

# Auswertung von Laserscannerdaten und automatische Ableitung von Strukturlinien mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden

Lichun Sui

## Zusammenfassung

Das Laserscanning stellt ein leistungsfähiges Verfahren zur topographischen Geländeerfassung bzw. zur Herstellung aktueller Digitaler Höhenmodelle (DHM) dar. Die Beschäftigung mit dem Laserscanning hat im Wesentlichen folgende Zielsetzungen: Zum einen soll für Wald- und Küstengebiete, in denen photogrammetrische Geländeaufnahmen schwierig oder nicht möglich sind, eine unmittelbare Erfassung der Geländeoberfläche ermöglicht werden. Zum anderen lässt sich bei diesem weitestgehend automatisierten Messverfahren mit einer vollständig digitalen Auswertung der Messdaten eine schnelle Lösung mit geringem Personalaufwand erzielen. Beim Erkennen und Trennen der Bodenpunkte von den für den DHM-Aufbau nicht relevanten Punkten werden Verfahren untersucht, die auf mathematischer Morphologie und robuster Parameterschätzung basieren. Mit der Einführung der morphologischen Operation wird die Geländeoberfläche näherungsweise geschätzt. Dadurch werden dann Bodenpunkt- und Nichtbodenpunkthypothesen gebildet. Die anschließende Aufgabe besteht in der Modellierung der Geländeoberfläche und Hypothesentests. Dabei werden robuste Schätzmodelle entwickelt und untersucht. Die verwendeten Modelle werden in verschiedenen Testgebieten mit zahlreichen Abbildungen verifiziert.

## Summary

*Laserscanning is a sophisticated method for topographic mapping. It serves for the generation of digital elevation models (DEM). The following issues are of main interest for the scientific investigation of Laserscanning: a) topographic immediate survey of ground in areas where photogrammetric methods fail or are difficult and not possible (e.g. coastal areas and forests) and b) implementation of a processing chain for the raw data which is automatic to a large extent. Methods based on mathematical morphology and robust parameter estimation are explored for the detection of ground points and for the separation of ground points from non-ground points. For a first approximation the shape of the surface is estimated with the help of a morphological operator. As a result it is possible to postulate hypotheses for ground points and non-ground points. The following task is the modeling of the ground surface and hypothesis tests. Models based on robust parameter estimation are developed and studied. The developed models are verified in relation with different test areas.*

## 1 Einführung

Eines der wichtigsten Merkmale zur Beschreibung eines Objekts ist die geometrische Form seiner Oberfläche. Für die Vermessung von Oberflächenformen stehen eine Reihe von Methoden zur Verfügung. Sie unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht, insbesondere in der Größe des Objekts, in der relativen Genauigkeit und den physikalischen Messprinzipen. Unter ihnen nehmen die berührungslosen Verfahren wegen ihrer Flexibilität eine besondere Stellung ein.

In den letzten Jahren haben sich durch innovative Sensoren neue Perspektiven in der Photogrammetrie ergeben. Ein Beispiel ist das Laserscanning, das hier als ein leistungsfähiges Verfahren zur topographischen Geländeerfassung bzw. zum Aufbau *Digitaler Höhenmodelle (DHM)* vorgestellt werden soll. Insbesondere die steigende Nachfrage nach *aktuellen* DHM erfordert Aufnahmeverfahren, die die notwendigen Höhenpunkte mit hinreichender Genauigkeit auch für große Gebiete und für besondere Gebiete, beispielsweise Waldgebiete oder Küstengebiete in angemessener Zeit liefern können. Die Laserscannermessung, mit ihrem weitgehend automatisierten Messablauf, ihrer vollständig digitalen Datenaufzeichnung und ihrer computerbasierten Auswertung, kann diese Anforderungen erfüllen.

Die mit Flugzeuglaserscannern gewonnenen digitalen Daten stellen zunächst unstrukturierte und unregelmäßig verteilte Punkthaufen dar, die einer intensiven Nachbearbeitung bedürfen. Zu diesem Zweck können Originaldaten in *Höhenwerte* eines geordneten Digitalen Höhenmodells (DHM) durch Interpolation eines Rasters umgerechnet und als *Grauwerte* einer Bildmatrix interpretiert werden (Sui 1999 und 2002a). Es ergibt sich als erste Aufgabe für die Auswertung von Laserscannerdaten eine Separation der gewünschten Laserpunkte auf der Geländeoberfläche (*Bodenpunkte*) von den nicht relevanten Punkten (*Nichtbodenpunkte*). Diese Trennung von beiden Punkten entspricht im Wesentlichen einem Filterungsprozess. Diese Aufgabe kann entsprechend der digitalen Konzeption der Lasermessung durch ein automatisch ablaufendes, digitales Bildverarbeitungsverfahren gelöst werden. Für die Gewinnung von Digitalen Höhenmodellen sind die nicht auf der Geländeoberfläche (Dächer, Bäume, Fahrzeuge usw.) liegenden Punkte zu erkennen und zu eliminieren. Zum *Erkennen* und zum *Trennen* von gemessenen Laserpunkten, für die *Gewinnung* und den *Aufbau* von Digitalen Höhenmodellen und zum *Auffin-*

den von Strukturlinien können die für die Analyse von Bilddaten bekannten Algorithmen der Digitalen Bildverarbeitung herangezogen werden. Im Rahmen des Vorhabens sind die Möglichkeiten der Digitalen Bildverarbeitung zur Lösung dieses Problems zu erproben. Methoden und Ergebnisse der Trennung von Bodenpunkten und Nichtbodenpunkten können beispielsweise in Lindenberger (1993), Kilian et al. (1996), Fritsch et al. (1994) und Sui (1999, 2002a und 2002b) gefunden werden. Insbesondere bei Sui (2002a) werden unterschiedliche Modelle zur Bearbeitung von Laserscannerdaten und zahlreiche Abbildungen über die Ergebnisse dargestellt.

Die Extraktion von Strukturlinien aus DHM-Daten ist eine andere Aufgabe der Arbeit. Strukturlinien gehören zu den zusätzlichen Forminformationen, die beim Aufbau des präzisen DHMs von großer Bedeutung sind. Unter Strukturlinien können unterschiedliche Modifizierungen verstanden werden, beispielsweise Gerippllinien bzw. Bruchkanten. Diese Aufgabe wird hier mit den Abbildungen kurz vorgestellt.

## 2 Aufgabenstellung

Der Anwendungsbereich der Laserscannermessung wird in dieser Arbeit auf die topographische Geländeaufnahme beschränkt. Das Ergebnis einer Befliegung ist zunächst ein unstrukturierter und unregelmäßig verteilter Punkthauften. Diese unbearbeiteten Punkte müssen durch eine automatisch ablaufende digitale Auswertung bearbeitet werden, bis man ein verwendbares DHM erhält. Dabei werden morphologische Operatoren und robuste Parameterschätzung eingeführt. Weitergehend werden Digitale Bildverarbeitungsmethoden zur Extraktion von Strukturlinien verwendet. Zur Verwirklichung der Zielsetzung können einzelne Teilaufgaben wie folgt formuliert werden:

### *Mathematische Morphologie zur Vorverarbeitung von Laserpunkten*

Zur Trennung gewünschter Laserpunkte auf der Geländeoberfläche (Bodenpunkte) von den nicht relevanten Punkten (Nichtbodenpunkte) werden die im Bildverarbeitungsbereich bekannten morphologischen Operatoren angewendet. Nach dieser Vorbearbeitungsphase werden Bodenpunkthypothesen und Nichtbodenpunkthypothesen ermittelt.

### *Weiterbearbeitung von Laserpunkten*

Die daran anschließende Aufgabe besteht in der Modellierung der mathematischen Geländeoberfläche und der Selektion der Bodenpunkte. Bei der mathematischen Modellierung der Geländeoberfläche werden die beiden Punkthypothesen durch robuste Schätzmodelle untersucht und getestet. Die Ergebnisse sind identifizierte Bodenpunkte und übrige Nichtbodenpunkte. Die Bodenpunkte werden dann für den DHM-Aufbau verwendet.

### *DHM-Interpolation und Herstellung von Höhenlinien*

In diesem Teil handelt es sich um die Interpolation der unregelmäßig verteilten Laserpunkte beim DHM-Aufbau. Dazu gibt es eine Vielzahl von Programmen und methodischen Beschreibungen. Eine andere Teilaufgabe besteht in der Herstellung von Höhenlinien.

### *Extraktion von Strukturlinien*

Strukturlinien (Bruchkantenlinien und Gerippllinien) spielen eine wichtige Rolle beim Aufbau von präzisen Höhenmodellen. Um solche Strukturlinien aus den DHM-Daten zu extrahieren, müssen zunächst die unregelmäßig verteilten Punkte interpoliert werden. Durch die Einführung von digitalen Bildverarbeitungsmethoden werden die Originaldaten des DHMs als Grauwerte einer Bildmatrix betrachtet und bearbeitet. Mit Hilfe der in Bildverarbeitungsbereichen bekannten Methoden und Algorithmen werden Strukturlinien möglichst automatisch extrahiert.

## 3 Mathematische Auswertung von Laserscannerdaten

### 3.1 Vorverarbeitung mittels Mathematischer Morphologie

Die theoretischen Grundlagen der morphologischen Bildverarbeitung kommen aus der Mengentheorie. In einem Binärbild wird beispielsweise jedes Objekt, d. h. eine zusammenhängende Region mit gesetzten Pixelwerten z. B. **1**, als eine Menge aufgefasst. Auf derartige Mengen können die beiden grundlegenden Operatoren *Dilatation* und *Erosion* angewendet werden. Diese Operatoren können unabhängig von der Darstellung der zu bearbeitenden Objekte formuliert werden. So können beispielsweise kontinuierliche oder diskrete Funktionen, Binär- oder Grauwertbilder, bearbeitet werden.

Die eindimensionale Formulierung und Verwirklichung dieser Operatoren wurden in der Darstellung von Lindenberger (1993) für die Auswertung diskreter Laserprofile gezeigt. Hier werden diese Operatoren für die Bearbeitung von flächenhaften Laserscannerdaten in eine *zweidimensionale* Darstellung übertragen.

Aus den oben erwähnten beiden Grundoperatoren *Dilatation* und *Erosion* ergeben sich durch einfache Kombination folgende zwei weitere wichtige morphologische Operatoren: *Opening* und *Closing*. Bei den Operatoren *Opening* und *Closing* werden *Dilatation* und *Erosion* jeweils paarweise kombiniert ausgeführt.

#### *Opening* °

Das Objekt  $f(\vec{x})$  wird durch das *Strukturelement*  $g(\vec{z})$  geöffnet, indem die *Erosion* von  $f$  durch  $g$  einer anschließenden *Dilatation* durch  $g$  unterzogen wird:

$$(f \circ g) = (f \ominus g) \oplus g \quad (1)$$

**Closing •**

Das Objekt  $f(\vec{x})$  wird durch das *Strukturelement*  $g(\vec{z})$  geschlossen, indem die Dilatation von  $f$  durch  $g$  einer anschließenden Erosion durch  $g$  unterzogen wird:

$$(f \bullet g) = (f \oplus g) \ominus g \tag{2}$$

Beide Operatoren Opening und Closing besitzen verschiedene Funktionen und Eigenschaften und können bei unterschiedlichen Aufgabenstellungen und Zielsetzungen angewendet werden. Im Wesentlichen dient das Opening dem Eliminieren kleiner Strukturen, während das Closing kleine Lücken schließt. Das Maß beim Eliminieren und Schließen, also was als kleine Struktur oder kleine Lücke gilt, wird durch das *Strukturelement* im Falle der eindimensionalen Operation bzw. durch das *Strukturfenster* im Falle der zweidimensionalen Operation bestimmt. Weil bei der Herstellung eines DHMs mit Laserscannerdaten nur die Punkte, die auf der niedrigeren Geländeoberfläche liegen, eine wichtige Rolle spielen, wird hier nur der Operator Opening kurz beschrieben.

Der Operator Opening kann wie folgt geometrisch beschrieben werden: Ein Fenster (Strukturfenster) der Größe  $M \times N$  wird punktweise über die Geländeoberfläche geschoben. Der zentrale Punkt im Fenster erhält den minimalen Wert aller Laserpunkte innerhalb des Fensters. Das Ergebnis dieser ersten Operation ist die Erosion. Anschließend wird eine Dilatation des erodierten Objektes vorgenommen. Dabei wird das Fenster punktweise über die erodierte Oberfläche geführt und jeweils der Maximalwert innerhalb des Fensters dem zentralen Fensterpunkt zugewiesen. Durch den Operator Opening wird damit eine Näherung für die Geländeoberfläche bestimmt. Nach dieser Operation werden dann Bodenpunkthypothesen und Nichtbodenpunkthypothesen berechnet. Um die tatsächlichen Bodenpunkte herauszufiltern, müssen eine Weiterverarbeitung von Punkthypothesen (Modellierung der Geländeoberfläche) und die Identifizierung der Bodenpunkte durchgeführt werden.

**3.2 Weiterverarbeitung von Laserpunkten**

Nach dem ersten Auswertungsschritt, der mathematischen Morphologie, erhält man Bodenpunkthypothesen und Nichtbodenpunkthypothesen. Die Bodenpunkthypothese bezeichnet noch keinen echten Bodenpunkt und die Nichtbodenpunkthypothese auch keinen echten Nichtbodenpunkt. Deswegen muss ein zweiter Auswertungsschritt durchgeführt werden, die so genannte robuste Parameterschätzung zur Modellierung der Geländeoberfläche. Theoretische Untersuchungen zur Modellierung der Geländeoberfläche wurden in der Photogrammetrie zunächst unter dem Aspekt der Interpolation von Digitalen Höhenmodellen durchgeführt. Die in Frage kommende Parameterschätzung muss unter dem Aspekt der

Robustheit gegenüber den topographisch nicht relevanten Laserpunkten untersucht werden.

Dieses in zwei Schritten aufgeteilte Bearbeitungsverfahren von Lasermessungen liefert zwei Vorteile: Ein morphologischer Opening-Operator beschafft Näherungswerte von Bodenpunkten. Dabei werden mit Hilfe des morphologischen Operators diejenigen Punkte bestimmt, die auf der unteren Umhüllenden der gescannten Oberfläche liegen. Diese Punkte entsprechen der gesuchten Geländeoberfläche in erster Näherung. Der zweite Vorteil liegt darin, dass alle Laserpunkte nach der morphologischen Operation mit unterschiedlichen Gewichten bestimmt werden können. Mit Bodenpunkthypothesen kann die Geländeoberfläche besser modelliert und geschätzt werden, als wenn alle Laserpunkte mit den gleichen Gewichten am Anfang in die Ausgleichung und Berechnung direkt eingeführt werden. Alle Punkte haben in Abhängigkeit des vorherigen Schrittes unterschiedliche Gewichte. Mit Hilfe von robuster Parameterschätzung werden dann alle Laserpunkte weiter bearbeitet.

Robuste Verfahren erweisen sich in geodätischen Problemstellungen und Auswertungen nicht nur für die konventionelle Parameterschätzung, sondern zunehmend auch für die Untersuchung von geodätischen Zeitreihen als nützlich und notwendig. Im Folgenden werden einige Modelle zur robusten Parameterschätzung vorgestellt und angewendet. Unser Ziel ist es, Punkthypothesen durch robuste Parameterschätzung zu verifizieren. Infolge der robusten Parameterschätzung ergibt sich die Trennung der Bodenpunkte von den auf den nicht relevanten Objekten liegenden Nichtbodenpunkten.

Als Beispiels können *ein kausales zweidimensionales autoregressives Modell* und *ein nichtkausales zweidimensionales autoregressives Modell* bei der Bearbeitung von flächenhaften Laserpunkten angewendet werden. Ein kausales zweidimensionales autoregressives Modell der Ordnung  $\max(p,q)$ , abgekürzt als  $\text{kar}(p,q)$  geschrieben, ist dadurch gekennzeichnet, dass die Zufallsvariable  $x(m,n)$  am Ort

$$x(t-r) = x(m-k, n-l), t-r = \{(m-k), (n-l)\}, \\ t = (m,n) \in T$$

als gewichtete Summe der Zufallsvariablen und eines zusätzlichen weißen Rauschens  $e(m,n)$  dargestellt wird,

$$x(m,n) = \sum_{\substack{k=0 \\ (k,l) \neq (0,0)}}^p \sum_{l=0}^q a_{kl} x(m-k, n-l) + e(m,n) \tag{3}$$

worin  $a_{kl}$  konstante Koeffizienten sind. Der Prozess  $e(m,n)$  wird hier als stochastisches weißes Rauschen angenommen, für das der Erwartungswert  $E\{e(m,n)\} = 0$  gilt (Koch 1996, Schulte 1987).

Erweitert man die Nachbarschaft in (3) in die Umgebung des betrachteten Punktes  $t = (m,n) \in T$  innerhalb eines bestimmten Bereiches (Fensters), erhält man einen



nichtkausalen zweidimensionalen autoregressiven Prozess der Ordnung  $\max(p,q)$ , abgekürzt  $\text{nar}(p,q)$ ,

$$x(m,n) = \sum_{\substack{k=-p \\ (k,l) \neq (0,0)}}^p \sum_{l=-q}^q a_{kl} x(m-k, n-l) + e(m,n) . \quad (4)$$

worin  $a_{kl}$  wieder konstante Koeffizienten sind.

Abb. 1 zeigt eine Perspektivansicht der Originaldaten eines ausgeschnittenen Testgebietes. Abb. 2 stellt die Perspektivansicht der bearbeiteten Daten dieses Ausschnittes mit dem  $\text{nar}$ -Modell der Ordnung  $\text{nar}(5,5)$  dar. Zwei Höhenprofile der Originaldaten und der bearbeiteten Daten werden in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt. Abb. 5 und Abb. 6 zeigen jeweils das Luftbild und das Höhenwert-

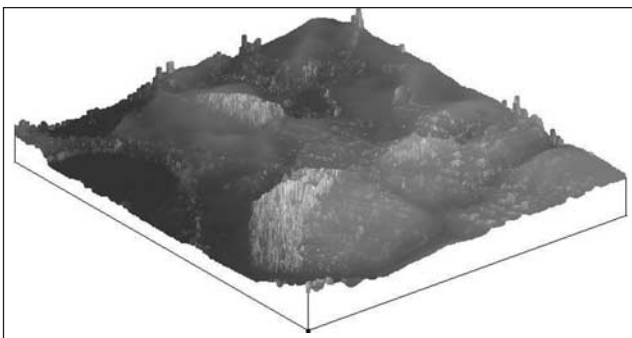


Abb. 1: Perspektivansicht der Originaldaten

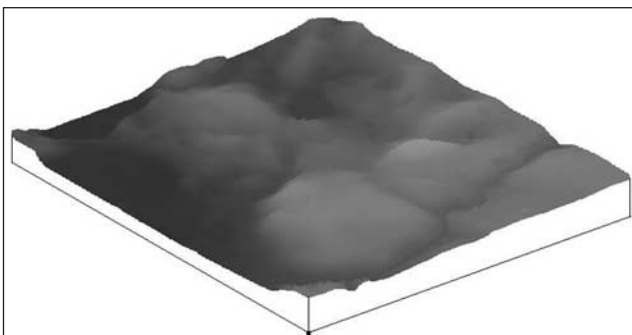


Abb. 2: Perspektivansicht der mit dem  $\text{nar}$ -Modell bearbeiteten Daten

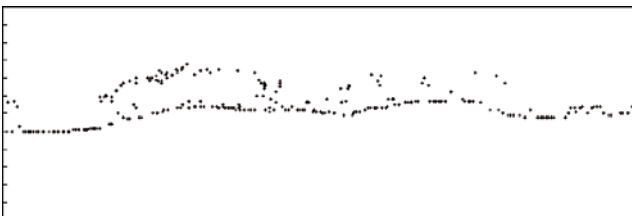


Abb. 3: Höhenprofil der Originaldaten

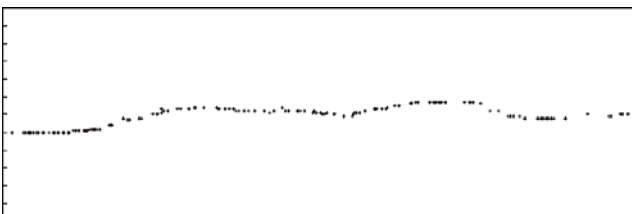


Abb. 4: Höhenprofil der mit dem  $\text{nar}$ -Modell bearbeiteten Daten



Abb. 5: Orthophoto

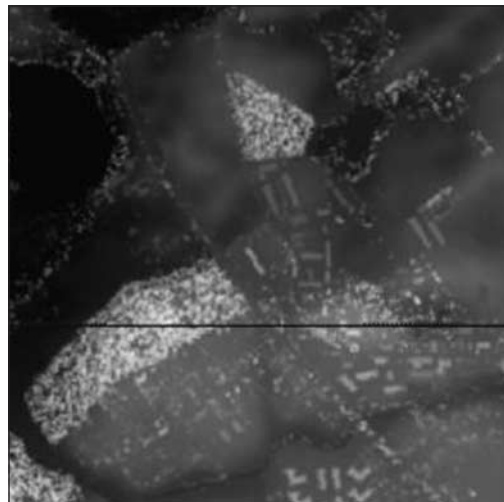


Abb. 6: Höhenwertbild und Profilposition

bild. Das Gebiet wird durch die gemischten Objekte (Wälder, Häuser, Vegetation, Straße und einen kleinen See) bedeckt und hat die Fläche  $1100 \times 1100 \text{ m}^2$ . Abb. 7 (a), (b), (c) und (d) stellen die entsprechenden Ergebnisse für ein zweites Testgebiet dar.

## 4 DHM-Aufbau und Herstellung von Höhenlinien

### 4.1 Vorbemerkung

Das Digitale Höhenmodell, dem bisher eine eher eigenständige Rolle innerhalb einzelner Fachdisziplinen zukam, bringt durch seine umfassende Beschreibung des Geländereiefs weitere Informationen in den Datenbestand eines raumbezogenen Informationssystems. Auf diese Informationen kann im Bereich des amtlichen Vermessungswesens, vieler Ingenieurwissenschaften, der Raumordnung, der Ökologie, des Umweltschutzes, des Hochwasserschutzes, der Einrichtung und Instandhaltung der Infrastruktur wie Straßen, Schienenwege oder Deiche usw. nicht verzichtet werden. Um digitale Höhen-

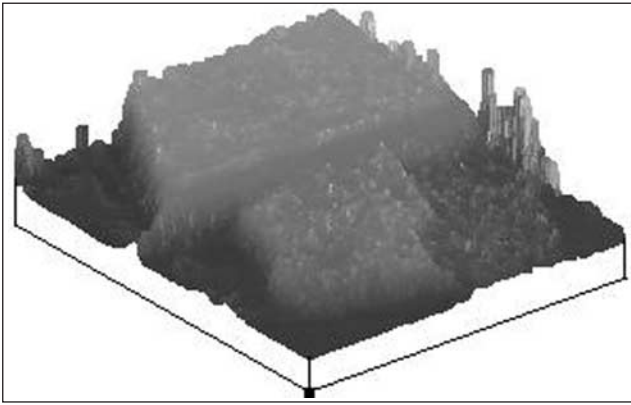


Abb. 7 (a): Perspektivansicht der Originaldaten

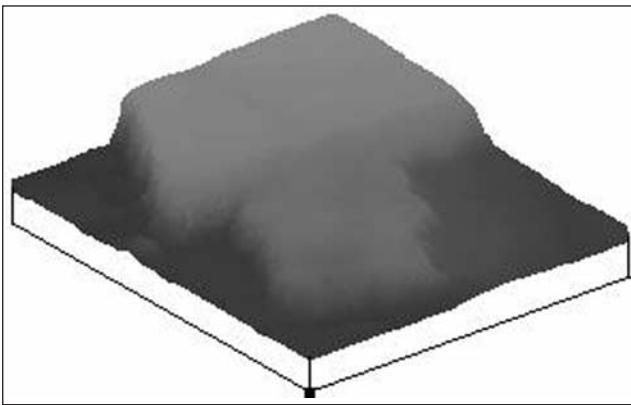


Abb. 7 (b): Perspektivansicht der bearbeiteten Daten



Abb. 7 (c): Luftbild

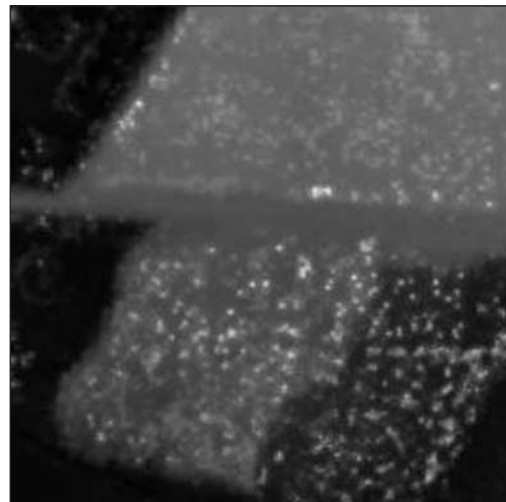


Abb. 7 (d): Höhenwertbild

modelle von hoher Qualität zur Verfügung zu stellen, sind im Wesentlichen drei Arbeitsschritte notwendig: Die *Datenerfassung*, die *Datenaufbereitung*, sowie die *Datenapproximation* und *-interpolation*.

Im Hinblick auf die Interpolation von digitalen Höhenmodellen in raumbezogenen Informationssystemen kommt der Geländedatenerfassung bereits eine entscheidende Bedeutung bei der DHM-Herstellung zu. Mit der *Datenerfassung* wird die Qualität der Daten vorgegeben, die abhängig von der Methode der Datenerfassung und der Datendichte ist. Die Möglichkeiten der Datenerfassung lassen sich nach Fritsch (1991) unterscheiden in

- a) die Erfassung aus topographischen Karten mittels der Digitalisierung von Höhenlinien,
- b) die Erfassung mit photogrammetrischen Verfahren, also aus Stereomodellen,
- c) die Erfassung durch tachymetrische Geländeaufnahme und
- d) die direkte Erfassung durch Laserscanning.

Zu a), b) und c) können auch ausgewählte Höhenpunkte gemessen werden. Dies können Höhenpunkte auf Geländebruchkanten, Kuppen-, Mulden- und Sattelpunkte und Punkte auf Geripplinien sein.

Beim Laserscanning lassen sich Punkte auf Geländekanten und Geripplinien nicht direkt messen. Aber dieses Verfahren liefert eine Reihe von Vorteilen wie beispielsweise eine aktuelle Erfassung von beliebigen Gebieten,

gute Erfassungsmöglichkeit in Waldgebieten und geringeren Personaleinsatz und Kostenaufwand. Außerdem kann dieses Verfahren sehr dichte Messpunkte liefern, mit deren Hilfe Geländekanten extrahiert werden können. Diese Aufgabenstellung der Extraktion von Geländebruchkanten wird in Kap. 5 diskutiert und behandelt.

#### 4.2 Herstellung von Höhenlinien

Das Höhenlinienbild ist eine der wichtigsten Darstellungsformen des DHMs. Das Laserscanning bietet eine aktuelle Methode zur Herstellung dieser Darstellung. Ausgehend von bearbeiteten Laserscannerdaten kann das Höhenlinienbild entweder aus Dreiecks-DHM oder aus einem Gitter-DHM erfasst werden. Gemischte Modelle (Ebner u. a. 1989, Reinhardt 1991), die sowohl Dreiecks-DHM als auch Gitter-DHM enthalten, finden ebenfalls Anwendung. Das im Folgenden dargestellte Höhenlinienbild (Abb. 8) wird durch Gitter-DHM hergestellt.

Die Vorbereitung (Datenaufbereitung) von DHM-Daten spielt eine wichtige Rolle bei der Herleitung der Höhenlinien. Vorbereitung bedeutet im Wesentlichen

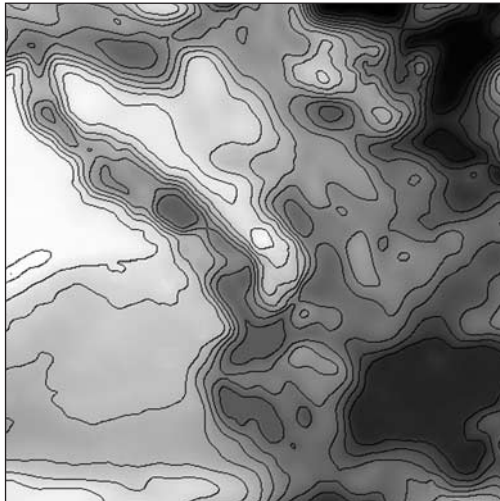


Abb. 8: Höhenlinienbild aus Laserscannerdaten

Abb. 9: Topographische Karte  
(Maßstab ca. 1 : 10000)

die Beseitigung der kleinförmigen Struktur und von kleinen Störungen. Untersuchungen der Glättung von DHM-Daten wurden von Fritsch (1991) beschrieben. Dort wurden Profilglättung, Glättung von Isolinen und Glättung von Raumkurven unterschieden.

Abb. 8 zeigt ein Höhenlinienbild mit Laserscannerdaten. Dieses Bild wird hier als ein Beispiel gezeigt. Dieses Beispiel zeigt den Erfolg der Herstellung von Höhenlinien mit Laserscannerdaten deutlich. Die Herstellung von Höhenlinienbildern kann durch erfolgreiche Softwarepakete (beispielsweise SCOP) durchgeführt werden. Abb. 9 stellt eine topographische Karte des entsprechenden Testgebietes dar.

## 5 Extraktion von Strukturlinien

### 5.1 Vorbemerkung

Strukturlinien gehören zu den zusätzlichen Forminformationen, die beim Aufbau des präzisen DHMs von gro-

ßer Bedeutung sind (Bill 1999, Wild 1983). Die Ableitung von Strukturlinien aus Laserscannerdaten ist ein neues Thema. In der Arbeit wird dieses Thema durch die Einführung von digitalen Bildverarbeitungsmethoden behandelt und daraus eine kombinierte Idee zur Extraktion von Strukturlinien entwickelt, die sogenannte *Multi-Resolution, Multi-Channel Method (MrMcMe)*. Unter *Multi-Resolution* wird hier verstanden, dass bei der Extraktion von Strukturlinien unterschiedliche Skalenparameter eingeführt und untersucht werden sollen. Unter dem *Multi-Channel* versteht man hier einerseits, dass unterschiedliche Modelle verwendet werden. Andererseits sollen bei den verschiedenen Kantenformen unterschiedliche Verfahren eingeführt werden.

### 5.2 Extraktion von Bruchkantenlinien

*Bruchkantenlinien* kennzeichnen den unscharfen Übergang zwischen verschiedenen geneigten Teilflächen, wobei senkrecht zur Strukturlinie eine größere Flächenkrümmung auftritt. Solche Linien bestimmen Unstetigkeitsstellen in der Geländeoberfläche. Unstetigkeiten der Flächenneigung entstehen bei Flächenkanten wie z.B. künstlichen Böschungskanten, Unstetigkeiten der Geländehöhe bei Flächensprüngen und künstlichen Bauwerken. Teilweise findet sich noch die Unterscheidung in scharfe und runde Bruchkantenlinien.

Die Extraktion von Bruchkanten geht in der Arbeit von der ersten bzw. zweiten Ableitung aus. Die erste Ableitung von Ableitungsoperatoren hat an einer Kante ein lokales Maximum, die zweite Ableitung einen Nulldurchgang. Im zweidimensionalen Grauwertbild werden partielle Ableitungen  $\partial f(x,y)/\partial x$  und  $\partial f(x,y)/\partial y$  berechnet (Canny 1986).

Der gesamte Prozess der Extraktion von Bruchkanten besteht aus der Kantenextraktion und Weiterbearbeitung. Unter *Kantenextraktion* versteht man die Berechnung der Kantenstärke und Kantenrichtung, damit ein Kantenfeld gebildet werden kann. Unter *Weiterbearbeitung* kann eine Kanten-Nachbearbeitung verstanden werden, die aus dem Prozess der *Non-Maxima-Suppression* durch die Analyse der Kantenrichtung und -stärke, dem Prozess des *Hysteresis-Threshold-Verfahrens* und einem Prozess des *Constraint-Thinning-Verfahrens*, wenn dies notwendig ist, besteht. Die genaue Beschreibung der Extraktion von Bruchkanten kann man in Steinbrecher (1993) und Sui (2002a) finden. Hier werden einige Ergebnisse der Extraktion von Bruchkanten vorgestellt. Abb. 10 (a) stellt das Ergebnis von extrahierten Strukturlinien dar. Abb. 10 (b) zeigt die digitalisierte topographische Karte. Abb. 10 (c) ist eine Perspektivansicht der entsprechenden Testdaten.





Abb. 10 (a): Kantendetektion mit Laserscannerdaten (Originaldaten: 200 x 280 Pixel, DHM-Maschenweite: 4 m)



Abb. 10 (b): Topographische Karte der entsprechenden Testdaten

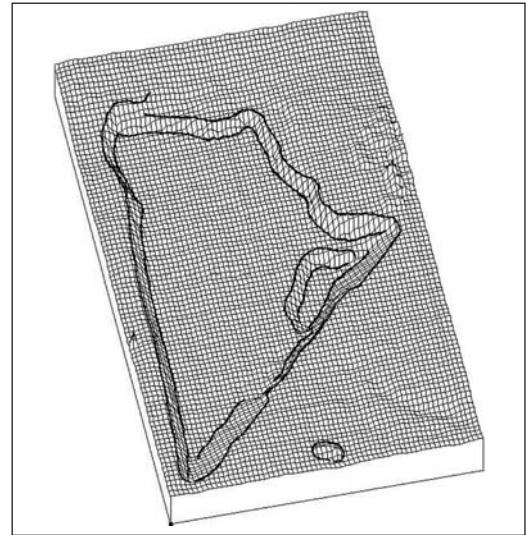


Abb. 10 (c): Perspektivansicht der entsprechenden Testdaten

### 5.3 Extraktion von Geripplinien

*Geripplinien* sind zugleich Fall- und Strukturlinien. Sie beschreiben das Zusammenstoßen zweier verschiedener geneigter Teilflächen entlang von Falllinien.

Die Differentialgeometrie befasst sich mit lokalen Eigenschaften von Kurven und Flächen, die nur vom Verhalten der Kurve oder Fläche in der Umgebung eines Punktes abhängen, sowie dem Einfluss lokaler Eigenschaften auf die gesamte Kurve oder Fläche (Jiang u. a. 1997).

Zur Berechnung der Krümmungsmaße werden in den meisten Fällen zwei Parametrisierungen verwendet, zwei Flächendarstellungen sollen also berücksichtigt werden (Weidner 1994). Falls die lokale Fläche um jeden Bildpunkt mit einer Funktion  $f(x,y)$  approximiert wird, so kann die Parametrisierung  $(x, y, f(x,y))$  ( $f(x,y)$ : eine Approximationsfunktion) eingesetzt werden, die Bestimmung von Krümmungsmaßen kann also auf der Basis von Flächenapproximationen durchgeführt werden. In einem Höhenbild (in unserem Fall wie DHM-Daten) werden dann die Bildkoordinaten  $(x, y, z(x,y))$  als Parameter  $(\chi_1, \chi_2, \chi_3)$  verwendet, die Bestimmung von Krümmungsmaßen wird also aus diskreten Flächenpunkten eines Rasters durchgeführt. Die Bestimmung von Krümmungsmaßen aus solchen diskreten Flächenpunkten eines Rasters ist die Aufgabe der Arbeit.

Im Krümmungsraum zeigen Geripplinien eine größte Flächenneigung der Geländeoberfläche. Also stellt eine Geripplinie einen positiven bzw. negativen Maximal-Krümmungswert dar. Basierend auf der differentialen Krümmungsgeometrie können die Gauß'sche und mittlere Krümmung oder maximale und minimale Krümmung wie in Weidner (1993), Jiang u. a. (1997) und Wild und Krzystek (1996) angewendet werden. Abb. 11 (a), (b) und

(c) zeigen einige Ergebnisse der Extraktion von Geripplinien mit Krümmungsmaßen.

### 6 Ausblick

Das entwickelte und realisierte Verfahren zur Auswertung von gemessenen Laserpunkten und zur Extraktion von Strukturlinien besitzt hohe konzeptionelle Reichweite. Die erste Aufgabe der Auswertung von gemessenen Laserpunkten bestand in der Trennung der verwertbaren Laserpunkte, die sich auf die Geländeoberfläche bezogen, von den Punkten, die auf topographisch nicht interessanten Objekten gemessen wurden. Die Lösung dieser Aufgabe basierte auf zwei mathematischen Theorien, der mathematischen Morphologie und den robusten Prozessen.

Zur zweiten Aufgabenstellung, der Extraktion von zusätzlichen Forminformationen, wurden digitale Bildverarbeitungsmethoden angewendet. Das entwickelte und realisierte Verfahren zur Extraktion von Strukturlinien erlaubte einerseits auf einfache Weise Erweiterungen für andere Anforderungen. Zum anderen konnten einige Aspekte des Verfahrens auch in anderen Verfahren leistungssteigernd integriert werden. Die extrahierten Strukturlinien verbessern die Qualität eines präzisen digitalen Höhenmodells (DHMs) und liefern außerdem zusätzliche Informationen für GIS bzw. für die 3D Rekonstruktion von Objekten.

Die hier entwickelten Verfahren und die Software zur Auswertung von Laserscannerdaten und zur Extraktion von zusätzlichen Forminformationen besitzen hohe Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit. Durch Darstellungen und Beispiele wurden die beiden Eigenschaften Übertragbarkeit und Erweiterbarkeit ebenfalls nachgewiesen (Sui 2002a).

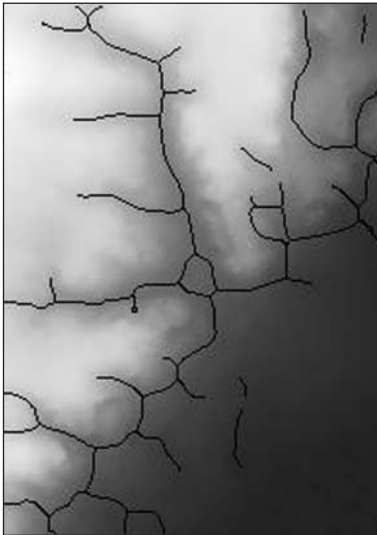


Abb. 11 (a): Extraktion von Geripp- und Geripplinien mit Laserscannerdaten – Geripplinien auf Höhenwertbild

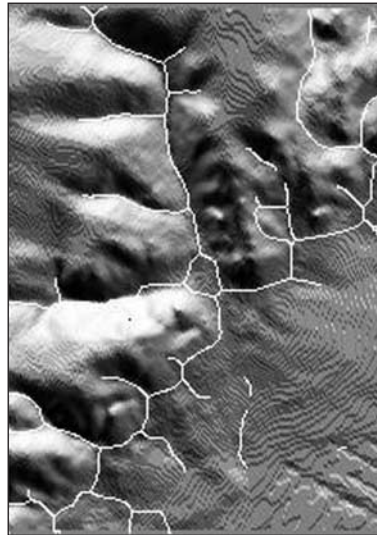


Abb. 11 (b): Extraktion von Geripp- und Geripplinien mit Laserscannerdaten – Überlagerung auf Reliefbild

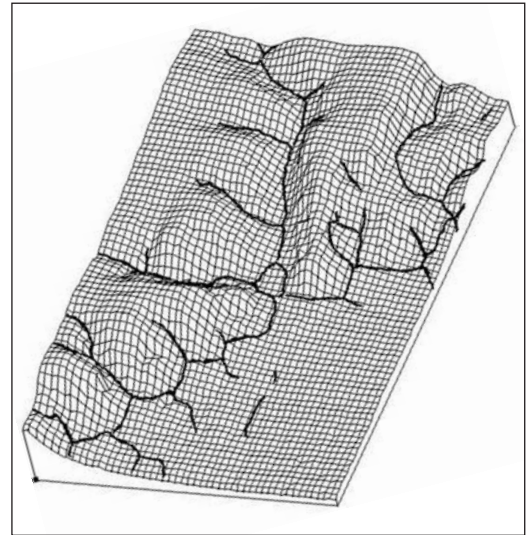


Abb. 11 (c): Extraktion von Geripp- und Geripplinien mit Laserscannerdaten – Perspektivansicht

### Danksagung

Diese Arbeit wurde am Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität Berlin durchgeführt und auch vom Landesvermessungsamt Brandenburg unterstützt. Ich bedanke mich insbesondere bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Albertz von der TU Berlin für die Arbeitsmöglichkeit und bei Herrn Dr. Eckhardt Seyfert, dem Abteilungsleiter im Landesvermessungsamt Brandenburg, für die Bereitstellung der Materialien von Laserscannerdaten, topographischen Karten sowie Luftbildern. Außerdem bedanke ich mich bei der Otto-Lacmann-Stiftung der TU Berlin, der von Humboldt-Ritter-Penck-Stiftung der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin und der Hege-mann-Stiftung der TU Berlin, die mich bei meiner Pro-motion unterstützt haben.

### Literatur

- Bill, R.: Grundlagen der Geoinformationssysteme. Band 2, Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. 2. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag, 1999.
- Canny, J.: A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 8, Heft 6, S. 679–698, 1986.
- Ebner, H., Reinhardt, W. und Tang, L.: Beiträge der Rasterdatenverarbeitung zum Aufbau digitaler Geländemodelle. ZfV 114, S. 268–278, 1989.
- Fritsch, D.: Raumbezogene Informationssysteme und digitale Geländemodelle. DGK Reihe C, Heft Nr. 369, 1991.
- Fritsch, D. and Kilian, J.: Filtering and calibration of laser scanner measurements. ISPRS Commission III Symposium Munich, WG III/1, 1994.
- Jiang, X. und Bunke, H.: Dreidimensionales Computersehen – Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern. Springer-Verlag 1997, Berlin, Heidelberg und New York, 1997.
- Kilian, J., Haala, N. und English, M.: Capture and evaluation of airborne laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3, Vienna, 1996.
- Koch, K.-R.: Robuste Parameterschätzung. AVN 103, S. 1–8, 1996.

Lindenberger, J.: Laser Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme. DGK Reihe C, Heft Nr. 400, 1993.

Reinhardt, W.: Interaktiver Aufbau hochqualitativer digitaler Geländemodelle an photogrammetrischen Stereosystemen. DGK Reihe C, Heft Nr. 381, 1991.

Schulte, S.: Modellierung von Beobachtungsreihen durch ein erweitertes autoregressives Modell. DGK Reihe C, Heft Nr. 327, 1987.

Steinbrecher, R.: Bildverarbeitung in der Praxis. Oldenburg Verlag, München/Wien, 1993.

Sui, Lichun: Pilotprojekt zur Analyse von Laserscannerdaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden – im Auftrag des Landesvermessungsamtes Brandenburg (unveröffentlicht). Abschlußbericht des Fachgebietes Photogrammetrie und Kartographie der TU Berlin, Juli, 1999.

Sui, Lichun: Analyse von Laserscannerdaten mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden. Dissertation, Berlin 2002, D 83, 2002a.

Sui, Lichun: Processing of Laser Scanner Data and automatic Extraction of structure Lines. ISPRS Commission II, WG VI/4, August 2002b.

Sui, Lichun: Ableitung topographischer Strukturlinien aus Laserscannerdaten mit Methoden der Bildverarbeitung. PFG 6/2002, S. 423–434, 2002c.

Weidner, U.: Krümmungsmaße. Institutsinterner Bericht (Internet), 53 Seiten, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, 1993.

Weidner, U.: Information-preserving surface restoration and feature extraction for digital elevation models. In: Proceedings of ISPRS Commission III, Symposium on Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision, München, 1994.

Wild, E.: Die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Gelände- und Geländeflächen bei topographischen Geländeaufnahmen. DGK Reihe C, Heft Nr. 277, 1983.

Wild, D., Krzystek, P.: Automatic breakline detection using an edge preserving filter. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B3, Vienna, 1996.

### Anschrift des Autors

Dr.-Ing. Lichun Sui  
Technische Universität München  
Lehrstuhl für Kartographie  
Arcisstraße 21  
D-80333 München  
sui@bv.tum.de