



Oberflächenmodelle aus Laserdaten

Norbert Pfeifer ¹

¹ *Delft University of Technology, Section of Photogrammetry and Remote Sensing, Kluyverweg 1, NL-2629 HS Delft, Niederlande*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **91** (4), S. 243–252

2003

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Pfeifer_VGI_200331,  
Title = {Oberfl{\a}chenmodelle aus Laserdaten},  
Author = {Pfeifer, Norbert},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {243--252},  
Number = {4},  
Year = {2003},  
Volume = {91}  
}
```





Oberflächenmodelle aus Laserdaten

Norbert Pfeifer, Delft

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird eine Übersicht über die Methoden zur automatischen Klassifizierung einer Punktwolke aus flugzeuggetragenen Laserscanneraufnahmen gegeben und ein Vergleich dieser Methoden angestellt. Aus den als Bodenpunkten klassifizierten Daten kann ein Geländemodell hoher Qualität berechnet werden. Besonders wird auf die mathematische Morphologie, auf die Dreiecksnetz- bzw. TIN-Verdichtung und auf die robuste Interpolation eingegangen. In einem zweiten Abschnitt wird die Erstellung von weiteren topographischen Modellen an Beispielen behandelt (Oberflächen- und Baumhöhenmodellen und Modelle im Stadtgebiet).

Abstract

This article gives an overview on the methods for automatic classification of point clouds captured with airborne laser scanning and presents a comparison of these methods. Digital terrain models of high quality can be computed from the classified ground points. Especially the methods of mathematical morphology, the triangular irregular network (TIN-) densification, and the robust filtering will be studied. In the second part, examples for the derivation of other topographic models (i.e. surface models, tree height models, and models in city areas) are presented.

1. Flugzeuggetragenes Laserscanning für die Topographie

Neben der Photogrammetrie hat sich das Laserscanning als eine viel genutzte Methode zur Erfassung der Topographie etabliert. Laserscanning bietet viele Vorteile, wie

- i) die Durchdringung der Vegetation und das Erfassen der Bodenfläche auch in bewaldeten Gebieten,
- ii) der hohe Automatisierungsgrad, der von der Datenerfassung bis zur Erstellung des digitalen Geländemodells (DGM) reicht,
- iii) die hohe Punktdichte (1 Punkt/m²), was eine sehr genaue Beschreibung der Geländefläche ermöglicht,
- iv) die Genauigkeit, ca. 10 cm in der Höhe, und
- v) das aktive System, das Messungen während der Nacht (z.B. über Flughäfen) oder über texturlosen Bereichen (z.B. Schnee) ermöglicht.

Diese vielen positiven Punkte müssen jedoch etwas relativiert werden. Die Qualität des Geländemodells nimmt in bewaldeten Gebieten mit zunehmender Dichte der Vegetation ab. Durch die geringere Anzahl der Punkte, die am Boden gemessen werden, wird auch die Beschreibung der Geländefläche unzuverlässiger. Ein weiterer Nachteil ist, dass mit dem Laserscanning keine Geländekanten gemessen werden.

Die Automatisierung hat vor allem mit zwei Hindernissen zu kämpfen. Einerseits sind das *systematische Fehler* in den Laserpunkten. Sie entstehen bei fehlerhafter Erfassung des Flugpfades mit GPS und Inertialsystemen, wobei das Verhältnis der GPS-Messfrequenz zur Laser-Entfernungsmessfrequenz ca. 1:1000 ist. Besonders tragen aber Fehler in der Kalibrierung des Laser Range Finders (LRF, Entfernungsmesser), des Scanners (Ablenkungseinrichtung), sowie in der gegenseitigen Orientierung aller Komponenten dazu bei. Die systematischen Fehler erkennt man beispielsweise im Überlappungsbereich benachbarter Streifen. Andererseits ist die Ableitung der Geländemodelle in der Praxis oft noch nicht so weit automatisiert, wie es möglich wäre. In der sogenannten *Filterung* der Laserdaten werden die Punkte in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte (auf Hausdächern, in Baumkronen, . . .) klassifiziert. Anbieter von Laserscannerdaten verwenden oft einfache Ansätze zum Filtern der Daten und müssen Zeit in die manuelle Verbesserung der so erhaltenen Geländemodelle investieren.

Um das hohe Genauigkeits- und Automatisierungspotenzial des Laserscannings auszunutzen, müssen also die systematischen Fehler eliminiert werden [1], die Durchdringungsraten in bewaldeten Gebieten ausreichend hoch sein¹, und es müssen qualifizierte Methoden zur

¹) Derzeit sind noch kaum Studien vorhanden, die die Abnahme der Genauigkeit der Geländemodelle im Wald aufgrund niedriger Durchdringungsraten quantifizieren.

Filterung der Daten eingesetzt werden. Untersuchungen der Genauigkeit, die am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien durchgeführt worden sind [2], liefern folgende Ergebnisse: Die erreichbare Genauigkeit ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit (Asphalt, Wiese, Büsche, . . .) und kann sogar 5cm erreichen, wenn alle systematischen Fehler eliminiert werden. Weiters nimmt die Genauigkeit mit zunehmender Geländeneigung ab.

Der vorliegende Artikel soll einen Überblick über die Methoden der qualifizierten Filterung der Laserdaten geben, mit denen Geländemodelle von hoher Qualität automatisch berechnet werden können. Nach einer Begriffsbestimmung (Geländemodell, Oberflächenmodell, . . .) werden drei Filteralgorithmen und Varianten dazu vorgestellt und verglichen. Zwei der Methoden sind in kommerziellen Softwarepaketen implementiert. Anschließend wird kurz auf die Ableitung weiterer topographischer Modelle (Kronenmodellen, Oberflächenmodelle, . . .) eingegangen.

1.1. Begriffsbestimmung für digitale Modelle

Die Erstellung von (mathematischen) Modellen, die die Topographie beschreiben, ist eine der wichtigsten Anwendungen des flugzeuggetragenen Laserscanning. Diese Modelle sind nicht Selbstzweck, sondern ein Zwischenschritt um bestimmte Anwendungen auf Basis dieser

digitalen Modelle, ebenfalls automatisch auszuführen (Höhenschichtlinien für topographische Karten, Überschwemmungssimulationen, . . .). Neben dem Begriff DGM werden oft auch die Begriffe DTM, DSM, DOM, DEM und DHM verwendet, die teilweise verschiedene Modelle beschreiben. Das Ziel ist hier nicht, die einzig gültige Nomenklatur vorzuschlagen, sondern eher einen Überblick über die verwendeten Begriffe zu geben (siehe auch Abb. 1). In Klammern sind die englischen Bezeichnungen angegeben.

DHM (DEM): digitales Höhenmodell (digital elevation model). Ein DHM ist die Beschreibung der Höhe der Erdoberfläche², parametrisiert über geographischen Koordinaten (Länge, Breite) oder einem planimetrischen Referenzsystem (System der Landesvermessung oder lokale Systeme). Die Datenstruktur (regelmäßiges Raster, Triangulierung, . . .) ist damit nicht festgelegt.

DGM (DTM): digitales Geländemodell (digital terrain model). Ein DGM beschreibt – so wie ein DHM – die Höhen der Erdoberfläche. Der Begriff ist spezifischer als DHM, weil explizit festgelegt wird, welche Höhen, nämlich die Geländehöhen, modelliert werden. Teilweise wird der Unterschied zum DHM auch darin gemacht, dass ein DGM im Unterschied zum DHM Geländekanten und Strukturlinien enthält. Dementsprechend sind die verwendeten Datenstrukturen das ,hy-

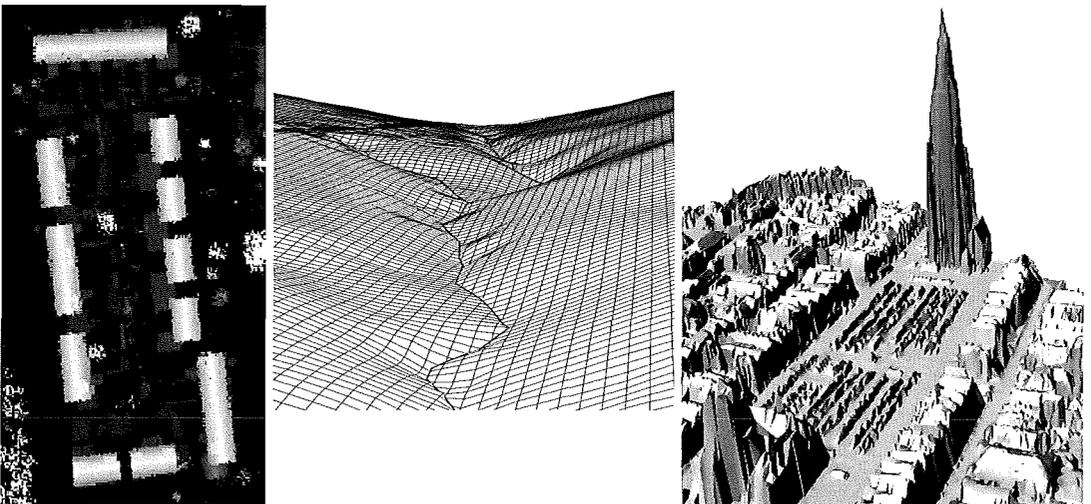


Abb. 1: Digitale Modelle aus Laserdaten. Links: Rastermodell der Originaldaten in einer Ortschaft (Wijhe, Niederlande, Section of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Delft). Mitte: Geländemodell mit Bruchlinie in Form eines hybriden Gitters (Wienerwald, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien). Rechts: Oberflächenmodell in Form einer Triangulierung (Delft, Niederlande).

²) Oft werden auch andere Flächen damit beschrieben, beispielsweise die Marsoberfläche [3].

bride Raster' [4] (Gitter mit zusätzlichen Linien) und die Triangulierung. Ein Nachteil der Triangulierung ist, dass die zufälligen Messfehler direkt ins Geländemodell übernommen werden und durch die unregelmäßige Punktanordnung lange, schmale (und steile) Dreiecke entstehen, die das Gelände nur schlecht beschreiben.

DOM (DSM): digitales Oberflächenmodell (digital surface model). Dabei handelt es sich um das Modell, das die oberste Fläche aus der Vogelperspektive beschreibt. Was offenes Gelände und Häuser betrifft, so ist dieser Begriff recht eindeutig: Im offenen Gelände ist das DOM gleich dem DGM, bei Häusern läuft es aber über die Dachfläche. In bewaldeten Gebieten wird die Oberfläche als jene Fläche definiert, die durch die in einander greifenden Baumkronen gebildet wird, wobei es natürlich verschiedene Generalisierungsstufen gibt. Unsicher wird der Begriff in jenen Fällen, wo die oberste Fläche starken Schwankungen unterliegt (z.B. Weizenfelder, jahreszeitliche Veränderung) oder klein ist (z.B. kleine Baumgruppe im offenen Gelände).

nDOM (nDSM): normalisiertes digitales Oberflächenmodell. Darunter versteht man ein Modell, das die Höhe der Objekte (Häuser, . . .) über dem Gelände beschreibt. Man erhält es z.B. durch Subtraktion eines DOM von einem DTM.

DSM, TIS: digitales Situationsmodell, Topographisches Informationssystem. Diese Modelle beinhalten weiterführende Komponenten als die oben beschriebenen Flächen-Modelle (z.B. Bodenqualität, . . .) [4].

Diese Liste ließe sich noch beliebig fortsetzen, beispielsweise für das Kronenmodell (canopy model), aber ein einheitlicher Gebrauch ist für diese Begriffe nicht gegeben.

2. Filterung von Laserdaten

Flugzeuggetragene Laserscanner registrieren Punkte auf jenen Flächen, die vom Laserstrahl getroffen werden. Das ist einerseits die Gelände- fläche, aber auch Dachflächen und Blätter auf Bäumen reflektieren den Laserstrahl. Auch sehr kleine Flächen, wie bspw. Stromleitungen, können eine Echo hervorrufen. Die Punktwolke die man so erhält, enthält in erster Linie geometrische Information über die reflektierende Fläche, aber keine semantische Information. Um ein Modell des Geländes oder der Baumkronen abzulei-

ten muss daher die Punktwolke klassifiziert werden (z.B. Trennung der Boden-(Gelände-)Punkte von den „Nicht-Boden“-Punkten). Diese Aufgabe wird als Filterung bezeichnet³. Im Folgenden werden drei Methoden genauer vorgestellt: die morphologische Filterung [5] die progressive TIN-Verdichtung [6] und die robuste Interpolation [7]. Außerdem wird der hierarchische Zugang, der für die robuste Interpolation entwickelt worden ist, beschrieben. Für jede Methode werden auch Varianten bzw. verwandte Ansätze angegeben. Es werden auch Methoden vorgestellt, die keiner der drei obigen Methoden ähnlich sind, und ein kurzer Vergleich der Methoden schließt dieses Kapitel.

2.1. Morphologische Filterung

Der morphologische Filter arbeitet mit einem ‚Strukturelement‘, das die Geländehöhenunterschiede in Abhängigkeit von der Entfernung beschreibt. Je größer die horizontale Entfernung, umso größer darf auch der (positive) Höhenunterschied vom ersten zum zweiten Bodenpunkt sein. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2, links dargestellt, wobei das Strukturelement die oben-unten umgekehrte Version dieser Kurve ist, und rotationssymmetrisch zur vertikalen Achse. Dieses Strukturelement kann durch Annahmen über die Geländeneigung (z.B. maximal 30%) oder mit Trainingsdatensätzen für einen bestimmten Geländetypus bestimmt werden. Werden für das Training nur Bodenpunkte herangezogen, so erhält man ein Strukturelement, das keine Bodenpunkte ausfiltert, ist außer den Bodenpunkten auch eine separate Menge von Nicht-Bodenpunkten gegeben, so lässt sich ein Strukturelement bestimmen, mit dem die Klassifizierungsfehler (Boden als Vegetation und umgekehrt) minimiert werden [5].

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 (in der Abbildung ist der Radius 10 m) „hängenbleibt“ und die Verschiebung gestoppt wird. Ist dieser Punkt nicht das Zentrum, also der Punkt auf dem das Strukturelement zentriert worden ist, dann ist der untersuchte Punkt kein Geländepunkt. In dieser Art wird die gesamte Punktwolke klassifiziert. Diese Methode wird in [8] erweitert, wobei das Strukturelement in Abhängigkeit der Neigung eines grob abgeschätzten DGMs verändert wird.

³) Bei der hydrologischen Vermessung mit Fächerecholoten erhält man Daten mit ähnlichen groben Fehlern, allerdings über und unter dem Meeresboden, und die Filterung wird dort als Data-Cleaning bezeichnet.

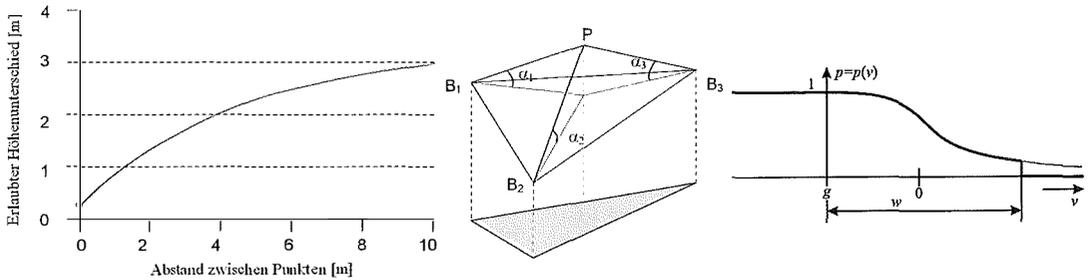


Abb. 2: Links: Erlaubter Höhenunterschied zwischen zwei Bodenpunkten in Abhängigkeit von der Entfernung (nach Vosselman, 2000). Mitte: Der Punkt P wird als Bodenpunkt akzeptiert, wenn die Winkel α zu den Bodenpunkten B_i ($i=1,2,3$) unter bestimmten Schwellwerten sind (nach Axelsson, 2000). Rechts: Gewichtsfunktion für die Berechnung von Gewichten auf Basis der Verbesserung (positive Werte entsprechen Punkten, die über der Fläche liegen). Zu beachten ist, dass die positive z-Richtung in der linken und mittleren Zeichnung nach oben zeigt und in der rechten Zeichnung nach rechts.

In [9] ist die Anwendung der morphologische Operation „Öffnung“ zur Filterung von Laserdaten beschrieben. Ein Fenster wird über die Daten bewegt, und der niedrigste Punkt im Fenster wird als Bodenpunkt angesehen, und Punkte bis zu einem bestimmten Höhenunterschied zu diesem Bodenpunkt ebenso. Das entspricht einem horizontalen Strukturelement in der Höhe des Schwellwerts. Der Vorgang wird mit verschiedenen Fenstergrößen wiederholt und die Punkte erhalten Gewichte in Abhängigkeit der Fenstergröße (multi-level approach). Zum Schluss wird eine Flächeninterpolation (-approximation) unter Berücksichtigung der Gewichte durchgeführt.

In [10] ist der 'dual rank filter' für die Filterung von Laserdaten in einem regelmäßigen Raster, vergleichbar einem digitalen Bild, beschrieben, ebenfalls eine Anwendung der mathematischen Morphologie. Gegebenenfalls ist eine Rasterung der Daten vorzunehmen. Die Fenstergröße wird automatisch bestimmt, und muss so groß sein, dass das Fenster nicht vollständig im größten Haus im Datensatzes Platz hat. Im ersten Schritt der Filterung wird jede Rasterhöhe im DGM mit der k-niedrigsten Höhe im Fenster ersetzt (Erosion) und im zweiten Schritt jede Rasterhöhe mit der k-höchsten im Fenster (Dilatation). Der Wert k ist der Rang des Filters.

2.2. Progressive TIN-Verdichtung

Für die Anwendung dieses Filters wird als erster Schritt ein TIN (Triangular Irregular Network, eine Triangulierung) auf Basis von wenigen, sicheren Bodenpunkten gebildet. Diese erhält man durch Einteilung des gesamten Gebietes in große Bereiche, wobei in jedem Bereich der niedrigste Punkt gewählt wird. Für jedes Dreieck wird aus den innerhalb liegenden Punkten ein

Bodenpunkt gesucht. Dazu werden der Reihe nach die Abstände der Punkte zu den Dreieckseckpunkten untersucht und die Winkel, die die Verbindungen von den Eckpunkten zum untersuchten Punkt mit der Dreiecksfläche bilden (Abb. 2, Mitte). Liegen diese Werte unter bestimmten Schwellen, so wird der Punkt als Bodenpunkt akzeptiert und der Algorithmus arbeitet auf dem nächsten Dreieck weiter. Lässt sich kein solcher Punkt finden, dann enthält das Dreieck keine Bodenpunkte. In dieser Art wird die Triangulierung schrittweise verdichtet.

Die Kriterien können natürlich von den oben beschriebenen abweichen und in [6] ist beschrieben, dass auch bei Höhengsprünge innerhalb des Geländes alle Bodenpunkte als solche klassifiziert werden. Eine Version dieses Algorithmus ist in der Software TerraScan (Terrasolid, Finnland) implementiert.

Eine vergleichbare Methode ist in [11] entwickelt worden, sie arbeitet auch mit einer Triangulierung. Zuerst wird die konvexe Hülle der gegebenen Punkte gebildet. Die untere ‚Hälfte‘ der konvexen Hülle, also jene Dreiecke, deren auswärts gerichteter Normalvektoren eine negative z-Komponente haben, enthält auf keinen Fall Punkte über dem Gelände und ist eine erste Näherung des Geländes. Die Punkte über dieser Fläche werden abhängig von geometrischen Kriterien zum Gelände dazugefügt.

Eine weitere Variante ist von [12] beschrieben worden. Zuerst werden in den (4) Gebietsecken Bodenpunkte bestimmt und dieses Viereck wird trianguliert. Im ‚downward‘-Schritt wird jedem Dreieck der am tiefsten darunter liegende Punkt dazugefügt und die so erweiterte Punktmenge wird neu trianguliert. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis kein Punkt mehr unter dem vorläufigen Geländemodell ist. Im ‚upward‘-Schritt wer-

den auf Basis von einem Kriterium ein oder mehrere Punkte pro Dreieck als Bodenpunkte ausgewählt und das Geländemodell wird mittels Triangulierung auf den neuesten Stand gebracht.

2.3. Robuste Interpolation

Für die robuste Interpolation wird zuerst aus der gegebenen Punktwolke eine approximierende Fläche mittels linearer Prädiktion berechnet. Dabei werden große Verbesserungen, also große Abstände zwischen den Punkten und der Fläche zugelassen. Dann werden diese Abstände – positiv, wenn der Punkt über der Fläche liegt, negativ, wenn der Punkt darunter liegt – herangezogen um jeden Punkt ein Gewicht zu geben. Die Gewichtsfunktion ist in Abb. 2, rechts dargestellt. Der Ursprung g dieser Gewichtsfunktion ist im Negativen (also „unter“ der Fläche), und alle Punkte die eine Verbesserung kleiner als g haben, erhalten das Gewicht 1. Punkte mit größeren Verbesserungen bekommen ein entsprechend kleineres Gewicht bzw. das Gewicht 0, wenn sie oberhalb von der Abbruchschranke liegen, die durch w definiert ist. Der Wert g wird aus den Daten berechnet [13].

Diese Gewichte werden für die nächste Bestimmung der Fläche herangezogen. Ein Punkt mit großem Gewicht zieht die Fläche näher heran, wohingegen ein Punkt mit kleinem Gewicht geringeren Einfluß auf den Verlauf der Fläche hat. In dieser Art nähert sich die Fläche iterativ den Bodenpunkten an.

Diese Methode ist, in etwas allgemeinerer Form, in der Software SCOP++ (Inpho, Deutschland und Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Österreich) implementiert.

Eine vergleichbare Methode ist von Elmqvist in [14] beschrieben. Ähnlich dem Ansatz von Snakes für Kurven [15] wird eine Fläche mittels innerer und äußerer Kräfte bestimmt. Die äußeren Kräfte entsprechen einer negativen Schwerkraft, die die Fläche von unten an die Punkte heranzieht. Die internen Größen sind Flächen-Steifheitsparameter, die verhindern, dass die Fläche zu einzelnen (Vegetations-)Punkten hinaufgezogen wird.

2.4. Hierarchische Filterung

Die hierarchische robuste Interpolation ist eine Erweiterung der robusten Interpolation. Eine Voraussetzung für die robuste Interpolation ist eine Durchmischung der Boden- und Nicht-Bodenpunkte. In Stadtgebieten, wo viele benachbarte Punkte auf Hausdächern gemessen werden ist das nicht der Fall. Daher wurde die Methode um

eine hierarchischen Zugang, der vom Groben ins Feine arbeitet erweitert [16]. Dieser Zugang ist nicht nur für die robuste Interpolation geeignet, sondern auch auf andere Filtermethoden anwendbar.

Der *hierarchische Ansatz* arbeitet mit Datenpyramiden, ähnlich zu den Bildpyramiden, die aus der digitalen Bildverarbeitung bekannt sind. Die verschiedenen Niveaus der Pyramide stellen die Daten in verschiedenen Auflösungsstufen (Generalisierungsstufen) dar. Die höheren Niveaus können mit verschiedenen Methoden aus den niedrigeren gebildet werden. Beispielsweise kann innerhalb eines kleinen, quadratischen Gebiets (Rasterzelle) immer der Schwerpunkt oder der tiefste Punkt selektiert werden. Dadurch wird eine Modellbildung vom Groben ins Feine ermöglicht. Der Ablauf dieser Methode ist durch folgende Schritte gegeben:

1. Berechnung der Datenpyramiden,
2. Filterung (Klassifizierung) und DGM-Berechnung mittels robuster Interpolation, beginnende mit dem höchsten Niveau,
3. Vergleich des DGM mit den Daten der nächstfeineren Auflösung und Auswahl der Punkte innerhalb eines Toleranzbandes.

Die Schritte 2 und 3 werden so lange wiederholt, bis nach dem 2. Schritt das DGM mit der endgültigen, feinsten Auflösung vorliegt. Dieser hierarchische Ansatz ermöglicht neben einer Reduktion der Rechenzeit eine stärkere Robustheit der Methode und ein Überbrücken von Bereichen ohne Bodeninformation.

2.5. Weitere Methoden

In der Methode von Wack [17] wird ein Raster mit einer Kantenlänge von 9 m gebildet, wobei die Höhe jeder Rasterzelle aus den innerhalb liegenden Punkten berechnet wird. Nicht die Höhe des tiefsten Punktes, sondern das 1%-Quantil der aufsteigend sortierten Höhen, wird zur Höhe jeder Zelle gemacht. Verbleibende Gebäude oder Vegetation in diesem Raster sind durch starke Höhengsprünge zu den Nachbarzellen gekennzeichnet und werden eliminiert, um das 9m-DHM zu erhalten. Im nächsten Schritt wird ein 3m-Raster gebildet, wobei nur noch jene Originalpunkte herangezogen werden, die innerhalb eines Toleranzbandes zum 9m-DHM liegen. Basierend auf Höhengsprüngen werden Nicht-Bodenzellen eliminiert, und das 3m-DHM gebildet. Der Vorgang wird noch einmal wiederholt, um ein 1m-DHM zu bestimmen. Natürlich können die Parameter (Fenstergröße, . . .) von den hier beschriebenen abweichen.

Im Ansatz von [18] werden die Daten in ein Gitter einsortiert, wobei innerhalb einer Gitterzelle Ausreißer auf Basis ihrer Höhe eliminiert werden. Dann wird eine lineare Fläche für die Punkte innerhalb eines Fensters bestimmt, wobei eine spezielle Gewichtung, die dem niedrigsten Punkt im Fenster das höchste Gewicht gibt, angewandt wird. Eine Klassifizierung der Punkte in Boden-, Objekt- und unklassifizierte Punkte wird über eine Analyse der Verbesserungen mit Schwellwerten gemacht. Der Vorgang wird ein zweites Mal, mit geringerer Fenstergröße und niedrigeren Schwellwerten für die Klassifizierung wiederholt.

Ähnlich dazu ist der Ansatz von [19], wobei die Fläche innerhalb des Fensters ein bikubischer Spline ist. Die Flächenbestimmung wird zweimal durchgeführt, mit verschiedenen starken Regularisierungstermen. Mittels Schwellwerten für die Verbesserungen und die Flächenneigung wird ein Punkt als Boden- oder Objektpunkt klassifiziert.

In [20] ist eine Methode beschrieben, die auf einem Vergleich von Oberflächenmodellen basiert, die mit verschiedenen Glättungsstärken aus den Originaldaten berechnet worden sind. In [21] ist die ‚block minimum‘-Methode erwähnt, die innerhalb eines Fensters den niedrigsten Punkt als Geländepunkt selektiert, und alle übrigen Punkte nicht weiter untersucht. Zu erwähnen ist noch, dass derzeit Ansätze entwickelt werden, die Segmentierung und Filterung vereinen [22] und [23].

2.6. Vergleich

Die morphologische Filterung und progressive TIN-Verdichtung sind Methoden, die *Annahmen über das Gelände* verwenden (Form des Strukturelement bzw. Kriterien für die Dreiecksverdichtung). Solche Annahmen sind auch in der robusten Interpolation enthalten (Kovarianzfunktion), aber zusätzlich wird durch die Gewichtungsfunktion 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 Nicht-Bodenpunkte berücksichtigen und nur wenig Geländeinformation benutzen. Wenn in einem vorgegebenen Raster der jeweils tiefstliegende Punkt, oder bspw. Das 5%-Quantil der nach Höhe sortierten Punkte, als Bodenpunkt ausgewählt wird, so spiegeln sich die Geländeeigenschaften ‚nur‘ in der Rastergröße wieder.

In vielen Methoden kann eine implizite Annahme von horizontalem Gelände gefunden wer-

den. Das gilt speziell für die block-minimum-Methoden. Die Methoden der TIN-Verdichtung erfassen den Trend des Geländes deutlich besser, und die robuste Filterung und die Methode von Elmqvist[14] modellieren das Gelände als *eine Fläche* bereits explizit und unter Einbeziehung von zufälligen Fehlern während der Filterung.

Viele Methoden arbeiten vom Groben ins Feine (TIN-Verdichtung, hierarchische robuste Interpolation, und die Methode von Wack [17]) oder auf mehreren Auflösungsstufen (multi-level-approach [9]). Durch die Wahl des Medians oder von Quantilen werden viele Methoden robust gegenüber groben Fehlern gemacht, speziell um Fehler durch Punkte unter der Geländefläche vorzubeugen ([17] und [10] für die Filterung und [18] für die Gitterbildung).

In den Publikationen zur robusten Interpolation wird die Prädiktion (Interpolation nach kleinsten Quadraten) für die Berechnung der Fläche verwendet. Dazu wird die Kovarianzfunktion abgeschätzt, bzw. äquivalent dazu das *Variogram*. Dieses gibt den Erwartungswert des *quadratischen Höhenunterschieds* für eine bestimmte Entfernung an. Bei der Snakes-Methode entspricht das den Steifigkeitsparametern der Fläche. Im Vergleich dazu gibt das *Strukturelement* der morphologischen Filterung den erlaubten Höhenunterschied in Abhängigkeit von der Entfernung zweier Punkte an.

Ein Vergleich von einigen Filter-Methoden für Testdatensätze ist von der ISPRS, Commission III, Working Group 3 durchgeführt worden [24].

3. Digitale Modelle aus Laserdaten

Im vorigen Abschnitt ist die Filterung von Laserdaten beschrieben worden. In erster Linie wird diese für die Extraktion der Geländepunkte oder der *Geländefläche* aus den Laserdaten angewandt. Neben diesen Modellen sind aber auch Oberflächenmodelle von Interesse. In diesem Abschnitt wird zuerst die Methode aus allen Laserdaten ein „Oberflächenmodell“ zu berechnen kritisch betrachtet. Dann wird auf die Ableitung von Kronenmodellen in bewaldeten Gebieten und Modellen im Stadtgebiet eingegangen.

3.1. Einfache Oberflächenmodelle?

Legt man durch alle Punkte eines Laserscanner-Datensatzes eine Fläche so erhält man jene Fläche, die der Sensor „sieht“. Im offenen Gelände ist dies der Boden, bei Häusern ist dies die Dachfläche.

Im Waldgebiet ist diese Fläche aufgrund der Eigenschaft des Laserscannings die Vegetation zu durchdringen eine Fläche, die teilweise am Boden, teilweise durch die Kronen und teilweise in mittlerer Höhe (beispielsweise bei Reflektion des Lasers an einem Ast) verläuft. Der Messmodus (first oder last pulse, also die Abstandsmessung zur obersten oder untersten reflektierenden Fläche) hat ebenfalls Einfluss, und entsprechend erhält man eine Fläche, die näher den Kronen oder dem Boden ist. Abhängig von der Vegetationsdichte, dem Befliegungszeitpunkt und dem Messmodus erhält man somit verschiedene Modelle. Ähnlich verhält es sich mit landwirtschaftlich genutzten Flächen. Getreide und Mais kann, je nach Reifegrad, den Laserstrahl an den oberen Enden der Vegetation reflektieren oder ‚transparent‘ für das Laserscanning sein. Damit können bei einer Laser-Befliegung für benachbarte Felder unterschiedliche Höhenniveaus gemessen werden.

3.2. Kronenmodelle

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Methoden sind für die Klassifizierung der Bodenpunkte in Laserdaten entwickelt worden. Durch entsprechende Adaption des Filters (Strukturelement, bzw. Winkelkriterien, bzw. Gewichtsfunktion) lassen sich mit diesen Methoden aber auch andere Flächen ableiten, beispielsweise die Vegetationsoberfläche. Im offenen Gebiet läuft diese Fläche am Gelände, im Wald aber soll die Fläche durch die Kronen laufen.

Invertiert man das Strukturelement der morphologischen Filterung (Oben-Unten-Umkehr) und führt das Strukturelement nicht von Unten, sondern von Oben an die Daten heran, so erhält man die oberste Fläche, die vom Laserscanner abgetastet wird. Entsprechend ließen sich auch die Kriterien für die progressive TIN-Verdichtung abwandeln um beispielsweise die Kronenoberfläche zu ermitteln. Für die robuste Interpolation

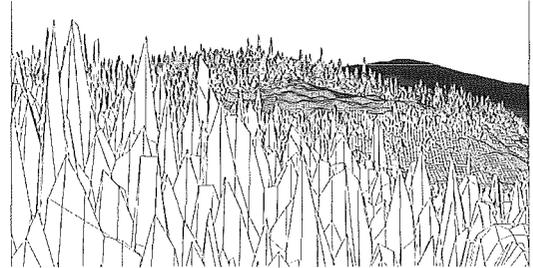
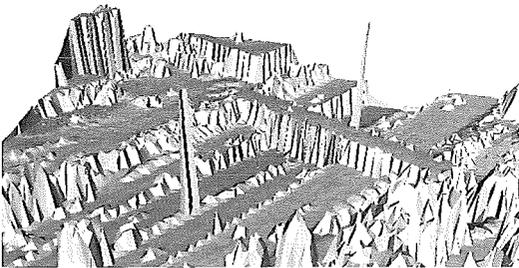


Abb. 3: Modell durch alle Laserpunkte. Links: Neben einer Brücke sind auch Vegetation (rechts vorne) und Gebäude (hinten) erkennbar. Auf der Straße bilden Lichtmasten Spitzen entlang der Fahrbahnmittlinie. Rechts: Interpolation von Punkten auf der Geländefläche und in der Vegetation, das Erkennen der bewaldeten Gebiete ist möglich, aber einzelne Bäume können bei dieser Punktdichte nicht mit Sicherheit unterschieden werden (nach Kraus and Rieger, 1999).

Einzelne Objekte (allein stehende Bäume, Straßenlaternen, Autos, . . .) werden, je nach Punktdichte mit einem oder mehreren Punkten erfasst oder bei entsprechend geringerer Punktdichte nur manchmal erfasst. Bei diesen Objekten lässt sich überdies der Begriff ‚Fläche‘ in einem topographischen Sinn nicht rechtfertigen.

Diese einfachen Oberflächenmodelle hängen also von Messmodus, -zeitpunkt und -höhe, dem jeweiligen Vegetationszustand und noch weiteren Parametern ab. Dennoch können Modelle, die durch die Interpolation der gesamten Punktwolke erstellt werden, sinnvoll verwendet werden. Für die Visualisierung oder eine Vollständigkeitskontrolle ist in vielen Fällen ein solches einfaches Modell ausreichend und Aufgaben die durch manuelle Interpretation gelöst werden (z.B. Messen von Distanzen zwischen Häusern) sind in solchen Modellen möglich (siehe Abb. 3).

ist eine andere Gewichtsfunktion zu wählen, die jene Punkte bevorzugt, die über der approximierenden Fläche liegen. Eine entsprechende Untersuchung für forstliche Zwecke ist in [25] und [26] von Rieger et al durchgeführt worden, und wird im Folgenden kurz beschrieben.

Aus den Laserpunkten einer Winter-Befliegung mit Aufzeichnung des letzten reflektierten Laserechos (Last Pulse) wurde das Geländemodell mittels robuster Interpolation wie oben beschrieben abgeleitet, die Höhenschichtlinien sind in Abb. 4, links zu sehen. Aus den Daten einer Sommerbefliegung mit Registrierung des ersten Echos (First Pulse) wurde das Kronenmodell abgeleitet. Die Gewichtsfunktion für die Klassifizierung der Punkte hat in diesem Fall große Gewichte für Punkte über der approximierenden Fläche vergeben und kleine Gewichte für Punkte darunter (bspw. Punkte am Waldboden). Das Dif-

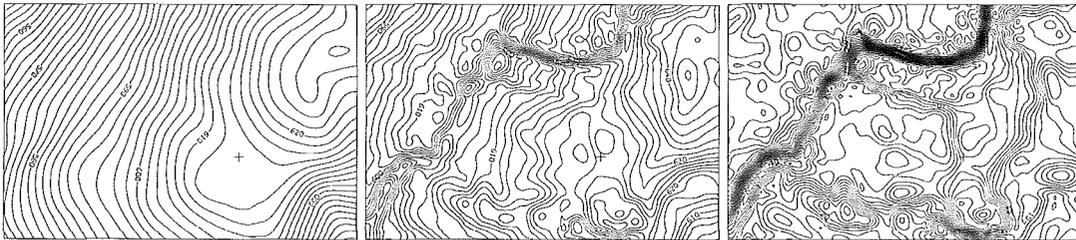


Abb. 4: Höhengichtlinien im Waldgebiet. Links ist das Geländemodell zu sehen, in der Mitte das Kronenmodell (Intervall jeweils 2m), und das Modell rechts zeigt die Waldhöhen, also generalisierte Einzelbaumhöhen (Intervall 1m) (nach Kraus and Rieger, 1999).

ferenzmodell (ein normalisiertes Oberflächenmodell, nDOM) zeigt die Höhe des Waldbestandes, die Höhengichtlinien sind in Abb. 4, rechts zu sehen. In Abb. 3, rechts ist das Modell durch Bodenpunkte und Vegetationspunkte in einer Perspektivabbildung zu sehen.

Weitere Methoden zur Bestimmung von Baumhöhen sind beispielsweise in [27] zu finden.

3.3. Modelle im Stadtgebiet

Modelle im Stadtgebiet können die Straßen und Vegetation beschreiben ([28], unter Zuhilfenahme des Katasterplans), die Gebäude in Form von Prismen (Klötzchenmodell), oder die Dachflächen der Häuser. In der Gebäuderekonstruktion (bspw. [29] und [30]) werden die einzelnen Dachflächen mit Ebenen beschrieben. Im Unterschied dazu lässt sich mittels Triangulierung oder Flächeninterpolation der Originaldaten ein einfaches Dachflächenmodell beschreiben. Dadurch wird das Haus, oder der Häuserblock als Objekt behandelt, ohne die Dachfläche detailliert zu analysieren. Zuerst muss dafür ein Haus als solches detektiert werden. Im Folgenden wird kurz eine neue Methode vorgestellt, mit der bei

gegebenen Grundrissen solche einfachen Hausmodelle erstellt werden können.

Die originalen Laserpunkte innerhalb eines Hausgrundrisses werden selektiert und trianguliert, was eine erste Beschreibung der Dachfläche, die im Allgemeinen nicht bis zu den Hauswänden oder den Traufen – je nach Erfassungsmethode für den Grundriss – reicht. Im nächsten Schritt werden an den Ecken und an regelmäßig verteilten Punkten entlang des Grundrisses die Dachhöhen abgeschätzt. Dazu wird eine Interpolationsmethode, die an die ‚nearest neighbor‘-Interpolation angelehnt ist, angewandt. Für jeden Punkt, für den die Höhe abzuschätzen ist, wird der nächstliegende Originalpunkt gesucht. In diesem Punkt wird die Tangentialebene aus den umliegenden Laserpunkten abgeschätzt. Die Höhe dieser Ebene an der Schätzposition ist die abgeschätzte Dachhöhe für den Grundrisspunkt. Da Dächer oft aus Ebenen zusammengesetzt sind, funktioniert diese Methode gut entlang des Grundrisses. Die so erhaltenen Punkte werden in die Triangulierung eingefügt und ergeben das Dachmodell. Das Modell kann noch mit Methoden zur Ausdünnung der Triangulierung (Verschmelzen von Dreiecken mit ähnlichen Ebenen-

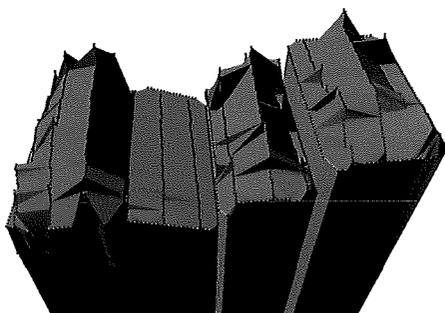


Abbildung 5: Erstellung eines einfachen Hausdachmodells im Stadtgebiet. Links sind einige Häuser von Delft mit dem Bodenmodell dargestellt. Rechts sind vier Häuser nach Anwendung der im Text beschriebenen ‚Verschönerungsalgorithmen‘ gezeigt. Die schwarz dargestellten Punkte auf den Hausdächern sind gegenüber den originalen Messungen in der Höhe verschoben. Die Grundrissdaten sind freundlicherweise von Kadata B.V. zur Verfügung gestellt worden, die Laserdaten freundlicherweise von TopoSys GmbH.

parametern, . . ., [31]) komprimiert werden. Eine Analyse der Höhen entlang der Grundrisskanten kann auch noch zur Verbesserung des Modells beitragen, da bei vielen Häusern die Traufen horizontal sind. Alternativ zur beschriebenen Extrapolationsmethode könnte auch auf Basis der ursprünglichen Triangulierung eine Extrapolation mittels der äußeren Dreiecke durchgeführt werden. Ein Ergebnis für die Methode der „nearest neighbor tangent plane“-Interpolation ist in Abb. 5 wiedergegeben. Mit diesen Modellen lassen sich bspw. einfache Abschätzungen des Dach-Oberflächeninhalts und des Hausvolumens durchführen.

4. Schlußbemerkung

Wie in dem Artikel gezeigt, können mit dem flugzeuggetragenen Laserscanning digitale Modelle vom Gelände, von der Dachlandschaft und von den Baumkronen abgeleitet werden. Die Filteralgorithmen für die Ableitung der Geländemodelle sind weit entwickelt. Filterung der Laserscannerdaten wird oft mit anderen Methoden, z.B. aus der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt um in Vor- oder Nachbearbeitungsschritten die Daten aufzubereiten bzw. das Ergebnis zu verbessern. Um die Qualität der Geländemodelle noch weiter zu steigern ist eine Rekonstruktion der Geländekanten notwendig ([32], [33]). Vorausgesetzt, die Punktdichte einer Laserbefliegung ist ausreichend hoch, lassen sich aber auch viel detailliertere Modelle ableiten, wie z.B. Einzelbaummodelle [34] oder Stadtmodelle, bei denen die Dächer aus einzelnen ebenen Flächen zusammengesetzt sind. Durch die Kombination mit anderen Datensätzen (Grundrissen, digitalen Bildern, . . .) wird die Rekonstruktion dieser Modelle einfacher bzw. zuverlässiger und robuster.

Die Entwicklung der Laserscanner ist noch nicht abgeschlossen, die Messfrequenz und maximale Flughöhe steigen. Dadurch wird der Einsatz von Laserscanning kostengünstiger. Laserscanner können derzeit aus Flughöhen von 2000m über Grund betrieben werden und registrieren bis zu fünf Echos (fünf Reflexionen des Lasers entlang des Strahls). Angekündigt sind bereits Scanner, die auch die Wellenform des reflektierten Signals registrieren (full waveform capture, Verteilung der zurückkommenden Energie über die Zeit) bzw. Scanner für noch größere Flughöhen. Auch Laserscanning vom Satelliten – ohne Ablenkungseinrichtung – ist bereits im Einsatz (z.B. ICESat, Ice Cloude and Land Elevation Satellite).

Literatur

- [1] *Sagi Filin*: Analysis and implementation of a laser strip adjustment model. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [2] *Christian Briese, Karl Kraus, Gottfried Mandelburger, and Norbert Pfeifer*: Einsatzmöglichkeiten der flugzeuggetragenen Laser-Scanner. In *Tagungsband der 11. Internationalen Geodätischen Woche in Obergurgl*, pages 17–26, Innsbruck, Austria, 2001.
- [3] *Peter Dorninger and Christian Briese*: Modellierung der Marsoberfläche aus Laserscanner Daten. In *Tagungsband der 12. Internationalen Geodätischen Woche in Obergurgl*, Innsbruck, Austria, 2003.
- [4] *Karl Kraus*: Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme. Dümmler, 2000. An english edition by Taylor and Francis (translator: H. Rührer) is in preparation.
- [5] *George Vosselman*: Slope based filtering of laser altimetry data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.XXXIII, B3, pages 935–942, Amsterdam, Netherlands, 2000.
- [6] *Peter Axelsson*: DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.XXXIII, B4, pages 111–118, Amsterdam, Netherlands, 2000.
- [7] *Karl Kraus*: Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, 1:25–30, 1997.
- [8] *George Sithole and George Vosselman*: Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.XXXIV, 3/W4, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [9] *Johannes Kilian, Norbert Haala, and Markus English*: Capture and evaluation of airborne laser scanner data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.XXXI, B3, pages 383–388, Vienna, Austria, 1996.
- [10] *P. Lohmann, A. Koch, and M. Schaeffer*: Approaches to the filtering of laser scanner data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.XXXIII, Amsterdam, Netherlands, 2000.
- [11] *Wolfgang Hansen and Thomas Vögtle*: Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, pages 229–236, 1999.
- [12] *G. Sohn and I. Dowman*: Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, 3B, pages 336–344, Graz, Austria, 2002.
- [13] *Karl Kraus and Norbert Pfeifer*: Advanced DTM generation from LIDAR data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, 3/W4, pages 23–30, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [14] *M. Elmqvist, E. Jungert, F. Lantz, A. Persson, and U. Söderman*: Terrain modelling and analysis using laser scanner data. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, 3/W4, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [15] *M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos*: Snakes: active contour models. *International Journal of Computer Vision*, 1(4):321–331, 1988.
- [16] *Norbert Pfeifer, Philipp Stadler, and Christian Briese*: Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. In *Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models*, Stockholm, Sweden, 2001.
- [17] *R. Wack and A. Wimmer*: Digital terrain models from airborne laser scanner data – a grid based approach. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, 3B, pages 293–296, Graz, Austria, 2002.
- [18] *Marco Roggero*: Airborne laser scanning: Clustering in raw data. In *International Archives of Photogrammetry and Re-*

- ote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W4, pages 227-232, Annapolis, MD, USA, 2001.*
- [19] *M.A. Brovelli, M. Cannata, and U.M. Longoni:* Managing and processing LIDAR data within GRASS. In Proceedings of the Open source GIS – GRASS users conference, Trento, Italy, 2002.
- [20] *T. Thuy VU, Furnio Yamazaki, and Mitsuharu Tokunaga:* Wavelet-based filtering the cloud points derived from airborne laser scanner. In 23. Asian Conference on Remote Sensing, Kathmandu, Nepal, 2002.
- [21] *Ralph A. Haugerud and D.J. Harding:* Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LIDAR topographic survey data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W4, pages 211–217, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [22] *Carla Nardinocchi, Gianfranco Forlani and Primo Zingaretti:* Classification and filtering of laser data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [23] *Karsten Jacobsen and Peter Lohmann:* Segmented filtering of laser scanner DSMs. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [24] *George Sithole and George Vosselman:* Comparison of filtering algorithms. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [25] *Wolfgang Rieger, Otto Eckmüller, Hermann Müllner, and Thomas Reiter:* Laser scanning for the derivation of forest stand parameters. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII, LaJolla, CA, USA, 1999.
- [26] *Karl Kraus and Wolfgang Rieger:* Processing of laser scanning data for wooded areas. In Fritsch and Spiller, editors, Photogrammetric Week '99, pages 221–231, Stuttgart, Germany, 1999. Wichmann Verlag.
- [27] *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing:* Vol. XXXIV, 3/W4, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [28] *George Vosselman:* 3d reconstruction of roads and trees for city modelling. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [29] *Claus Brenner and Norbert Haala:* Erfassung von 3d Stadtmodellen. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 2:109–118, 2000.
- [30] *Franz Rottensteiner and Christian Briese:* A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3A, pages 295–301, Graz, Austria, 2002.
- [31] *Michael Garland and Paul S. Heckbert:* Surface simplification using quadric error metrics. In SIGGRAPH 97 Conference Proceedings, pages 209–216, 1997. <http://www.cs.cmu.edu/~garland/research/quadrics.html>.
- [32] *D. Wild and P. Krzystek:* Automated breakline detection using an edge preserving filter. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, B3, pages 946–952, Vienna, Austria, 1996.
- [33] *Christian Briese, Karl Kraus and Norbert Pfeifer:* Modellierung von dreidimensionalen Geländekanten in Laser-Scanner-Daten. In Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Meier, pages 47–52, TU Dresden, Inst. für Planetare Geodäsie, Germany, 2002.
- [34] *Ulla Pyysalo and H. Hyypä:* Reconstructing tree crowns from laser scanner data for feature extraction. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3A, Graz, Austria, 2002.

Adresse des Autors

Dr. Norbert Pfeifer: Delft University of Technology, Section of Photogrammetry and Remote Sensing, Kluyverweg 1, NL-2629 HS Delft, Niederlande. email: n.pfeifer@lr.tudelft.nl