

# Modellierung von dreidimensionalen Geländekanten in Laser-Scanner-Daten

C. Briese, K. Kraus, N. Pfeifer

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien (I.P.F.)

**Vorbemerkung** Prof. S. Meier verbindet mit unserem Institut vor allem das Thema „Digitale topographische Modelle“. Er und seine Mitarbeiter – es seien Dr. Beyer und Dr. Borkowski genannt – waren zu Forschungsaufenthalten und Seminaren mehrmals an unserem Institut. Auf der Ebene der Diplomanden gibt es im Rahmen des Erasmus-Programmes der Europäischen Union ebenfalls einen regen Austausch zwischen der TU Dresden und unserem Institut. Der folgende Beitrag geht auf die Diplomarbeit „Automatische Ableitung von Bruchlinien aus Laserscannerdaten“ von A. Brzank (2001) zurück. Herr Brzank war ein Diplomand von Prof. Dr. E. Csaplovics, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden. Zur fachlichen Motivation des Diplomanden und zu seinem Basiswissen hat Prof. Meier sehr viel beigetragen. Am I.P.F. wurde der Diplomand von Dipl.-Ing. N. Pfeifer betreut.

## 1 Einleitung

Das flugzeuggetragene Laserscanning hat die topographischen Geländeaufnahmen in den letzten fünf Jahren revolutioniert. Im Vergleich zur Stereo-Photogrammetrie bietet das Laserscanning die Möglichkeit, auch in verhältnismäßig dicht bewaldeten Gebieten und in verhältnismäßig dicht besiedelten Gebieten hochwertige digitale Geländemodelle (DGMe) zu bekommen. Ein weiterer Vorteil des Laserscannings ist der aktive Sensor, der unabhängig von der (Sonnen-)Beleuchtung die Datenerfassung möglich macht. Außerdem soll erwähnt werden, dass das Laserscanning inzwischen einen sehr hohen Automationsgrad erreicht hat und daher sehr wirtschaftlich eingesetzt werden kann.

Das Potenzial des Laserscannings wird noch nicht voll ausgeschöpft. Die inzwischen verhältnismäßig hoch entwickelten Filterverfahren zur Ableitung von DGMen eliminieren weitgehend die Vegetation, Gebäude etc. (z.B. [Kraus, 1997], [Borkowski et al., 1997], diese beiden Veröffentlichungen behandeln übrigens das gleiche Beispiel). Mit Hilfe eines hierarchischen Filter- und Interpolationsansatzes können sogar Vegetationsbereiche mit einer sehr geringen Durchdringungsrate und Bereiche mit sehr großen Gebäudekomplexen erfolgreich bearbeitet werden [Pfeifer und Briese, 2001]. Diese Filterverfahren runden aber die Geländekanten und andere topographisch relevante Formen ab. Es sind daher Auswerteverfahren gesucht, die insbesondere die Geländekanten erhalten.

Die DGMe, die gegenwärtig aus Laserscannerdaten gewonnen werden, sind sogenannte Rastermodelle. Diese Rastermodelle haben zwar eine verhältnismäßig kleine Rasterweite; trotzdem reichen sie nicht an die Qualität hybrider DGMe, die zusätzlich zu den Geländehöhen in den Rasterpunkten auch dreidimensionale Vektorelemente enthalten, heran [Kraus, 2000]. Es ist daher ein Auswerteverfahren gesucht, das ein hybrides DGM erzeugt, in dem insbesondere die Geländekanten als dreidimensionale Vektoren enthalten sind.

## 2 Dreidimensionale Modellierung von Geländekanten

Ein rasterförmiges DGM, das aus Laser-Scanner-Daten abgeleitet wird, kann als (zweidimensionales) digitales Bild aufgefasst werden; die Geländehöhen sind die Grauwerte eines solchen Bildes. Damit können die Methoden der digitalen Bildverarbeitung für Krümmungsanalysen herangezogen werden. Abhängig von gewählten Schwellwerten ergibt die Krümmungsanalyse den Verlauf von Geländekanten in der XY-Ebene. (Dafür bieten sich z.B. die Wavelet-Verfahren von [Beyer und Meier, 2001] und [Beyer, 2002] an, wenn man entsprechende Wavelets verwendet, die die zweite Ableitung des Geländes approximieren.)

Die auf diese Weise gefundenen Geländekanten dienen als Initialisierung für den am I.P.F. entwickelten Prozess einer dreidimensionalen Kantenmodellierung. Eine dreidimensionale Kantenmodellierung sollte man auf die

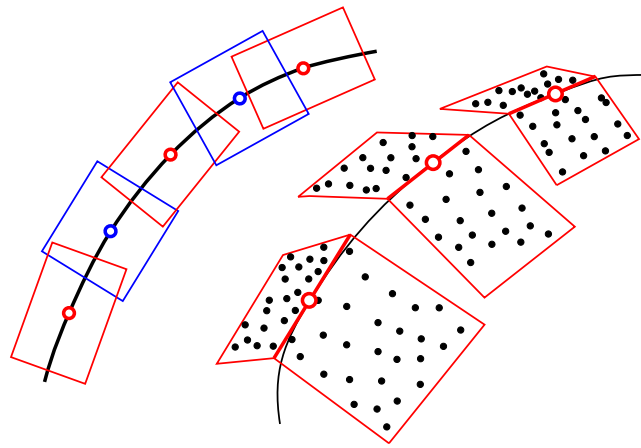


Abbildung 1: Vorläufige Geländekante in der XY-Ebene mit überlappenden *Patches* (links) und eine Auswahl von Ebenenpaaren mit 3D-Schnittgeraden und repräsentativen 3D-Punkten (rechts)

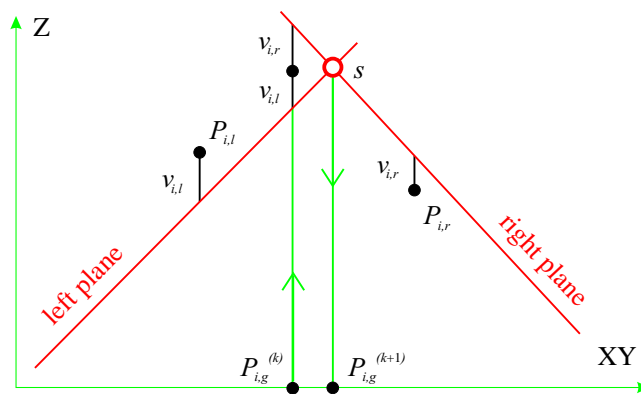


Abbildung 2: Ebenenpaar mit Laserpunkten, Schnittgerade *s* und einen Punkt auf der (vorläufigen) Geländekante

dreidimensionalen (3D) Originaldaten aufsetzen, aus denen mit den oben erwähnten Verfahren allerdings vorher die Laserpunkte auf Bäumen, Gebäude etc. (vorläufig) zu eliminieren sind.

Abbildung 1, links, zeigt eine (vorläufige) Geländekante in der XY-Ebene. Mit Hilfe dieser Geländekante werden die Originalpunkte klassifiziert, und zwar in eine Klasse „links“ und eine Klasse „rechts“ der Geländekante. Zusätzlich werden die Originalpunkte in überlappende *Patches* entlang der Geländekante einsortiert. In jedem *Patch* wird ein sogenanntes Ebenenpaar ermittelt (Abbildung 1, rechts). Die Schnittgerade der beiden Ebenen ist eine Tangente an die 3D-Geländekante. Dieses Verfahren kann als **gleitendes Ebenenpaar** entlang der gesuchten Geländekante charakterisiert werden. Die beiden Ebenen eines Ebenenpaares werden simultan mit den folgenden Verbesserungsgleichungen mittels einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (Abbildung 2):

$$\begin{array}{lcl}
 \text{3D Punkte } P_{i,l}: & v_{i,l} & = \quad \underline{+a_l X_{i,l}} \quad \underline{+b_l Y_{i,l}} \quad \underline{+c_l} & & -Z_{i,l} \\
 \text{3D Punkte } P_{i,r}: & v_{i,r} & = & \underline{+a_r X_{i,r}} \quad \underline{+b_r Y_{i,r}} \quad \underline{+c_r} & -Z_{i,r} \\
 \text{2D Punkte } P_{i,g}: & v_{i,l} & = \quad \underline{+a_l X_{i,g}} \quad \underline{+b_l Y_{i,g}} \quad \underline{+c_l} & -\underline{Z_i} \\
 & v_{i,r} & = & -\underline{Z_i} \quad \underline{+a_r X_{i,g}} \quad \underline{+b_r Y_{i,g}} \quad \underline{+c_r}
 \end{array}$$

Indizes l, r ..... Punkte auf der linken bzw. rechten Seite der vorläufigen Geländekante  
 Index g ..... Punkt auf der (vorläufigen) Geländekante  
 Indizes a, b, c ... Parameter der linken bzw. rechten Ebene

Jeder 3D-Punkt liefert eine Gleichung, jeder 2D-Punkt (auf der vorläufigen Geländekante) zwei Gleichungen. Die Unbekannten, die im Gleichungssystem unterstrichen wurden, sind:

- die sechs Parameter der beiden Ebenen,

- die Höhen  $Z_i$  von Punkten auf der (vorläufigen) Geländekante. (Diese Unbekannten können zur Effizienzsteigerung der Ausgleichung auf bekannte Weise eliminiert werden.)

Die Minimierung der Quadratsumme der Verbesserungen  $v_i$  liefert ein Ebenenpaar, das die gegebenen 3D-Punkte  $P_{i,l}$  und  $P_{i,r}$  einerseits möglichst gut annähert und dessen Schnittgerade  $s$  (im Grundriss) andererseits möglichst nahe an den 2D-Punkten der vorläufigen Geländekante angehalten wird. Die auf diese Weise gefundene Schnittgerade  $s$  dient für einen zweiten Rechengang, der mit einer neuen Klassifizierung der Punkte in die Klassen „links“ und „rechts“ der Schnittgeraden  $s$  beginnt. Nach der zweiten Ausgleichung können noch – wenn erforderlich – weitere Iterationen angehängt werden.

Das Ergebnis einer solchen Iteration ist die endgültige 3D-Schnittgerade  $s$ , die - wie bereits erwähnt - eine Tangente an die gesuchte Geländekante ist. Auf dieser Schnittgeraden wird ein repräsentativer 3D-Punkt (z.B. in der Mitte des *Patches*) berechnet. Die 3D-Punkte und die Schnittgeraden aller *Patches* beschreiben eine 3D-Geländekante als Splinefunktion.

Die Verbesserungen  $v_i$  für die 3D-Punkte und für die 2D-Punkte wird man unterschiedlich gewichten. Ist in die 2D-Geländekante auch Zusatzinformation - zum Beispiel extrahierte Geländekante aus einem parallel zu den Lasermessungen aufgenommenen Bild - eingeflossen, wird man ein verhältnismäßig hohes Gewicht wählen. Hat man nur grobe Schätzungen für den XY-Verlauf der Geländekante aus dem (vorläufigen) rasterförmigen Laser-DGM vorgenommen, ist nur ein sehr kleines Gewicht für die zu den 2D-Punkten gehörenden Verbesserungen angebracht.

### 3 Praktisches Beispiel

Im Auftrag der Wasserstraßendirektion, Wien, wurde am I.P.F. im Jahre 1999 ein Pilotprojekt zur Auswertung von Laser-Scanner-Aufnahmen im sehr dichten Auwald an der Donau bei Hainburg durchgeführt. Die Daten, die einen 10 km langen Abschnitt bedecken, hat die Fa. TopoSys erflogen. Details zum Projekt und auch die Nutzung der abgeleiteten DGMe findet man in der Veröffentlichung [Kölbl et al., 2002]. (Ein vergleichbares Projekt an der Grenzoder beschreibt die Veröffentlichung [Brockmann und Mandlbürger, 2001].)

Trotz der geringen Durchdringungsrate ist es gelungen, im Auwald an der Donau ein qualitativ hochwertiges DGM aus den Laserdaten mit den im Abschnitt 1 erwähnten Filtermethoden herzustellen. Abbildung 3 ist ein kleiner Ausschnitt aus dem umfangreichen Projekt; links sieht man die Oberfläche aus allen aufgenommenen Laser-Scanner-Punkten, rechts ist das durch Filterung gefundene DGM zu sehen. Beeindruckend sind die geomorphologischen Kleinformen im DGM, die sozusagen unterhalb der Vegetation „verborgen“ sind.

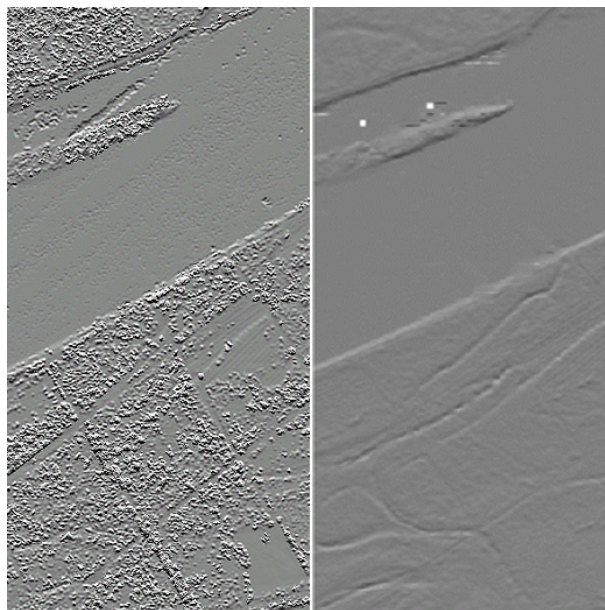


Abbildung 3: Oberflächenmodell aus allen Laserpunkten (links) und DGM nach Elimination der Vegetationspunkte (rechts)

Mit 108 Kontrollpunkten wurde die Genauigkeit des DGMs, das mit einer Rasterweite von 1 m berechnet wurde, ermittelt. Der mittlere Höhenfehler beträgt  $\pm 25$  cm; darin ist ein systematischer Anteil von 12 cm enthalten. (Das Laser-DGM ist im Mittel um diesen Betrag zu hoch. Das ist ein Effekt, der aus dem Messprinzip des Laserscanners erklärt werden kann: Der Laserstrahl wird an dem zuerst getroffenen Hindernis reflektiert, d.h. auch die im Auwald vorhandene Bodenvegetation verursacht einen kleinen systematischen Höhenfehler.)

Im Interessensgebiet gibt es auch einige Hochwasserschutzdämme. Entlang der Böschungsoberkante eines Schutzdammes standen zusätzlich 39 Kontrollpunkte zur Verfügung. Mit diesen 39 Kontrollpunkten ergab sich ein mittlerer Fehler des DGMs entlang der Böschungsoberkanten von  $\pm 29$  cm. In Anbetracht der starken Filterung, die zur Elimination der umfangreichen Vegetation (man vergleiche das linke und rechte Bild der Abbildung 3) vorzunehmen war, ist dieses Ergebnis noch beachtlich gut. Zu Besorgnis veranlasst aber der darin enthaltene große systematische Anteil von 24 cm (das aus Laserdaten abgeleitete rasterförmige DGM liegt in diesen Bereichen zu tief!). Die Oberkanten der Hochwasserschutzdämme sind für hydrologisch/hydraulische Fragestellungen (z.B. Überschwemmungssimulationen) die sensibelsten Eingabedaten. Diese wenigen Sätze unterstreichen die große Bedeutung einer DGM-Berechnung mit Modellierung der Geländekanten.

In der erwähnten Diplomarbeit [Brzank, 2001] wurden Geländekanten im Augebiet Hainburg mittels der im Abschnitt 2 angegebenen Methode erstmals modelliert. Inzwischen wurden mehrere Verbesserungen in der Software, die in SCOP++ [I.P.F., 2002] integriert werden wird, angebracht und die Berechnungen wurden wiederholt. Die *Patches* haben eine Ausdehnung in Längsrichtung von 15 m und quer dazu von zwei mal 7 m. Die *Patches* überlappen sich in Längsrichtung um 50%; das heißt die Abstände der 3D-Punkte entlang der Geländekanten betragen etwa 7 m. Mit dieser Vektorinformation wurde in SCOP der hierarchische Filter- und Interpolationsprozess wiederholt, wobei die 3D-Punkte auf den Geländekanten keine Kandidaten für die Elimination sind. Das Ergebnis dieses Prozesses ist das endgültige hybride DGM. Abbildung 4 zeigt das geschummerte DGM einmal ohne Modellierung der Geländekanten (oben) und einmal mit Modellierung der Geländekanten (unten). Abbildung 5 gibt einen Ausschnitt des Geländemodells wieder, in dem man die Datenstruktur des hybriden DGMs gut erkennt.



Abbildung 4: Geschummertes DGM ohne Modellierung der Geländekanten (oben) und mit Modellierung der Geländekanten (unten)

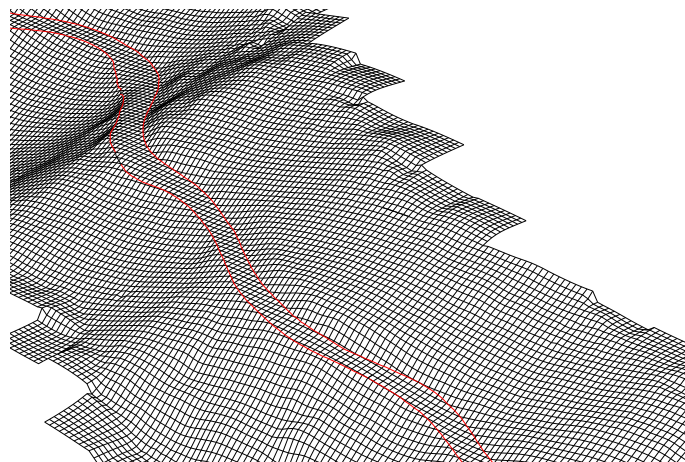


Abbildung 5: DGM mit automatisch ermittelten Geländekanten

Die erzielte Genauigkeitssteigerung im Bereich der Geländekanten ist beachtlich: Der mittlere Fehler konnte von  $\pm 29$  cm auf  $\pm 19$  cm und der systematische Fehler von 24 cm auf 15 cm reduziert werden. Diese Ergebnisse wurden unmittelbar vor Fertigstellung des Manuskriptes erzielt. Eine Optimierung einiger Parameter wird voraussichtlich eine zusätzliche Genauigkeitssteigerung bringen. Schließlich soll noch erwähnt werden, dass die sehr kleine Rasterweite von 1 m für das DGM im Jahre 1999 vor dem Hintergrund gewählt wurde, dass damals keine 3D-Kantenmodellierung zur Verfügung stand und der ausrundende Effekt durch eine möglichst kleine Rasterweite zu mildern war. Die 3D-Kantenmodellierung und die Ableitung eines hybriden DGMS erlauben in Zukunft, wesentlich größere Rasterweiten zu wählen, ohne die Genauigkeit des DGMS nennenswert zu beeinträchtigen. Die Hydrologen und viele andere Anwender begrüßen eine geringere Datenmenge sehr.

## 4 Schlussbemerkungen

Mit der dreidimensionalen Modellierung von Geländekanten und der Verarbeitung in einem hybriden Geländemodell wird das Laserscanning noch attraktiver. In diesem Beitrag wurde ein erster mathematischer Ansatz präsentiert, der

- verallgemeinert (z.B. statt Paaren von Ebenen sind auch Paare von Flächen höherer Ordnung interessant),
- erweitert (Einbeziehung der Anzahl und Verteilung der Stützpunkte in die Gewichtsvergaben, Vernetzung der Geländekanten, Unterscheidung in Linien unterschiedlicher Krümmung, etc.),
- softwaremäßig auf ein höheres Niveau gebracht (z.B. Verwendung einer Wissensbasis) und
- anhand von praktischen Beispielen erprobt und optimiert

werden muss.

## Literatur

- [Beyer und Meier, 2001] Beyer, G., Meier, S. (2001). Geländeneigung und -wölbung aus Wavelet-Koeffizienten. *ZfV* 126(1): S.23-33.
- [Beyer, 2002] Beyer, G. (2002). Terrain Inclination and Curvature from Wavelet Coefficients: Approximation Formulae for the Relief. *Journal of Geodesy* (im Druck).
- [Borkowski et al., 1997] Borkowski, H., Burkhardt, D., Meier, S. (1997). Zur optimalen Approximation von Höhenprofilen. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 85(4): S: 281-285.
- [Brockmann und Mandlbürger, 2001] Brockmann, H., Mandlbürger, G. (2001). Aufbau eines digitalen Geländemodells vom Wasserlauf der Grenzoder. Tagungsbericht zur 21. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, S. 199-208, Konstanz.
- [Brzank, 2001] Brzank, A. (2001). Automatische Ableitung von Bruchlinien aus Laserscannerdaten. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden.
- [I.P.F., 2002] Insitut für Photogrammetrie und Fernerkundung (2002). [http://www.ipf.tuwien.ac.at/produktinfo/scop/scop\\_dtm\\_sheet.htm](http://www.ipf.tuwien.ac.at/produktinfo/scop/scop_dtm_sheet.htm). Technische Universität Wien. Zugriff 05/2002.
- [Kölbl et al., 2002] Kölbl, C., Kraus, K. Oberhofer, A. (2002). Hochgenaues Geländemodell aus Laser-Scanner-Daten: Aufbau und Anwendung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 54 (1): S. 17-23.
- [Kraus, 1997] Kraus, K. (1997). Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 85 (1): S. 25-30.
- [Kraus, 2000] Kraus, K. (2000). *Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme*. Dümmler.
- [Pfeifer und Briese, 2001] Pfeifer, N. and Briese, C. (2001). Airborne laser scanning and derivation of digital terrain models. In *Fifth Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, pp. 80-87, Wien.