassifikation der beiden Teilgebiete bestimmt.

Die Validierung erfolgt mittels Überlagerung der aus eCognition exportierten Gebäudeumrisse mit den Orthophotos. Beurteilt werden sämtliche Polygone auf ihre Zugehörigkeit:

- korrekt klassifizierte Gebäude (TP), (TP) = Anzahl der (*samples*) minus (FP)
- nicht detektierte oder fälschlich als Vegetation klassifizierte Gebäude (FN)
- fälschlich als Gebäude klassifizierte Polygone (FP)

Aus diesen Daten werden anschließend die Genauigkeitsmaße *Completeness*, *Correctness* und *Quality* nach Heipke et al. (1997) berechnet (siehe Kap. 9.1). Die Ergebnisse sind in (Tabelle 9-1 bis 9-4) sowie in (Abb. 9-2, 9-3) dargestellt.

Teilgebiet 1	Anzahl der klassifizierten Gebäude (samples)	Anzahl der NICHT klassifizierten Gebäude (FN)	Anzahl der fälschlich als Gebäude klassifizierten Polygone (FP)
NUR Lidar	353	66	13
Lidar+Ortho	437	27	36
Lidar+Ikonos	373	36	14
+NDVI Ikonos	376	59	7

Tabelle 9-1: Klassifikationsstatistik Teilgebiet 1

Teilgebiet 1	**Completeness**	**Correctness**	**Quality**
NUR Lidar	0,837	0,963	0,811
Lidar+Ortho	0,937	0,918	0,864
Lidar+Ikonos	0,909	0,962	0,878
+NDVI Ikonos	0,862	0,981	0,848

Tabelle 9-2: Genauigkeitsmaße Teilgebiet 1

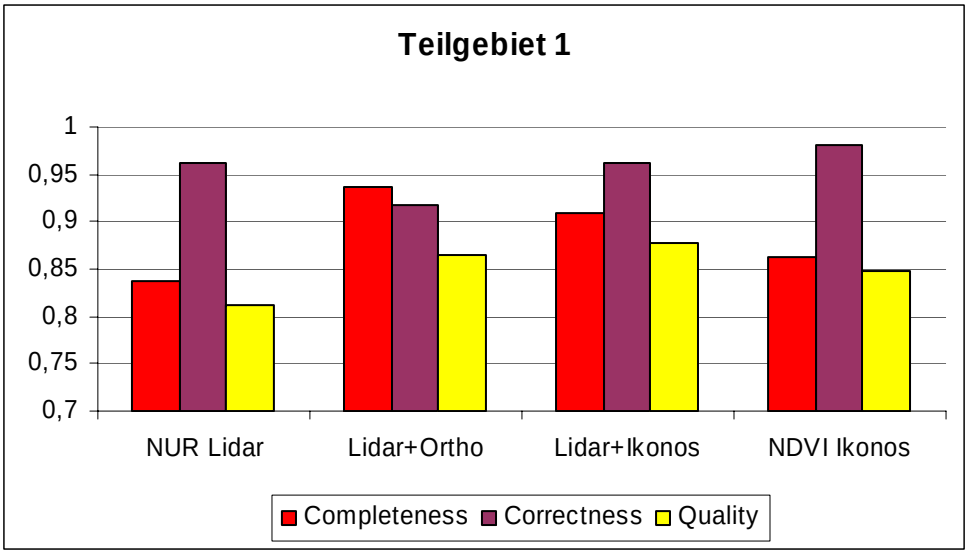

Abb. 9-2: Gesamtstatistik Teilgebiet 1

Teilgebiet 2	Anzahl der klassifizierten Gebäude (samples)	Anzahl der NICHT klassifizierten Gebäude (FN)	Anzahl der fälschlich als Gebäude klassifizierten Polygone (FP)
NUR Lidar	213	16	22
Lidar+Ortho	234	13	41
Lidar+Ikonos	226	16	30
+NDVI Ikonos	217	18	18

Tabelle 9-3: Klassifikationsstatistik Teilgebiet 2

Teilgebiet 2	Completeness	Correctness	Quality
NUR Lidar	0,923	0,897	0,834
Lidar+Ortho	0,937	0,825	0,781
Lidar+Ikonos	0,925	0,867	0,810
+NDVI Ikonos	0,917	0,917	0,847

Tabelle 9-4: Genauigkeitsmaße Teilgebiet 2

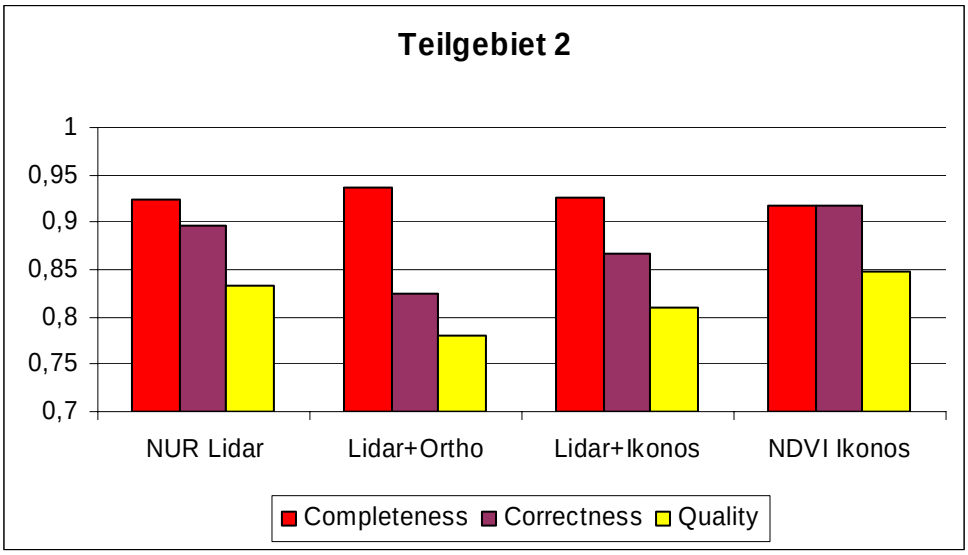

Abb. 9-3: Gesamtstatistik Teilgebiet 2

10. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Erstellung eines objektorientierten Ansatzes zur Detektion von Gebäuden aus Laserscannerdaten, dies z. T. in Kombination mit Multispektraldaten. Der Einsatz traditioneller, pixelbasierter Klassifikationsmethoden liefert bei den heute zur Verfügung stehenden hochauflösenden, multi-spektralen und multi-sensoralen Daten nicht mehr die gewünschten Ergebnisse. Regionenbasierte Ansätze bieten bei derartigen Daten eine interessante Alternative zu den traditionellen Methoden, sie sind aber genauso wenig frei von Nachteilen.

Es konnte gezeigt werden, dass der in eCognition verwirklichte regionenbasierte Ansatz mit der Erzeugung hierarchisch aufgebauter Segmentierungsebenen verschiedenen Maßstabs und Klassifizierung dieser Ebenen eine funktionsfähige Methode zur Lösung obiger Aufgabe darstellt. Die erzielten Ergebnisse waren durchwegs zufrieden stellend, wie sowohl der visuelle Vergleich als auch die Validierung durch Überlagerung der detektierten Gebäudeumrisse mit Orthophotos belegen.

Allerdings trägt der strikt hierarchische, sequenzielle Aufbau z. T. auch Probleme in sich, was die Analyse der verschiedenen Datenquellen und deren Kombinationen bzw. die Reihenfolge ebendieser betrifft. Wünschenswert wäre eine Möglichkeit zur Erstellung einer Segmentierungsebene unabhängig von bereits vorhandenen Ebenen im selben Projekt. Verschiedene Eingangsdaten liefern möglicherweise unterschiedliche Segmentgrenzen für dasselbe Objekt. Bei der Klassifikation lassen sich aber derartige Mischsegmente nicht entsprechend bearbeiten, Fehlzuweisungen können die Folge sein. Die Auswahl der passenden Segmentierungsparameter und *layer* ist ein relativ zeitintensiver Vorgang. Die Wirkungsweise der verschiedenen Parametereinstellungen bei der Segmentierung kann nur schwer vorhergesagt werden. Die Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit der Regeln auf andere Gebiete ist durch die Aufnahme eines sog. Protokolls problemlos möglich, nur die Parameter innerhalb des Algorithmus müssen angepasst werden. Was die Transparenz der erstellten Regelwerke für die Klassenzuweisung betrifft, ist allerdings zu bemerken, dass die Übersichtlichkeit mit steigender Komplexität stark abnimmt.

Die im Zuge dieser Arbeit erstellten Algorithmen sind in einem gewissen Rahmen sicherlich noch ausbaufähig. Zu überlegen wäre beispielsweise der Einsatz eines „Gebäude“-DSM, d. h. die Erzeugung eines DSM, das anstatt der in dieser Arbeit verwendeten FP-Daten aus den LP-Daten erstellt wird. Die LP-Daten enthalten weniger Vegetation, was sich bei der späteren Extraktion erhöhter Regionen aus dem nDSM vorteilhaft auswirken sollte. Verbesserungsmöglichkeiten bieten möglicherweise noch die Einstellungen der Segmentierungsparameter, genauso wie sich das gesamte Regelwerk erweitern oder eventuell auch umgestalten ließe.

Eine weitere Möglichkeit könnte sein, im Vorfeld der Klassifikation den Informationsgehalt von aus Laserdaten abgeleiteten Bilddaten in Hinblick auf nützliche Klassifikationsparameter zu untersuchen. Beispielsweise gibt das Gradientenbild (Sobel - Operator) markante Höhenübergänge, wie sie z. B. an

Hauskanten auftrete, wieder. Werden eindeutige Merkmale gefunden, lassen sich derart aus den Höhendaten abgeleitete Bilder in die Auswertung mit einbeziehen.

Literaturverzeichnis

Albertz (1991): Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt

Arefi, Hahn, Lindenberger (2003): Lidar data classification with remote sensing tools. ISPRS Workshop Comm. IV „Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II“, Stuttgart, Sept. 8-9 2003

Baatz und Mimler (2002): Bildobjekt-Primitive als Bausteine – Extraktion von Objekten „of interest“ bzw. anthropogenen Objekten basierend auf der expliziten Kanteninformation von Bildobjekt – Primitiven. In: Blaschke (Hrsg.): Fernerkundung und GIS: Neue Sensoren – Innovative Methoden. Wichmann Verlag, Heidelberg, 179 – 188

Baatz, Schäpe (2000): Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: Strobl et al. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000, Karlsruhe, Herbert Wichmann Verlag: 12–23

Blaschke (2003): Object-based contextual image classification built on image segmentation. In: Proceedings of IEEE GRSS Workshop on Advances in Techniques für Analysis of Remotely Sensed Data, pp. 113 – 119, Washington, DC, Oct. 2003

Brenner (2002): Automatische Stadtmodellierung aus Laserscannerdaten. Kartographie als Baustein moderner Kommunikation, Symposium 2002 in Königslutter am Elm, Kartographische Schriften, Band 6, Kirschbaum Verlag, Bonn

Brenner (2003): Building reconstruction from Laser Scanning and Images. Proc. ITC Workshop on Data Quality in Earth Observation Techniques, Enschede, The Netherlands, November 2003

Brenner, Dold, Jülge (2003): Integration von luftgestützten und terrestrischen Methoden zur Ableitung von 3D Stadtmodellen. 40. Sitzung AgA, Arbeitsgruppe Automation in der Kartographie, September 2003. In: Mitteilungen des Bundesamts für Geodäsie und Kartographie

Briese et al. (2001): Einsatzmöglichkeiten der flugzeuggetragenen Laserscanner. Tagungsband der 11. Internationalen Geodätischen Woche in Obergurgl. Instituts-Mitteilungen 19, Institut für Geodäsie der Universität Innsbruck (Hrsg.) S.17-26

Briese, Pfeifer, Dorninger (2002): Applications of the Robust Interpolation for DTM determination. Proc ISPRS, Comm. 3, Graz 9 – 13 Sept 2002, IAPRS, Vol. 34, 3A, pp. 55 – 61

Chen et al. (2004). Defining area at risk and its effect in catastrophe loss estimation: A dasymetric mapping approach. Applied Geography, 24(2), 97-117

Crosilla et al. (2005): Likelihood and accuracy analyses of 3D building models from airborne laser data. In: Workshop Italy-Canada 2005, Padova 17-18 maggio 2005

Elaksher, Bethel (2002): Reconstructing 3D buildings from Lidar data. IAPRS Vol. XXXIV, part 3A, commission 3, 102 – 107

Forlani, Nardinocchi (2001): Building detection and roof extraction form Lidar data. In: Gruen, Baltsavias, Van Gool (Eds.): Automatic Extraction of man - made objects from aerial and space images. Ascona 10 – 15 giugno 2001, pp. 319 – 330

Haala, Brenner (1999): Extraction of buildings and trees in urban environments. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54(2-3), 130–137

Heipke et al. (1997): Evaluation of automatic road extraction. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (32) 3-2W3, 47-56

Hofmann (2004): Analysis of TIN-structure parameter spaces in ALS data for 3D-building model generation. XXth ISPRS Congress, Commission 3, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey

Hofmann, Maas, Schulze (2002): Nachbarschaftsbasierte Segmentierung in Flugzeug-Laserscannerdaten. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung – 22. Wissenschaftliche Jahrestagung der DGPF, Bd. 11, S. 271 – 278

Hofmann, Maas, Streilein (2002): Knowledge-Based Building Detection Based on Laser Scanner Data and Topographic Map Information. PVC02 Photogrammetric Computer Vision, Proceedings of ISPRS Commission III, September 9 - 13, 2002, Graz, Austria. pp. A169-A174

Hofmann, Schwalbe (2004): Evaluation automatisch rekonstruierter Gebäudemodelle aus Flugzeuglaserscannerdaten. 24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 15. – 17. Sept, Halle/Saale

Hofstee, Islam (2004): Disaggregation of census districts: better population information for urban risk management. In: AARSE 2004: Proceedings of the 5th AARSE conference: Geoinformation sciences in Support of Africa's development, Nairobi, Oct. 18 – 21, 2004. 6p

Hoss (1997): Einsatz des Laser-Scanner-Verfahrens beim Aufbau des Digitalen Geländemodells (DGM) in Baden-Württemberg. Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, S. 131-142

Hu, You, Neumann, Park (2004): Building Modeling from Lidar and Aerial Imagery. ASPRS '04, Colorado, May 2004

Hu, You, Neumann (2003): Approaches to large-scale urban modeling. IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 23, no. 6, pp. 62-69, Nov/Dec 2003

Hug (1996): Entwicklung und Erprobung eines abbildenden Laseraltimeters für den Flugzeugeinsatz unter Verwendung des Mehrfrequenz-Phasenvergleichsverfahrens. Ph. D. Thesis

Hug, Ullrich, Grimm (2004): Litemapper-5600 – A Waveform Digitizing Lidar Terrain an Vegetation Mapping System. In: Thies, Koch, Spiecker, Weinacker (Eds.): Laser Scanner for Forest and Landscape Assessment. IAPRS, Vol. 36, Pt.8 / W2, 24 - 29

Hyyppae et al. (2004): Algorithms and Methods of Airborne Laser Scanning for Forest Measurements. In: Thies, Koch, Spiecker, Weinacker (Eds.): Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, Oct. 3-6, 2004, Freiburg, Germany, IAPRS Vol. 36, Pt. 8/W2, pp. 82-89

Hyyppae, Matikainen (2003): Automatic detection of buildings from Laser Scanner Data for map updating. IAPRSIS, Dresden, Germany, Vol. XXXIV, part 3 / W13, pp. 218 – 224

Jansa, Stanek (2003): Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 4; 262 - 270

Kaartinen et al. (2005): Accuracy of 3D City Models: EuroSDR comparison. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop „Laser Scanning 2005", Enschede, the Netherlands, Sept 12-14, 2005

Kraus (2005): Laserscanning und Photogrammetrie im Dienste der Geoinformation. Angewandte Geoinformatik 2005 – Beiträge zum 17. AGIT-Symposium Salzburg. In: Strobl, Blaschke, Griesebner (Eds.); Wichmann Verlag, 205, pp.386-396

Kraus (2000): Topographische Informationssysteme. Photogrammetrie Band 3, Dümmler Verlag Bonn, 419 Seiten

Kraus et al. (1997): Topographische Daten in bewaldeten Gebieten – ein Pilotprojekt mit Laser-Scanner-Daten. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 85, S. 174 – 181

Kressler, Steinnocher, Franzen (2005): Object-oriented classification of orthophotos to support update of spatial databases. In: Proceedings of the IGARSS 2005 Symposium. Seoul, Korea. July 25-29

Lohmann, Jacobsen (2003): Filterung segmentierter Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten. In: PFG (2004), Nr. 4, S. 279-287

Maas (2005): Akquisition von 3D GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning. Kartographische Nachrichten, Vol. 55, Heft 1, S. 3 – 11

Maas (2003): Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: User requirements and system performance. Photogramm. Wochen 2003, Universität Stuttgart

Maas, Vosselman (2004): Flugzeuglaserscanning. Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Heft 4 / 04

Matikainen et al. (2003): Automatic detection of buildings from laser scanner data for map updating. ISPRS Commission III. Workshop 3D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data.

Nardinocchi et al. (2001): Building reconstruction and visualization from Lidar data. In: IAPRSIS XXXIV part 5 / W12

Neubert und Meinel (2003): Evaluation of segmentation programs for high resolution remote sensing applications. In: Schroeder, Jacobsen & Heipke (Eds.): Procedings of the Joint ISPRS/EARSeL Workshop "High Resolution Mapping from Space 2003", Hannover, Germany, October 6-8, 2003

Neubert und Meinel (2002): Segmentbasierte Auswertung von IKONOS-Daten – Anwendung der Bildanalyse-Software eCognition auf unterschiedliche Testgebiete. In: Blaschke (Hrsg.): Fernerkundung und GIS: Neue Sensoren – Innovative Methoden. Wichmann Verlag, Heidelberg, 108 – 117

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

Rees (2001): Physical principles of remote sensing. Cambridge University Press

Rottensteiner (2005): Automatische Ableitung detaillierter Gebäudemodelle für 3D Stadtmodelle. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI) 2005, 4; 179 - 185

Rottensteiner et al. (2004): Building Detection by Dempster-Shafer Fusion of LIDAR Data and Multispectral Aerial Imagery. In: International Conference on Pattern Recognition, 23-26 August 2004, pages 339-342, Cambridge, UK

Rottensteiner et al. (2003): Building detection using Lidar data and multispectral images. Proceedings of DICTA, Sydney, Vol. 2, pp. 673 – 682

Rottensteiner, Briese (2003): Automatic Generation of Building Models from Lidar data and the integration of aerial images. Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data", Dresden, Deutschland, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIV, Part 3/W13, 8-10 October 2003, p. 174-180

Rottensteiner, Trinder, Clode, Kubrik (2004): Fusing Airborne Laserscanner Data and Aerial Imagery for the automated extraction of buildings in densly built-up areas. Proceedings of the XXth ISPRS Congress in Istanbul, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXV- B3, pp. 512-517

Ruijin Ma (2005): DTM generation and building detection from Lidar data. PhEngRS (71), No. 7, July 2005, pp. 847-854

Schenk (2001): Modeling and recovering systematic errors in airborne laserscanners. In: Torlegard (Ed.): Proceedings of OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm March 1-3, 2001

Schenk, Csatho (2002): Fusion of Lidar and aerial imagery for a more complete surface description. IAPRSIS, Vol. XXXIV / 3A, Graz, Austria, pp. 310-317

Schiele (2005): Ein operationelles Kalibrierverfahren für das flugzeuggetragene Laserscannersystem ScaLARS. Dissertation, Universität Stuttgart, 2005

Schiewe, Tufte, Ehlers (2001): Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. In: GeoBIT/GIS – Geographische Informationssysteme. 6: 34-39

Schleyer (2002): Das Laserscan-DGM von Baden-Württemberg

Schneider (2002): „Knowledge based methods of Analysis of Remotely Sensed Images for Landscape Ecology. In: Pillmann, Tochtermann (Eds.), EnviroInfo, 25-27. Sept. 2002, Vienna, 1, 538 – 545; IGU/ISEP, International Society for Environmantal Protection, Vienna

Schönemeier (1996): ATKIS-DGM5 mit Laser-Scanning. Niedersächsisches Landesverwaltungsamt

Schuster, Weidner (2003): „A new approach towards quantitative Quality Evaluation of 3D Building Models. In: Schiewe, Hahn, Madden, Sester (Eds.): Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II, ISPRS Workshop, Stuttgart

Schwalbe, Hofmann, Maas (2004): Gebäudemodellierung in reduzierten Parameterräumen von Flugzeug-Laserscannerdaten. Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation 4/2004

Seresht, Azizi (2000): Automatic Building Recognition from Digital Aerial Images. Proc. 19th Int'l Soc. Photogrammetry and Remote Sensing Congress (ISPRS), book 3B, ISPRS, 2000, pp. 792-798

Sithole, Vosselman (2003): Comparison of Filter Algorithms. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 34, part 3/W13, Dresden, Germany, pp. 71-78

Sohn (2004): Extraction of buildings from high-resolution satellite data and Lidar. XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey. 12-23 July, 2004

Suveg, Vosselman (2004): Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 58, Issues 3 – 4, Jan 2004, 202 – 224

Syed, Dare, Jones (2005): Semi-automatic 3D building model generation form Lidar and High Resolution Imagery. Proceedings of SSC2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis: The national biennial Conference of the Spatial Sciences Institute, September, 2005. Melbourne: Spatial Sciences Institute, pp. 512-522

Toposys (1996): Digital Elevation Models, services and products, 10 p.

Tovari, Vögtle (2004a): Classification Methods for 3D objects in Laserscannerdata. XXth ISPRS Congress, Commission 3, Istanbul, Turkey 2004

Tovari, Vögtle (2004b): Object classification in Laserscanning Data Workshop Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment, Instruments, Processing Methods and Applications, Oct. 3-6, 2004, Freiburg, Germany, IAPRS Vol. 36

Vögtle, Steinle (2003): On the quality of object classification and automated building modeling based on laser scanning data. In: IAPRSIS XXXIV / 3W13, pp. 149-155

Vögtle, Steinle (2000): 3D Modelling of buildings using Laser Scanning and Spectral Information IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam

Vosselman, Suveg (2001): Map based building reconstruction from laser data and images. In: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). Edited by Baltsavias, Gruen, Gool, Balkema, Tokyo, pp. 231 - 239

Wagner et al. (2004): From Single Puls to Full-Waveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges. ISPRS, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004

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

Weichselbaum et al. (2005): Sharpening census information in GIS to meet real-world conditions: the case for Earth Observation. Talk: Internat. Conference on Sustainable Development & Planning, Bologna; 12 – 14 Sept, 2005; in: Sustainable Development & Planning II

www.topoSys.com

Abkürzungsverzeichnis

ALS: Airborne Laserscanning

AOL: Atmospheric Oceanographic Lidar

ATM: Airborne Topographic Mapper

BEV: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

CHM: Canopy Height Model

CIR: Color Infrared

DEM: Digital Elevation Model

DGM: Digitales Geländemodell

dGPS: differentielles GPS

(Diff FP/LP): Differenz zwischen erstem und letztem Puls

DHM: Digitales Höhenmodell

DOM: Digitales Oberflächenmodell

DSM: Digital Surface Model

DTM: Digital Terrain Model

FN: false negative

FP: first pulse

FP: false positive

GIS: Geografisches Informationssystem

GLCM: Grey-Level Co-Occurrence Matrix

GPS: Global Positioning System

IMU: Inertial Measurement Unit

INS: Inertial Navigation System

IPF: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

LIDAR: Light Detection and Ranging

LP: first pulse

LRF: Laser Range Finder

NASA: National Aeronautics and Space Administration

ND: normalized difference

nDSM: normalized Digital Surface Model

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NIR: nahes Infrarot

RADAR: Radio Detection And Ranging

TIN: Triangulated Irregular Network

TP: true positive

VR: virtual reality

Birgit Braumann Karmeliterhofg. 2/1/20, 1150 Wien

Lebenslauf

5. 4. 1973	geboren als Tochter von Mag. Akad. Maler Bernhard Braumann und Maria Braumann ein Bruder: Mag. Dipl.-Ing. Alfried Braumann, geboren am 20. 9. 1977
1987-1991	Besuch des BORG Neumark a. W., Moserkellerg. 15, 5202 Neumarkt a. W.
11. 6. 1991	Ablegung der Reifeprüfung
4. 10. 1991	Inskription an der TU Wien, Studienrichtung Vermessungswesen
12. 6. 1995	1. Diplomprüfung

Sportlicher Werdegang

1996-2003	Mitglied des österreichischen MTB-Nationalteams (XC), Staatsmeistertitel 2001, Vizestaatsmeistertitel 2000
1996-	Nominierung und Teilnahme an einer Reihe von Europa- und Weltmeisterschaften sowie Erzielen einer Vielzahl nationaler und internationaler Erfolge